

A EVOLUÇÃO DO CONCEITO FÍSICO DE TRABALHO  
NO CONTEXTO DAS MÁQUINAS

Agamenon Rodrigues Eufrásio Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS E DAS TÉCNICAS E EPISTEMOLOGIA.

Aprovada por:

---

Prof. Carlos Benevenuto Guisard Köehler, D.Sc.

---

Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.

---

Prof. Carlos Alberto Lombardi Filgueiras, Ph.D.

---

Prof. Luis Carlos Soares, Ph.D.

---

Prof. José Carlos de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
NOVEMBRO DE 2006

OLIVEIRA, AGAMENON RODRIGUES EUFRÁSIO

A Evolução do Conceito Físico de  
Trabalho no Contexto das Máquinas

[Rio de Janeiro] 2006

XI, 289p., 29,7cm /(COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
História das Ciências das Técnicas e Epistemologia, 2006)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. História do Trabalho
2. História da Engenharia Mecânica
3. História da Mecânica Clássica

I. COPPE/UFRJ      II. Título ( série )

***Dedico esta tese à minha família:  
Etelvira, Wagner e Juliana e a todos aqueles  
que vivem de seu próprio trabalho.***

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

## A EVOLUÇÃO DO CONCEITO FÍSICO DE TRABALHO NO CONTEXTO DAS MÁQUINAS

Agamenon Rodrigues Eufrásio Oliveira

Novembro/2006

Orientador: Carlos Benevenuto Guisard Köehler

Programa: História das Ciências das Técnicas e Epistemologia

A tese trata do conceito físico de trabalho desde suas origens mais remotas quando já se intuía que no funcionamento das máquinas algo se mantinha constante. O conceito de trabalho vai se desenvolver no campo da mecânica racional associado às idéias do equilíbrio e do movimento. No primeiro caso este desenvolvimento dá origem ao princípio dos trabalhos virtuais e no segundo ao princípio do trabalho - energia cinética.

A Parte I, denominada de Gênese Conceitual, é dedicada à evolução e constituição do conceito de trabalho relacionado à história das concepções de espaço, de tempo, de força e de massa que são os conceitos fundamentais da física e que vão formar os elementos básicos para a sua estruturação. Nela, também são estudados os princípios fundamentais da física: princípio dos trabalhos virtuais, princípio da mínima ação e princípio da conservação da energia, os quais estão estreitamente vinculados com o conceito de trabalho.

A Parte II, chamada de Gênese Instrumental, está voltada para a história da utilização do conceito físico de trabalho nas máquinas. Uma ênfase especial é dada à mecânica de Lazare Carnot onde o conceito de trabalho ocupa uma posição central. Finalmente nas mãos dos engenheiros politécnicos da geração posterior a Lazare Carnot, principalmente Navier, Coriolis e Poncelet o conceito de trabalho vai ser incorporado ao pensamento econômico e formar a base para o estudo das máquinas preparando o terreno para o surgimento de uma nova ciência: a termodinâmica.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences (D.Sc.).

## THE EVOLUTION OF THE PHYSICAL CONCEPT OF WORK IN THE MACHINES CONTEXT

Agamenon Rodrigues Eufrásio Oliveira

November/2006

Advisor: Carlos Benevenuto Guisard Köehler

Department: Sciences and Technics History and Epistemology.

The thesis herein deals primarily with the concept of work since its ancient origins when it was realized that in machine operation something remains invariable and cannot be overtaken. The concept of work is then developed in the field of rational mechanics associated with the ideas of equilibrium as well as of motion. For the first case it leads to the principle of virtual works. For the second one we arrived to the principle of work- kinetic energy.

Part I, called Conceptual Genesis, deals with the evolution and constitution of the concept of work related to the history of ideas of space, time, force and mass as basic concepts of physics and of fundamental importance for the construction of the concept of work itself. In Part I it is also found a brief history of main physical principles: the principle of virtual works, the principle of least action and the principle of energy conservation regarding its relations with the concept of work.

Part II, called Instrumental Genesis, deals with history of the application of the concept of work to machines. We focus our attention in the Lazare Carnot's mechanics and the importance of the concept of work to the first theory of machines. Finally, the concept of work is incorporated to the economic thought by the polytechnicians' engineers mainly Navier, Coriolis and Poncelet that prepared a new context to a new science: the thermodynamics.

# Índice

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
Considerações Gerais sobre o Trabalho	3
Da Manufatura à Expansão do Maquinismo	5
O Efeito do Maquinismo sobre o Trabalho: a fadiga	8
Trabalho Concreto e Trabalho Abstrato	11
Trabalho e Valor	14
Ciências da Natureza e Ciências Humanas	16
Extensão e Limites desta Investigação	20
Sumário por Capítulo	21
<b>Capítulo 1: O Quadro de Referência Teórico-Histórico</b>	<b>23</b>
1.1 O MARXISMO	23
1.1.1 Breve História	23
O Materialismo Histórico	28
O Materialismo Dialético	32
Teoria do Conhecimento	34
1.2 TEORIA DA HISTÓRIA E HISTORIOGRAFIA GERAL	39
1.3 A HISTORIOGRAFIA DA CIÊNCIA	46
<b>PARTE I: A GÊNESE CONCEITUAL</b>	<b>56</b>
<b>Capítulo 2: A Base Conceitual para o Estudo do Trabalho</b>	<b>57</b>
2.1 O CARÁTER HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS	57
2.2 A EVOLUÇÃO DAS CONCEPÇÕES DE ESPAÇO	61
EUCLIDES (330- 260 A.C.)	61
DESCARTES (1596 - 1650)	64
NEWTON (1642-1727)	65
LEIBNIZ (1646-1716)	67
2.3 A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE TEMPO	69
2.4 O CONCEITO DE FORÇA E SUAS CONTROVÉRSIAS	74
2.5 O CONCEITO DE MASSA	78

<b>Capítulo 3: As Idéias de Trabalho e Energia na Mecânica</b> .....	<b>82</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	82
3.2 O CONCEITO DE TRABALHO E SUA FORMALIZAÇÃO .....	86
3.3 O DESENVOLVIMENTO DO PRINCÍPIO DOS TRABALHOS VIRTUAIS .....	90
FOURIER (1798).....	92
LAGRANGE (1798) .....	93
PRONY (1798) .....	94
POINSOT (1806) .....	95
3.4 O PRINCÍPIO DA MÍNIMA AÇÃO .....	96
3.5 O PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA .....	101
 <b>Capítulo 4: O Dilema da Mecânica Racional</b> .....	 <b>113</b>
4.1 RESUMO HISTÓRICO DA MECÂNICA NO CONTEXTO DA FÍSICA .....	113
4.2 A FORMALIZAÇÃO DA MECÂNICA NO SÉCULO XVIII .....	119
ANTECEDENTES .....	119
AS FERRAMENTAS .....	121
A MECÂNICA LAGRANGEANA .....	124
O PROJETO DA MECÂNICA RACIONAL .....	126
4.3 O SABER DOS PRÁTICOS E CONSTRUTORES DE MÁQUINAS .....	129
 <b>PARTE II: A GÊNESE INSTRUMENTAL</b> .....	 <b>139</b>
 <b>Capítulo 5: Lazare Carnot e uma Teoria Geral das Máquinas</b> .....	 <b>140</b>
5.1 LAZARE CARNOT, CIENTISTA E POLÍTICO .....	140
5.2 CIÊNCIA E REVOLUÇÃO FRANCESA .....	147
5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A MECÂNICA DE LAZARE CARNOT .....	150
5.4 O CONCEITO DE TRABALHO NA MECÂNICA DE CARNOT .....	154
5.5 MEMÓRIA DE LAZARE CARNOT DE 1779 .....	158
5.6 MEMÓRIA DE LAZARE CARNOT DE 1781 .....	162
TEOREMA 1 : Princípio geral do equilíbrio nas máquinas .....	168
TEOREMA 2 : Princípio geral do movimento nas máquinas .....	168
COROLÁRIO 1 : Sobre o movimento nas máquinas com peso .....	169
COROLÁRIO 2 : Sobre as máquinas que se movem uniformemente .....	170
COROLÁRIO 3 : Sobre as máquinas com peso que se movem uniformemente .....	170

COROLÁRIO 4 : Sobre as máquinas sujeitas a retornos periódicos .....	171
COROLÁRIO 5 : Sobre as máquinas sujeitas ao atrito .....	171
<b>Capítulo 6: Os “Princípios Fundamentais do Equilíbrio e do Movimento” de Lazare Carnot .....</b>	<b>174</b>
PREFÁCIO .....	174
PRIMEIRA PARTE: Noções preliminares. Hipóteses admitidas como leis gerais do equilíbrio e do movimento. Conseqüências deduzidas dessas hipóteses. ....	177
SEGUNDA PARTE: Desenvolvimento das hipóteses estabelecidas precedentemente como leis da natureza. A impressão dessas leis por fórmulas algébricas. Considerações gerais sobre as forças moventes aplicadas às máquinas. ....	186
TEOREMA I .....	187
TEOREMA II .....	188
TEOREMA III .....	188
TEOREMA IV .....	188
TEOREMA V .....	188
TEOREMA VI .....	188
TEOREMA VII .....	189
TEOREMA VIII .....	189
TEOREMA IX .....	189
TEOREMA X .....	190
TEOREMA XI .....	190
TEOREMA XII .....	191
COROLÁRIO I .....	191
COROLÁRIO II .....	191
TEOREMA XIII .....	192
COROLÁRIO IV .....	192
TEOREMA XIV .....	193
TEOREMA XV .....	194
TEOREMA XVII .....	195
TEOREMA XVIII .....	196
TEOREMA XIX .....	196
TEOREMA XX .....	197
TEOREMA XXII .....	197



TEOREMA XXIV .....	198
CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DAS FORÇAS MOVENTES ÀS MÁQUINAS .....	198
<b>Capítulo 7: As Metamorfoses do Conceito Físico de Trabalho e sua Incorporação ao Pensamento Econômico .....</b>	<b>207</b>
7.1 DO PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DAS FORÇAS VIVAS AO TEOREMA TRABALHO - ENERGIA CINÉTICA .....	207
7.2 COULOMB E O TRABALHO COMO FORMA DE VENCER UMA RESISTÊNCIA PASSIVA .....	211
7.3 NAVIER E O TRABALHO COMO “MOEDA MECÂNICA” .....	218
7.4 CORIOLIS E O TRABALHO COMO MEDIDA DA AÇÃO DAS MÁQUINAS .....	224
7.5 PONCELET E A MECÂNICA INDUSTRIAL .....	236
<b>Capítulo 8: Conclusão .....</b>	<b>247</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>271</b>
<b>BIBLIOGRAFIA PRIMÁRIA.....</b>	<b>286</b>

# Sumário

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: O Quadro de Referência Teórico-Histórico</b>	<b>23</b>
1.1 O MARXISMO	23
1.1.1 Breve História	23
1.2 TEORIA DA HISTÓRIA E HISTORIOGRAFIA GERAL	39
1.3 A HISTORIOGRAFIA DA CIÊNCIA	46
.	
<b>PARTE I: A GÊNESE CONCEITUAL</b>	<b>56</b>
<b>Capítulo 2: A Base Conceitual para o Estudo do Trabalho</b>	<b>57</b>
2.1 O CARÁTER HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS	57
2.2 A EVOLUÇÃO DAS CONCEPÇÕES DE ESPAÇO	61
2.3 A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE TEMPO	69
2.4 O CONCEITO DE FORÇA E SUAS CONTROVÉRSIAS	74
2.5 O CONCEITO DE MASSA	78
<b>Capítulo 3: As Idéias de Trabalho e Energia na Mecânica</b>	<b>82</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	82
3.2 O CONCEITO DE TRABALHO E SUA FORMALIZAÇÃO	86
3.3 O DESENVOLVIMENTO DO PRINCÍPIO DOS TRABALHOS VIRTUAIS	90
3.4 O PRINCÍPIO DA MÍNIMA AÇÃO	96
3.5 O PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA	101
<b>Capítulo 4: O Dilema da Mecânica Racional</b>	<b>113</b>
4.1 RESUMO HISTÓRICO DA MECÂNICA NO CONTEXTO DA FÍSICA	113
4.2 A FORMALIZAÇÃO DA MECÂNICA NO SÉCULO XVIII	119
4.3 O SABER DOS PRÁTICOS E CONSTRUTORES DE MÁQUINAS	129
<b>PARTE II: A GÊNESE INSTRUMENTAL</b>	<b>139</b>
<b>Capítulo 5: Lazare Carnot e uma Teoria Geral das Máquinas</b>	<b>140</b>
5.1 LAZARE CARNOT, CIENTISTA E POLÍTICO	140

5.2	CIÊNCIA E REVOLUÇÃO FRANCESA .....	147
5.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A MECÂNICA DE LAZARE CARNOT .....	150
5.4	O CONCEITO DE TRABALHO NA MECÂNICA DE CARNOT .....	154
5.5	MEMÓRIA DE LAZARE CARNOT DE 1779 .....	158
5.6	MEMÓRIA DE LAZARE CARNOT DE 1781 .....	162

## **Capítulo 6: Os “Princípios Fundamentais do Equilíbrio e do Movimento”**

	<b>de Lazare Carnot .....</b>	<b>174</b>
	PREFÁCIO .....	174
	PRIMEIRA PARTE: Noções preliminares. Hipóteses admitidas como leis gerais do equilíbrio e do movimento. Conseqüências deduzidas dessas hipóteses. ....	177
	SEGUNDA PARTE: Desenvolvimento das hipóteses estabelecidas precedentemente como leis da natureza. A impressão dessas leis por fórmulas algébricas. Considerações gerais sobre as forças moventes aplicadas às máquinas. ....	186

## **Capítulo 7: As Metamorfoses do Conceito Físico de Trabalho e sua Incorporação ao Pensamento Econômico .....**

	<b>207</b>	
7.1	DO PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DAS FORÇAS VIVAS AO TEOREMA TRABALHO - ENERGIA CINÉTICA .....	207
7.2	COULOMB E O TRABALHO COMO FORMA DE VENCER UMA RESISTÊNCIA PASSIVA .....	211
7.3	NAVIER E O TRABALHO COMO “MOEDA MECÂNICA” .....	218
7.4	CORIOLIS E O TRABALHO COMO MEDIDA DA AÇÃO DAS MÁQUINAS .....	224
7.5	PONCELET E A MECÂNICA INDUSTRIAL .....	236

## **Capítulo 8: Conclusão .....**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....**

### **BIBLIOGRAFIA PRIMÁRIA.....**

# **A Evolução do Conceito Físico de Trabalho no Contexto das Máquinas**

**Agamenon R. E. Oliveira**

agamenon.oliveira@globo.com

*“O trabalho é a fonte de toda riqueza, afirmam os economistas. Assim é, com efeito, ao lado da natureza, encarregada de fornecer os materiais que ele converte em riqueza. O trabalho, porém, é muitíssimo mais do que isto. É condição básica e fundamental de toda a vida humana. E em tal grau que, até certo ponto, podemos afirmar que o trabalho criou o próprio homem”.*

(Friedrich Engels - Sobre o papel do trabalho na transformação do macaco em homem, Suplemento de Cultura, Edições Causa Operária, 2001).

*“As máquinas podem ser definidas, classificadas e estudadas em sua evolução de acordo com qualquer critério que se deseje: força motriz, complexidade, utilização de princípios físicos, etc. Mas se é obrigado, ao início, a escolher entre dois modos de pensar diferentes. O primeiro é o ponto de vista do engenheiro, que enxerga a tecnologia, sobretudo em suas relações internas e tende a definir a máquina em relação a si mesma, como um fato técnico. O outro é o enfoque social, que vê a tecnologia em suas conexões com a humanidade e define a máquina em relação com o trabalho humano, e como um artefato social”.*

(Harry Braverman -Trabalho e Capital Monopolista - Rio, Zahar Editores, 1977).

## **INTRODUÇÃO**

A decisão de enfrentar o desafio de escrever um texto de maior envergadura sobre o conceito físico de trabalho foi tomada após a leitura dos livros de François Vatin [1,2,3] principalmente *O Trabalho: economia e física - 1780/1830*. Neste pequeno livro, o autor além de articular de forma apropriada e didática um conjunto bastante amplo de idéias que tradicionalmente são tratadas em campos diferentes, lança algumas pistas importantes sobre questões que já nos preocupávamos desde algum tempo e sobre as quais pretendemos nos debruçar neste estudo. A parte central do referido livro estuda o processo de incorporação do conceito físico de trabalho à economia, tarefa historicamente realizada nas três primeiras décadas do

século XIX pelos engenheiros politécnicos, principalmente Louis-Marie-Henri Navier (1785-1836), Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843) e Jean-Victor Poncelet (1788-1867).

Dessa maneira, foi evoluindo e ganhando consistência a idéia, mais tarde o projeto, de fazer um aprofundamento de algumas das questões sugeridas por Vatin e também, de uma certa maneira estender seu campo de investigação, o que traz para este nosso estudo algumas diferenças de sua linha investigativa. Elas se situariam em dois níveis, principalmente. Em primeiro lugar, é nossa intenção dar uma fundamentação teórica e histórica aos conceitos básicos que formam o conceito elementar de trabalho. Uma segunda diferença diz respeito ao próprio enfoque no interior do campo de investigação. Enquanto Vatin se concentra mais nos aspectos socioeconômicos do problema do trabalho, o nosso pretende focar a análise na discussão do processo evolutivo do conceito de trabalho, como um conceito das ciências físicas e naturais, envolvendo obviamente questões de natureza histórica, filosófica e epistemológica.

A idéia fundamental que vai ser desenvolvida nos próximos capítulos, e que pode perfeitamente sintetizar o estudo, é que o conceito físico de trabalho ocupa uma posição de destaque no campo da mecânica, mas uma posição central para a mecânica das máquinas. Conforme tentaremos elucidar ao longo do texto, os conceitos atuais de trabalho e energia foram se constituindo a partir de idéias intuitivas muito antigas daqueles que operavam as máquinas, por mais simples que elas fossem. Estamos nos referindo a idéia de que o movimento de uma máquina era um processo de perdas e ganhos e que mais tarde vai ser expresso por Lazare Carnot (1753-1823) na forma: *o que se ganha em velocidade se perde em força e vice-versa*<sup>1</sup>.

Nossa contribuição específica será, portanto, tentar mostrar como o conceito físico de trabalho vai se constituir e se desenvolver a partir daquele núcleo de idéias, a forma particular como ele vai ser utilizado para estudar as máquinas e posteriormente criar uma teoria para elas. Isto significa que após o estudo do que chamamos conceito elementar de trabalho dentro do campo da mecânica passaremos a uma investigação em profundidade da mecânica de Lazare Carnot onde aquele conceito tem uma posição privilegiada na criação de sua mecânica das máquinas. Em seguida, diferentemente do que faz Vatin, ao estudar a mecânica aplicada e seus desdobramentos como uma mecânica industrial, estudaremos a mecânica aplicada tendo o conceito físico de trabalho como elemento estruturante e diretamente

---

<sup>1</sup> Ver página 194, CAP. 6.

relacionado com princípio das forças vivas, ou seja, do teorema do trabalho e da energia cinética que é como o conceito de trabalho é empregado nas máquinas. É necessário salientar que algumas interfaces da problemática suscitada em nosso estudo do trabalho serão exploradas e outras deixadas de lado pelas limitações inerentes a qualquer tipo de investigação. Estamos particularmente nos referindo as interfaces com a história da matemática, da física e principalmente com a da engenharia e seus múltiplos relacionamentos com nosso tema central às quais dedicamos muito da nossa atenção e análise.

Desejamos enfatizar que nossa utilização ao longo do texto do termo *evolução*, inclusive no título da tese, significa tão somente que a partir das idéias originárias anteriormente mencionadas, o conceito de trabalho foi sendo formado, se complexificando, ganhou uma formalização e percorreu uma trajetória que vai da física à economia <sup>2</sup>. Isto não significa que este processo ou outros como o desenvolvimento das ciências e da tecnologia que têm um caráter eminentemente histórico, tenham algo evolutivo *em si*, de natureza teleológica, no sentido de um progresso crescente ou contínuo e o que é pior, cumulativo. Quanto ao *contexto das máquinas*, no qual o conceito físico de trabalho vai ser estudado, ele nos pareceu mais frutífero em termos de potencialidades e possibilidades de análise, mas devemos também dizer que mais complexo.

### **Considerações sobre o Trabalho em Geral**

De uma maneira geral, o trabalho, como o conhecemos atualmente, satisfaz a três necessidades básicas do ser humano: a de subsistir, preenchendo uma função econômica, a de criar, de cunho psicológico e finalmente a de cooperar, de caráter social e político. Em seu conjunto ou em qualquer das formas que venha a ser analisada, a categoria trabalho possui uma amplitude e um campo de análise extremamente vasto e complexo [3].

Do ponto de vista de seu significado, o trabalho envolve uma dialética entre dois pólos opostos: alegria e sofrimento. Isto fica mais bem explicado pela origem das palavras usadas para lhe atribuir o que realmente ele significa. Em latim a palavra *labor*, proveniente do verbo *laborare*, quer dizer penar, enquanto a palavra *labore*, significava cambalear sob uma carga muito pesada. Na língua francesa esses termos

---

<sup>2</sup> Sobre o conceito de evolução de um ponto de vista mais amplo, deve ser consultado o livro de Peter J. Bowler [4]. Nele podemos observar diversas concepções do termo evolução. Fica claro que o conceito de evolução em Darwin não pressupõe um sentido ou uma finalidade no processo evolutivo.

mais antigos foram substituídos a partir do século XV pela palavra *travail* (trabalho) e que servia para designar tanto a peça de madeira que amarrava os animais, como o aparelho de três estacas (*tripalium*) com que se torturavam os condenados.

Se, por outro lado, tomarmos a raiz sânscrita *rabh* da qual derivam ao mesmo tempo os verbos *arbeiten* e *laborare*, veremos que ela tinha na sua origem um sentido positivo de *agir com vigor*. Além disso, todas as palavras que derivam do termo latino *opus*, sempre apresentaram um aspecto belo e criador do esforço humano. Dependendo das formas sociais nas quais o trabalho se insere, ou seja, das condições históricas onde o trabalho se realiza, um dos pólos da contradição é mais acentuado que o outro.

Nas sociedades mais antigas onde predominava a escravidão, o trabalho nas minas, nas oficinas, no reparo das estradas e na fabricação de moedas era realizado por escravos. Este modo de produção tornou-se a forma mais geral de trabalho e generalizou-se em todas as partes, embora não apresentasse um caráter uniforme. O desenvolvimento do comércio, principalmente no mar Mediterrâneo, a partir de uma certa época, passou a exigir um intercâmbio mais variado de produtos, com a característica também de serem mais refinados, colocando a questão da qualidade desses produtos como uma nova exigência. Esta necessidade transformou a condição do trabalho escravo e deu início a um conjunto de mudanças nas formas como o trabalho vinha sendo feito. Com o tempo a condição de escravo vai deixando de atender às necessidades da produção e dessa maneira vai se transformando [4].

Ao tempo das invasões dos bárbaros ao império romano, uma nova forma de submissão do trabalho conhecida como servidão, passa a ser dominante. Ela teve como causa predominante a guerra, a conquista de territórios e no conseqüente avassalamento em massa de populações inteiras na maioria das vezes por conquistadores. As primeiras formas de servidão aparecem no Egito. Ela constituiu a forma geral do trabalho agrícola, muito embora em alguns lugares um grande número de servos tenha se ligado unicamente a uma pessoa, assemelhando-se ao antigo trabalho escravo.

As formas mais modernas de trabalho como o arrendamento, a parceria e a pequena propriedade somente iriam aparecer na Idade Média. Na antiguidade clássica, as propriedades eram muito extensas e ainda estavam presas a um sistema de escravidão ou servidão. Muito embora minoritários, seria incorreto não destacar, mesmo na antiguidade a presença de trabalhadores livres. De um modo geral, esses trabalhadores não possuíam domicílio fixo, eram aventureiros ou desterrados e se contentavam com uma residência temporária e algum trabalho.

Em seu *Passagens da Antiguidade ao Feudalismo*, Perry Anderson traçou uma cronologia desse modo de produção na Europa ocidental: *O feudalismo na Europa ocidental, então, surgiu no século X, expandiu-se durante o século XI e atingiu o auge no final do século XII e no século XIII... Pelo século XIII, o feudalismo europeu já havia produzido uma civilização unificada e desenvolvida, que registrava um enorme avanço em relação às comunidades rudimentares e fragmentadas da Idade Média* [5,6].

Ele encerra seu livro resumindo a crise e a *débâcle* geral do feudalismo: *O mundo medieval, assim, terminou em uma crise generalizada. Tanto os berços do feudalismo no ocidente como os territórios do oriente, onde ele havia se propagado ou onde não pudera se desenvolver foram cenário de profundos processos de dissolução e mutação socioeconômica no princípio do século XV. No limiar da época moderna, enquanto as trincheiras de Constantinopla caíam diante do canhão turco as conseqüências dessas mudanças para a ordem política da Europa ainda permaneciam grandemente ocultas. O desenlace final do sistema de Estado que havia de se originar delas ainda está por ser explorado* [7].

## **Da Manufatura à Expansão do Maquinismo**

Com o advento do capitalismo industrial, as formas de trabalho modificaram-se radicalmente. A produção artesanal na qual se baseava a manufatura vai aos poucos se transformando rumo a produção industrial em larga escala. Na Inglaterra, a manufatura foi a forma dominante da produção capitalista desde meados do século XVI até o final do século XVIII. A mudança mais significativa neste tipo de trabalho é que ele é decomposto e o seu produto, a mercadoria, não é mais obtida pela ação individual de um único trabalhador artesanal independente, mas o resultado da ação coletiva de uma unidade produtiva ou oficina de trabalhadores artesanais, cada um realizando uma operação parcial do todo. Com isto a divisão do trabalho é introduzida na produção. Outra característica importante da manufatura é a baixa utilização das máquinas, a não ser em processos mais simples, além do uso intensivo da força humana ou animal <sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Marx caracteriza a manufatura como uma forma de trabalho baseada na cooperação: "A cooperação fundada na divisão do trabalho adquire sua forma clássica na manufatura. Predomina como forma característica do processo de produção capitalista durante o período manufatureiro propriamente dito, que, grosso modo vai de meados do século XVI ao último terço do século XVIII". (Capital, Vol. I, Cap. XII, pg. 386 [10])



A divisão do trabalho introduzida pela manufatura não só especializa os trabalhadores, mas os confina em um ambiente único e cria assim uma organização social do trabalho que dá um novo impulso à produção em benefício do capital. A habilidade artesanal ainda continua sendo a base da produção e está fundada nas hierarquias criadas pelo sistema produtivo<sup>4</sup>. A deficiência apresentada por este sistema e que em breve seria rompido, é a ausência da maquinaria em larga escala. Sem ela o capital não tem como romper o apego tradicional dos trabalhadores as suas funções parciais, a produção continua a funcionar com uma estreita base técnica e sujeita as questões de disciplina e manutenção de uma regularidade no ritmo de trabalho, o que normalmente é resolvido com a utilização da força. Estava colocado, portanto, a necessidade do desenvolvimento das máquinas como forma de abolir as limitações do trabalho baseado na manufatura e ainda dependente da habilidade individual como princípio regulador da produção<sup>5</sup>.

É importante também ressaltar que é nessa época, no período da manufatura, que surge a ciência moderna, principalmente com Galileu Galilei (1564-1642) e René Descartes (1596-1650). Uma nova visão de mundo emerge com o mecanicismo em contraposição as idéias escolásticas. Aos poucos uma nova racionalidade vai se estabelecendo e se impondo criando as condições necessárias para o desenvolvimento da ciência. Em grande parte devido ao cartesianismo, mas não somente a ele, a idéia mecanicista de mundo popularizou-se e expandiu-se para além dos círculos científicos e contribuiu para uma reforma em larga escala da visão anterior de natureza<sup>6</sup>.

A expansão do maquinismo, que caracteriza a indústria moderna, passa a substituir o trabalho na forma anterior e dá origem a um processo totalmente objetivo, dependente não mais das qualificações e habilidades artesanais, mas sim da operação e velocidade das máquinas com continuidade e regularidade que

---

<sup>4</sup> Sobre como a manufatura se origina, Marx continua: “A manufatura, portanto, se origina e se forma, a partir do artesanato, de duas maneiras. De um lado, surge da combinação de ofícios independentes diversos que perdem sua independência e se tornam tão especializados que passam a constituir apenas operações parciais do processo de produção de uma única mercadoria. De outro, tem sua origem na cooperação de artífices de determinado ofício, decompondo o ofício em suas diferentes operações particulares, isolando-as e individualizando-as para tornar cada uma delas função exclusiva de um trabalhador especial. A manufatura, portanto, ora introduz a divisão do trabalho num processo de produção ou a aperfeiçoamento, ora combina ofícios anteriormente distintos. Qualquer que seja, entretanto, seu ponto de partida, seu resultado final é o mesmo: um mecanismo de produção cujos órgãos são seres humanos”. (Capital, Vol. I, Cap. XII, pg. 388 [10])

<sup>5</sup> Sobre as limitações deste tipo de trabalho Marx afirma: “É justamente por continuar sendo a habilidade profissional do artesão o fundamento do processo de produção, que o trabalhador é absorvido por uma função parcial e sua força de trabalho se transforma para sempre em órgão dessa função parcial. Finalmente, a divisão manufatureira do trabalho é uma espécie particular de cooperação, e muitas de suas vantagens decorrem não dessa forma particular, mas da natureza geral da cooperação”. (Capital, Vol. I, Cap. XII, pg. 389 [10])

<sup>6</sup> Sobre as relações entre ciência e período manufatureiro, ver [8,9].

dão características novas à produção <sup>7</sup>. Em comparação com o que acontecia na manufatura, a parcela do valor do produto que lhe é transmitida pela máquina com a produção mecanizada, representa uma proporção maior do valor total do produto, que é menor em termos absolutos. A produtividade introduzida pela máquina pode assim ser medida em termos da força de trabalho humana que ela substitui. Em geral a expansão da maquinaria para baratear o produto, exige que seja empregado na produção da máquina menos trabalho do que aquele que se torna dispensável pelo seu uso. Mas como os capitalistas pagam pela força de trabalho e não pelo trabalho, os limites para o uso capitalista da maquinaria são fixados pela diferença entre o valor da máquina e o valor da força de trabalho por ela substituída. É desnecessário dizer que a expansão do maquinismo na sociedade capitalista visa simplesmente aumentar a produtividade do trabalho, constituindo-se na mola propulsora da produção da mais-valia relativa <sup>8</sup>.

Para que o uso da máquina consiga aumentar a taxa de mais-valia é necessário que haja o barateamento das mercadorias, reduzindo com isso o valor da força de trabalho pela diminuição do número de trabalhadores empregados por um determinado montante de capital. Visto de outra forma, o capital variável deve ser transformado em capital constante. Nesta necessidade reside a essência e a dinâmica do capitalismo e no crescente desenvolvimento das máquinas <sup>9</sup>.

É dentro deste contexto mais geral que devemos analisar o desenvolvimento de uma teoria geral das máquinas por Lazare Carnot, na passagem do século XVIII para o XIX, bem como o amplo processo de desenvolvimento de uma mecânica industrial nas primeiras décadas do século XIX. Uma teoria das máquinas e seus estudos subseqüentes era o que faltava para que qualquer máquina pudesse ser estudada e conseqüentemente comparada a uma outra. Somente assim seria possível aumentar sua eficiência, otimizar seu funcionamento e passar a considerá-la como um fator de produção. É evidente que nem sempre as conexões entre os processos

---

<sup>7</sup> Marx analisa da seguinte maneira a introdução da maquinaria nesta nova fase do capitalismo: “Este emprego (da maquinaria), como qualquer outro desenvolvimento da força produtiva do trabalho, tem por fim baratear as mercadorias, encurtar a parte do dia de trabalho da qual precisa o trabalhador para si mesmo, para ampliar a outra parte que ele dá gratuitamente ao capitalista. A maquinaria é meio para produzir mais-valia”. (Capital, Vol. I, Cap. XIII, pg. 424 [10])

<sup>8</sup> Vejamos os conceitos de mais-valia absoluta e relativa em Marx: “A produção da mais-valia absoluta se realiza com o prolongamento da jornada de trabalho além do ponto em que o trabalhador produz apenas um equivalente ao valor de sua força de trabalho e com a apropriação pelo capital desse trabalho excedente. Ela constitui o fundamento do sistema capitalista e o ponto de partida da produção da mais-valia relativa. Esta pressupõe que a jornada de trabalho já esteja dividida em duas partes: trabalho necessário e trabalho excedente. Para prolongar o trabalho excedente, encurta-se o trabalho necessário com métodos que permitem produzir-se em menos tempo e equivalente ao salário. A produção de mais-valia absoluta gira exclusivamente em torno da duração da jornada de trabalho; a produção da mais-valia relativa revoluciona totalmente os processos técnicos de trabalho e as combinações sociais”. (Capital, Vol. II, Cap. XIV, pg. 585 [10])

<sup>9</sup> Sobre as definições de capital constante e variável ver o verbete “composição orgânica do capital”, na pg. 69 da referência [11].

gerais da sociedade e os métodos empregados em um determinado desenvolvimento científico são fáceis de serem estabelecidos ou até mesmo identificados. No entanto um dos objetivos da história da ciência é exatamente buscar entender estas correlações.

A teoria de Lazare Carnot é construída dentro do quadro conceitual da mecânica racional, plenamente desenvolvida nesta época, utilizando consistentemente o cálculo diferencial e integral, bem como as idéias do cálculo variacional muito em voga desde Leonhard Euler (1707-1783). O que há de mais específico e talvez mais pessoal no empreendimento de Carnot é a característica geométrica na forma de apresentação, ou melhor, de representação dos princípios de conservação da quantidade de movimento e quantidade de movimento angular em uma mecânica que privilegia o estudo dos choques e variações bruscas de movimento. Isto de uma certa forma caminhava no sentido contrário ao projeto de Lagrange concretizado em sua *Mecânica Analítica*. Além disso, há na teoria de Carnot uma sistemática utilização do conceito de trabalho, o que também era comum na época, mas somente como uma maneira de medir a capacidade de uma determinada máquina. A novidade é o uso dessas idéias com um ferramental matemático novo, recém construído. Quanto à característica geométrica que perpassa praticamente toda sua obra científica, deve ser observado que apesar do amplo progresso no sentido da utilização do cálculo diferencial e integral, a geometria ainda desfrutava de invejável prestígio e todos os grandes matemáticos gostavam de serem chamados de geômetras. Essas características, revalorização da geometria e utilização do cálculo diferencial e integral fazem de Lazare Carnot uma figura de transição para uma mecânica totalmente analítica, sem figuras como era o sonho de Louis de Lagrange (1736-1813).

### **O Efeito do Maquinismo sobre o Trabalho: a fadiga**

A fadiga, se olhada do ponto de vista do indivíduo isolado na produção, concentra em todas as suas manifestações, a maior parte dos problemas humanos causados pelo maquinismo industrial. Para preservar o equilíbrio físico e mental do indivíduo é necessário conhecer em cada trabalho particular uma série de informações de natureza biológica e psicológica, principalmente os limites que o organismo pode suportar e as causas que podem ameaçar este equilíbrio <sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Embora antigo um dos estudos mais interessantes sobre os problemas causados pelo maquinismo sobre os seres humanos encontra-se em [12].

Com a Revolução Industrial, que tem como uma de suas características a aplicação da ciência à produção, não foi levado em conta em suas fases iniciais que o trabalho submetido a novas condições técnicas estava longe de se beneficiar deste processo. De um período que costumamos chamar de primeira Revolução Industrial, onde ainda existia muito dos antigos ofícios e também preservava uma unidade no processo de trabalho, passou-se a uma situação inteiramente nova. As novas formas de divisão do trabalho, sua parcelização em múltiplas operações, a automação, a produção em série, submetem o trabalhador a novas condições com diferentes repercussões sobre seu estado físico e psíquico do período anterior. Como contrapartida um novo quadro de influências sobre a fadiga, o repouso, o interesse pelo trabalho, a aprendizagem, a qualificação, a habilidade, etc, necessitam de uma nova abordagem.

Na virada do século XIX para o século XX assiste-se a uma verdadeira eclosão das ciências industriais do trabalho. A fisiologia, a psicologia, a sociologia do trabalho, a ergonomia e a ciência da organização aparecem guardando uma estreita relação. É neste contexto que surge Frederik Winslow Taylor <sup>11</sup> (1856-1915), o inventor da *administração científica* com a pretensão de ser a ciência símbolo da modernidade industrial. Independente dos méritos e debilidades que a teoria de Taylor possa ter, o fato importante é a emergência no final do século XIX de uma *ciência do trabalho* e que se explica em boa parte pelas transformações econômicas e sociais do período, profundamente marcado pela extensão do trabalho assalariado e o surgimento do que se convencionou chamar de *empresa industrial moderna* [2].

Nosso interesse particular em abordar a questão da fadiga como um dos efeitos mais emblemáticos do maquinismo sobre o trabalho humano, é simplesmente para fazer um retorno ao estudo pioneiro de Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) sobre a fadiga, pois é dentro deste quadro de motivações e utilizando o ferramental da mecânica que ele elabora o conceito de trabalho útil, dando origem ao conceito de rendimento mecânico como a razão entre o trabalho útil e o trabalho total. Isto foi feito em sua *Memoire sur la force des hommes*, publicada em 1778. Esses conceitos estão na base do processo de incorporação do trabalho ao pensamento econômico e será o fio condutor de um processo mais amplo conduzido entre outros por Navier, Coriolis e Poncelet, como será visto em detalhes no capítulo 7 [1].

Historicamente, Coulomb ao atacar o problema da fadiga como um problema mecânico, retoma uma velha questão que era a de medir a capacidade muscular de um homem em uma jornada de trabalho. Sua preocupação fundamental não era medir

---

<sup>11</sup> Os estudos mais importantes de Taylor são: - A Piece Rate System (1895); - Shop Management (1902).

recordes em termos de possibilidades humanas, mas de quantificar capacidades usuais, ordinárias de um homem médio em sua jornada diária. Em outras palavras, tratava-se de medir a *real jornada de trabalho*, como será concebido um século mais tarde por Frederik Taylor.

Coulomb considerava que era necessário distinguir no trabalho dos homens e animais dois fatores: o efeito que ele pode obter usando sua força muscular para movimentar uma máquina e a fadiga que lhe acompanha ao produzir este efeito. Ele se propõe então a maximizar a razão entre o efeito e a fadiga, ou seja, o rendimento, caracterizando inequivocamente sua preocupação econômica.

Ele constrói um modelo teórico para fazer esta análise e usa como exemplo para aplicar seu modelo o movimento de um homem deslocando um peso na vertical. Neste problema o efeito útil é muito fácil de ser identificado pelo produto do peso pela altura a qual ele vai ser elevado. Para o cálculo do trabalho total basta adicionar seu peso próprio. Vejamos como ele equaciona o problema. Chamando:

$P$  = peso a ser elevado

$Q$  = peso próprio do homem

$h$  = altura a ser elevado

$(P+Q)h$  = quantidade de ação

$PH$  = efeito útil

Através de uma análise detalhada que evitaremos discutir aqui por fugir do nosso objetivo central, Coulomb considera que a quantidade de ação diária pode ser expressa, levando-se em conta a fadiga, por uma função do tipo  $(a - bP)$ , onde o parâmetro  $a$  seria a quantidade máxima de ação diária e  $b$  um parâmetro que exprime o efeito negativo da carga (peso). Obviamente ele usa a função mais simples de todas que é a linha reta. Ele faz então o seguinte equacionamento:  $(a - bP) = (P+Q)h$  ou  $Ph = (a - bP)P/(P+Q)$ ; que é a função que se obtém isolando-se o efeito útil em função dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e da carga  $P$ . Ele chega então a uma função que pode ser maximizada pelas regras de uma derivação simples. Evitaremos discutir os valores numéricos que ele atribui aos parâmetros  $a$  e  $b$ , bem como sua análise dos resultados. O que deve ser enfatizado mais uma vez é que os conceitos de trabalho útil, trabalho total e rendimento têm origem em uma preocupação econômica, mas são estabelecidos como uma analogia mecânica e depois retornam ao pensamento econômico, como será mostrado no penúltimo capítulo. Deve ser observado que Coulomb ainda não utiliza o termo trabalho no sentido físico e sim quantidade de ação.

## Trabalho Concreto e Trabalho Abstrato

A mercadoria, produto que é trocado no mercado capitalista, aparece como uma unidade de dois aspectos diferentes: sua utilidade para o usuário, sendo o que lhe permite ser objeto de troca e lhe confere o poder de obter certas quantidades de outras mercadorias nessa troca. Ao primeiro aspecto denomina-se valor de uso e ao segundo valor de troca <sup>12</sup>.

Embora o valor de uso seja uma condição necessária para que o produto seja trocado e realize o valor de troca, esse valor de uso não tem qualquer relação quantitativa com seu valor de troca, operação que depende das condições de produção da mercadoria. Dessa forma, o objeto maior da economia política tem sido as leis que governam a produção e o movimento do valor de troca, ou, o que é o mesmo, as leis que governam o valor, a propriedade inerente às mercadorias e que surge como valor de troca. É devido a isto que a grande maioria dos estudos sobre o trabalho tem como objetivo o valor de troca. Em termos marxistas isto tem se traduzido pelo trabalho abstrato <sup>13</sup>.

De um ponto de vista mais geral, mesmo dentro da análise marxista, existe uma série de questões importantes a serem esclarecidas e que se referem à outra face da mercadoria, e estão relacionadas com o trabalho concreto, como uma espécie de suporte ou substrato material do valor de troca.

Isto fica claro quando lemos o livro de Roman Rosdlosky (1898-1967), recentemente lançado pela primeira vez em português e intitulado: *Gênese e Estrutura de O Capital de Karl Marx* [13]. Nele encontramos um capítulo inteiro dedicado ao valor de uso e sugestivamente denominado: *Karl Marx e o problema do valor de uso na economia política*. O autor trata de desfazer um conjunto de equívocos de importantes autores marxistas sobre o problema que estamos focalizando, incluindo nomes como Rudolf Hilferding (1877-1941) e Paul Sweezy. Rosdlosky afirma: *Antes de passar à exposição do conteúdo dos Grundrisse, queremos considerar um problema metodológico que até hoje a literatura marxista tratou de forma negligente, e para cuja solução o conhecimento dos Grundrisse*

---

<sup>12</sup> Marx logo no início do “Capital” define mercadoria como: “A mercadoria é, antes de mais nada, um objeto externo, uma coisa que, por suas propriedades, satisfaz necessidades humanas, seja qual for a natureza, a origem delas, provenham do estômago ou da fantasia”. (Capital, Vol. I, Cap. I, pg. 41 [10])

<sup>13</sup> Marx define trabalho abstrato da seguinte forma: “Pondo de lado seu valor de uso, abstraímos, também, das formas e elementos materiais que fazem dele um valor de uso. Ele não é mais mesa, casa, fio ou qualquer outra coisa útil. Sumiram todas as suas qualidades materiais. Também não é mais o produto do trabalho do marceneiro, do pedreiro, do fiandeiro, ou de qualquer outra forma de trabalho produtivo. Ao desaparecer o caráter útil dos produtos do trabalho, também desaparece o caráter útil dos trabalhos nele corporificados, desvanecendo-se, portanto, as diferentes formas de trabalho concreto, elas não mais se distinguem uma das outras, mas reduzem-se todas a uma única espécie de trabalho, o trabalho humano abstrato.” (Capital, Vol. I, Cap. I, pg. 45 [10])

*contribui de forma decisiva. Refiro-me ao papel do valor de uso na economia de Marx*<sup>14</sup>.

Rosdolsky utiliza, e aqui vamos reproduzir uma citação do *Capital* de Marx (1818-1883) que julgamos pertinente e esclarecedora do assunto: *Na medida em que o processo de trabalho envolve homem e natureza, seus elementos simples são comuns a todas as formas sociais de desenvolvimento. Mas, cada forma histórica desse processo, no que tem de específico, desenvolve suas próprias bases materiais e formas sociais. E continuando a citação: As leis da natureza não podem ser revogadas. Nas diferentes circunstâncias históricas, o que pode modificar é a forma sob a qual essas leis se impõem.*

Nesta investigação, pretendemos preservar esta unidade homem-natureza, estudando as formas específicas nas quais as leis da natureza, em particular as da física foram sendo utilizadas para caracterizar a conformação do valor de uso, no quadro social da Revolução Industrial que se desenvolvia na Europa. Para tanto é necessário articular de forma bem dosada e equilibrada as questões que estão no campo das ciências físicas com aquelas de natureza mais social, econômica e política. O entrelaçamento desses diversos campos de conhecimento fica claro em nosso estudo mesmo ao tentar restringir a análise do conceito de trabalho a sua forma elementar puramente física, pois é exatamente ele o processo transformador do valor de uso. Na realidade trata-se de um único processo no qual o valor a ser atribuído à mercadoria é dado pelo seu valor de troca. Ao estendermos nossa análise ao conceito de trabalho como ele é utilizado nas máquinas, ou seja, como princípio da conservação das forças vivas, ele amplia o seu alcance pelo simples fato de uma máquina ser um artefato social.

Um exemplo interessante deste tipo de articulação entre ciências naturais e ciências sociais pode ser encontrado no livro de Enrique Leff: *Epistemologia Ambiental* [15]. Nele o autor empreende uma análise dos conceitos da biologia relacionando-os com as questões ecológicas. Ele afirma: *Na ciência da história, a natureza aparece como os objetos de trabalho e os potenciais da natureza que se integram ao processo global de produção capitalista e, em geral, os processos produtivos de toda transformação social, como um efeito do processo reprodução/trans transformação social. E continua: A absorção da natureza no processo capitalista de produção, enquanto, como objetos do trabalho, de recursos e fenômenos naturais ou de produtividade*

---

<sup>14</sup> “A forma natural da mercadoria, o que Marx denomina de seu valor de uso, não intervem diretamente na análise do processo de formação do valor, “ela não seve senão como substrato material, de porta-valor de troca”. Aqui, em compensação, onde trata-se da dimensão filosófica de Marx, o processo de produção deve ser considerado antes de tudo em sua significação histórica como processo de trabalho produtor de valor de uso”. [13]

*ecológica, a natureza incorpora-se tecnologicamente ao processo produtivo. Finalizando Leff conclui: Como não existe uma ciência geral da história, nenhuma noção geral pode servir como conceito científico da articulação entre natureza e sociedade. O processo de trabalho, a transformação do objeto de trabalho em valor de uso, é a condição geral de todo modo de produção, mas, em sua generalidade, as noções de trabalho ou de valor de uso não podem explicar as determinações específicas dos processos de trabalho de um modo de produção, nem suas conseqüências na transformação da natureza.*

A citação acima reforça nossa argumentação sobre a importância do valor de uso como afirmara Rosdolsky, das insuficiências das análises que têm negligenciado o seu papel central no modo de produção capitalista, embora ele por si só não possa explicar as formas específicas como se desenvolvem os processos de trabalho nem suas conseqüências. É neste sentido que nossa investigação pretende contribuir, analisando as formas específicas como os princípios da mecânica foram sendo utilizados para o desenvolvimento dos estudos sobre as máquinas visando sua aplicação aos processos produtivos. É inegável, que ao realizar este intento, também estaremos contribuindo mesmo que modestamente para reequilibrar a outra face da mercadoria, a do valor de uso, e desta forma evitar uma possível dualidade valor de uso/valor de troca. Na realidade esta dualidade não existe em Marx. Ele simplesmente separa os dois conceitos para melhor estudá-los sem cair em nenhum dualismo.

Para completar essas considerações acerca da mercadoria, vejamos como o trabalho abstrato é utilizado como norma de valor. Isaak Rubin, em sua *Teoria Marxista do Valor* [16] afirma: *Para compreender com exatidão a teoria de Marx sobre o trabalho abstrato, não podemos nos esquecer por um minuto de que Marx põe o conceito de trabalho abstrato em nexos inseparáveis com o conceito de valor. O trabalho abstrato “cria” valor, é o “conteúdo” ou “substância” do valor. A tarefa de Marx não era (como temos observado com freqüência) reduzir o valor, analiticamente, a trabalho abstrato, mas deduzir o valor dialeticamente a partir do trabalho abstrato. E isto não é possível se o trabalho abstrato for compreendido como nada mais que trabalho no sentido fisiológico. E Rubin prossegue: O trabalho fisiológico é o pressuposto do trabalho abstrato, no sentido de que não se pode falar em trabalho abstrato se não existir dispêndio de energia fisiológica por parte das pessoas. Mas este dispêndio de energia fisiológica permanece exatamente como pressuposto, e não como objeto de nossa análise.*

É importante ressaltar, e já afirmamos anteriormente, que os dois tipos de trabalho, abstrato e concreto somente comportam uma separação para efeito de estudo, mas fazem parte de uma mesma atividade, ou se quisermos de uma mesma



realidade. O trabalho concreto como pressuposto e o trabalho abstrato como um conceito histórico e que diz respeito a uma determinada fase do desenvolvimento capitalista, a da produção de mercadorias. Em outras palavras, a forma atual de se atribuir valor a uma dada mercadoria é derivada de uma forma específica de relação social. Caso o capitalismo seja superado por uma forma diferente de produção, socialista ou não, esta situação pode mudar. Sua denominação de abstrato tem a finalidade de ressaltar que este tipo de atividade está abstraindo seus aspectos materiais e físicos e que retira sua concretude do fato de ser uma relação social historicamente determinada.

## **Trabalho e Valor**

Quando analisarmos, no Capítulo VII, o processo e a passagem do conceito físico de trabalho à economia, iremos observar que no contexto das máquinas as tentativas de utilizá-lo como uma medida de valor, apresenta muitas semelhanças com a teoria do valor-trabalho de Marx, a qual nos referimos nos parágrafos anteriores. Em primeiro lugar o objetivo fundamental tanto das teorias de Navier e Coriolis como a de Marx é encontrar uma medida comum do valor do produto, bem como daquilo que for gasto por uma máquina, de forma que se possa expressar e comparar sua eficiência produtiva com outras máquinas. Em matéria econômica, a questão central da teoria de Marx é a mesma insuficiência da teoria da troca como ela é apresentada pela economia clássica <sup>15</sup>. A troca repousa sobre um princípio de equivalência. Como explicar então que em uma série de trocas surge uma mais-valia sem a qual é impossível compreender o crescimento econômico e a acumulação de capital ?

Tanto na teoria de Navier e de Coriolis como na de Marx do trabalho abstrato, em um segundo momento, após se estabelecer uma norma de valor, estas teorias também buscam servir como medida dos custos e dispêndios da produção. Para Marx a despesa produtiva compreende duas frações: de uma parte as mercadorias já avaliadas em termos de trabalho e que engloba os meios de produção, máquinas, matérias primas, etc, e que ele chama de trabalho morto e então o valor é

---

<sup>15</sup> Sobre a insuficiência da economia clássica em analisar o problema do valor, Marx afirma: “A economia política analisou, de fato, embora de maneira incompleta, o valor e sua magnitude, e descobriu o conteúdo que ocultava. Mas nunca se perguntou porque ocultava esse conteúdo, por que o trabalho é representado pelo valor do produto de trabalho e a duração do tempo de trabalho pela magnitude desse valor”. (Capital, Vol. I, Cap. I, pg. 89 e 90. [10] )

Na nota número 33 do tradutor podemos ler: “Uma das falhas principais da economia política clássica é não ter conseguido devesar – partindo da análise da mercadoria e, particularmente, do valor da mercadoria, - a forma do valor, a qual o torna valor-de-troca. Seus mais categorizados representantes como Adam Smith e Ricardo, tratam com absoluta indiferença a forma do valor ou consideram-na mesma alheia à natureza da mercadoria...”

simplesmente reincorporado ao valor do novo produto. Da outra, existe uma mercadoria muito particular que é a força de trabalho.

Assim, é possível usar o trabalho abstrato para medir o valor do produto como os gastos da produção que é o valor da força de trabalho. Dessas duas medidas resulta a ênfase em um sobre-valor, ele mesmo mensurável em termos de valor-trabalho: a mais-valia e de uma taxa exprimindo a eficiência econômica do processo, que é o lucro do capitalista. Esta taxa é definida como a relação entre o sobre-valor e o dispêndio.

É visível a analogia da construção de Marx com a dos engenheiros politécnicos, especialmente Navier e Coriolis. O trabalho serve em ambas as teorias para medir o produto e seu custo de produção, o que permite colocar em termos de valor, uma relação numerador e denominador nas mesmas dimensões. Na teoria de Marx a taxa de mais-valia e na de Navier e Coriolis o rendimento como a razão entre trabalho útil/trabalho total. Apesar das semelhanças uma diferença fundamental aparece nitidamente entre as duas construções teóricas <sup>16</sup>.

O modelo mecânico expressa um valor e uma perda. O valor do produto se expressa em trabalho útil que é inferior ao da despesa que é o trabalho total e o rendimento mecânico é então inferior a um. Na teoria de Marx ao contrário aparece um valor, ou melhor, um sobre-valor, supondo que o valor do produto pode ser superior ao da despesa. A força de trabalho podendo produzir mais trabalho do que ela custa. Esta é uma peculiaridade desta mercadoria especial que é a força de trabalho, a única que pode criar valor. Reside neste aspecto a diferença fundamental entre a teoria de Marx e a dos engenheiros politécnicos, pois as leis da termodinâmica garantem a inexistência de máquinas com rendimento maior ou igual a um. Com isto também fica impossível atribuir-se a Marx uma concepção energeticista que considerasse o valor do trabalho humano semelhante ao de uma máquina. Se tal acontecesse teríamos uma mais-valia negativa, uma perda ao invés de um sobre-valor. Engels (1820-1895) alertou para este perigo ao ler o artigo de um naturalista ucraniano chamado Sergei Podolinski (1850-1891) e que pensava poder criar uma teoria social baseada em Marx, fundada sobre uma concepção energeticista do valor.

---

<sup>16</sup> Sobre a analogia entre as teorias de Navier e Coriolis e a de Marx, Vatin [1] assim se expressa: "A analogia com a construção dos mecanicistas é indiscutivelmente muito forte. O trabalho serve bem no dois casos para medir o produto e o dispêndio, o que permite que se coloque em valor uma relação, onde numerador e denominador são de mesma dimensão (calculados pela mesma medida) : taxa de mais-valia para Marx, rendimento (trabalho útil sobre trabalho total) para os mecanicistas. Mas ao mesmo tempo a diferença essencial entre as duas construções aparece igualmente nitidamente. Os mecanicistas colocam um valor e uma perda; o valor do produto (trabalho útil) é forçosamente inferior ao do dispêndio e o rendimento é então por hipótese inferior a um. Marx ao contrário coloca em valor um sobre-valor supondo que o valor do produto seja superior ao do dispêndio; a força de trabalho podendo produzir mais trabalho que ela mesmo não custa".

É importante ressaltar que no final do século XIX, desenvolveu-se toda uma concepção teórica e até uma visão de natureza baseada na grande conquista científica que foi a descoberta da lei da conservação da energia, em 1847. A busca de um saber unificado fez com que certos paradigmas das ciências da natureza influenciassem as ciências sociais. É também inegável que o próprio conceito de energia convida a uma interpretação econômica, pois se assemelha a uma moeda de conversão nos diversos campos da física.

Ao lado deste aspecto contábil e de servir como uma *moeda mecânica*, o conceito de energia se relaciona com o homem tanto no papel de produtor ao movimentar forças, como na qualidade de consumidor, dependendo como as outras espécies biológicas de um aporte de energia. Assim seria até natural pensar que a energia pudesse fornecer uma medida comum a todos os bens, mercantis ou não, fundada sobre as condições de sua produção e sobre sua utilidade para o ser humano. Esta não é, todavia a visão de Marx, muito menos sua concepção de valor criado através do trabalho na produção de mercadorias.

## **Ciências da Natureza e Ciências Humanas**

Uma ontologia de Marx com relação ao estudo da natureza está profundamente marcada por um sentido humano, de vez que ele parte do princípio que o homem não conhece a natureza em si de forma pura, mas como algo integrado em seu mundo, no qual a prática tem um caráter permanentemente transformador através do trabalho. Disto resulta que o conhecimento que o homem tem da natureza é um conhecimento antropológico<sup>17 18</sup> [17,18].

Uma conseqüência lógica de seu pensamento é que ele considere ainda que as ciências da natureza são ciências humanas, e é neste sentido que ele diz que o homem é o objeto imediato das ciências naturais enquanto que a natureza é o objeto

---

<sup>17</sup> Esta visão antropológica que Max tem da natureza pode ser encontrada e discutida em detalhes em Adolfo Sanchez Vásquez [16] onde podemos ler na pg. 143: “O problema sujeito-objeto é formulado nos “Manuscritos” ao serem estudadas as relações entre o homem e a natureza. Nas “Teses sobre Feuerbach”, ele é abordado propriamente como problema das relações sujeito-objeto. Num e noutro plano, Marx chega a mesma conclusão: o segundo termo da relação – natureza, nos “Manuscritos”; objeto, nas “Teses sobre Feuerbach” – não existe para o homem à margem de sua atividade prática e, portanto, tem para ele um caráter antropológico. Essa antropologização da natureza e do objeto – caráter que recebem com e pela prática – determina, por seu lado, a caracterização antropológica do conhecimento, isto é, da relação cognoscitiva sujeito-objeto”.

<sup>18</sup> Logo na introdução de seu livro [14], Alfred Schmidt assim se refere à visão de Marx sobre a natureza: “Este trabalho quer ser uma contribuição a interpretação filosófica de Marx. Ele se interessa por um conceito que parece não ter, no pensamento de Marx, senão uma importância marginal, o conceito de natureza. Em seus escritos, Marx fala muito raramente da natureza “em si”. Isto não é porque se trate de um critério de pouca importância da natureza em sua teoria da sociedade, mas o resultado do ponto de vista particular que ele adota”.

imediatamente do homem. Se as ciências da natureza são ciências do homem, estas por sua vez são ciências naturais. Assim, para Marx, existe uma unidade inseparável entre esses dois campos do conhecimento. Nem a natureza é separável do homem nem as ciências naturais podem ser separadas das ciências do homem. Marx prevê ainda e imagina que os dois campos tenderão a se fundir no futuro devido a sua base antropológica comum.

Marx também argumenta que a divisão atual entre homem e natureza e que determina a divisão entre ciências naturais e ciências humanas, ocorre devido a uma relação alienada. No sentido que ele atribui a este termo, a alienação é o estado no qual o indivíduo, ou um grupo de indivíduos ou até uma instituição ou a própria sociedade se tornam alheios, estranhos aos resultados e aos produtos de seu trabalho. Essas são algumas das idéias que podemos encontrar freqüentemente nos textos de Marx sobre a relação homem-natureza e a elas nos referiremos ao longo deste texto.

Um exemplo da indissociabilidade entre as ciências da natureza e as questões de caráter social e política é a própria formação de um modelo científico-natural de objetividade ao longo da história. Historicamente ele foi se fazendo sempre acentuadamente marcado pelos pressupostos ideológicos e julgamentos de valor. Para que as ciências da natureza fossem adquirindo uma certa liberdade dos juízos de valor foi necessário um longo processo histórico. Durante o feudalismo, a fraqueza das classes dominantes nas relações político-militares dava um peso decisivo aos fatores ideológicos para que elas pudessem manter a ordem estabelecida. O arcabouço ideológico de então compreendia um complexo de dogmas e explicações coerentes com a ordem fixista e imutável do universo. Dessa forma fica fácil de entender porque qualquer questionamento a esse sistema era uma ameaça subversiva e conseqüentemente tratada com violência e rigor repressivo. As primeiras manifestações de questionamento através das ciências da natureza foram reprimidas com a mesma violência com que eram tratadas as heresias religiosas. É neste quadro que devemos entender os processos e as condenações de Giordano Bruno (1548-1600) e Galileu. Um confronto político-ideológico se dava no campo do conhecimento das ciências da natureza.

Com o advento e o desenvolvimento do modo de produção capitalista, as ciências naturais tendem a uma espécie de *desideologização*. Isto acontece exatamente porque o capital em geral e a grande indústria têm necessidade do conhecimento científico e dessa forma o conflito e a disputa ideológica se deslocam para o terreno econômico-social e, portanto político aonde vai se dar a apropriação do produto gerado pelo trabalho. Logo que o capitalismo se estabelece nas principais

ciências da natureza podem emancipar-se e desfazer-se das ideologias de base religiosa anteriores. É precisamente neste período que podem entrar em cena os filósofos iluministas e direcionar seus ataques contra o obscurantismo clerical, o feudalismo religioso, o princípio da autoridade, o dogmatismo escolástico, isto sendo um passo fundamental para que se formasse um modelo científico-natural de objetividade.

Mais tarde com o amadurecimento deste modelo, começa a se formar um ideal epistemológico baseado em uma ciência livre de ideologias, julgamentos de valor e pressupostos políticos, uma espécie de ciência *neutra*. Este ideal levado às últimas conseqüências resultou no modelo positivista de ciência <sup>19</sup> [19,20].

A questão ideológica persiste, evidentemente, nas ciências da natureza, mas de outra forma. A seleção de seu objeto para a pesquisa, as aplicações técnicas de suas descobertas dependem em grande medida de interesses de classe ou de grupos sociais que a financiam, controlam e orientam seu desenvolvimento. Isso sem falar na ideologia dos pesquisadores e homens de ciência.

Mesmo no modelo atual de cientificidade, onde os campos de conhecimento estão separados, se compararmos as ciências naturais com as ciências humanas, veremos que não existe entre elas uma diferença absoluta. Além disso, existem áreas intermediárias e de transição entre os dois campos. É o caso da ecologia, certos domínios da biologia, a psicologia comparada, etc., que podem muito bem ser vistos como campos de conhecimento das ciências naturais onde os conhecimentos das ciências humanas também são requeridos.

No campo das ciências humanas e sociais, ao contrário do que pensava Augusto Comte e os positivistas, é impossível separar o conhecimento dos julgamentos de valor. Michael Löwy usa até uma metáfora física para caracterizar este problema. Segundo ele quanto mais uma ciência natural se aproxime da fronteira com as ciências humanas ela vai se tornando cada vez mais *aquecida* ideologicamente e vai se carregando de *eletricidade ideológica* <sup>20</sup>.

Apesar dessa impossibilidade epistemológica, o positivismo continua a basear sua análise no modelo de objetividade que nega haver diferença substancial entre as ciências naturais e humanas. Segundo os positivistas as leis que regem o

---

<sup>19</sup> Ver Michael Löwy em "As Aventuras de Karl Marx contra o Barão de Munchausen" [19] e em "Método Dialético e Teoria Política" [20].

<sup>20</sup> Para uma visão bastante crítica do positivismo ver Marcuse em "Razão e Revolução" [21]. Ver ainda [22] e [23].

desenvolvimento social são semelhantes às leis da natureza e, portanto, as ciências sociais se dissolvem no meio natural <sup>21</sup>.

Em linhas gerais algumas diferenças metodológicas existem entre as ciências naturais e humanas e as principais são as seguintes:

- a) O caráter histórico dos fenômenos sociais e culturais, e a possibilidade de os mesmos serem transformados pela ação dos homens, o que não se dá com as leis da natureza onde a ação humana tem como objetivo conhecê-las para melhor utilizá-las.
- b) Uma certa identidade, as vezes parcial e freqüentemente até uma fusão entre sujeito e objeto nas ciências sociais.
- c) As classes sociais interpretam o passado e o presente, os conflitos sociais e políticos em função de suas vivências e experiências sociais, seus interesses, aspirações, o que torna as ciências históricas inseparáveis dos julgamentos de valor.
- d) O conhecimento ou reconhecimento da verdade pode ter profundas conseqüências sobre o comportamento das classes sociais e conseqüentemente sobre a correlação de forças nos conflitos sociais e políticos. Revelar ou ocultar a verdade é uma arma política no contexto da luta de classes. É neste quadro que Antonio Gramsci (1891-1937) afirmava que *a verdade é sempre revolucionária*.

As razões acima enumeradas fazem com que o método das ciências sociais seja diferente do das ciências naturais. Isto torna o problema ou o modelo de objetividade nos dois campos do conhecimento completamente diferentes. Conforme será enfatizado e discutido no Capítulo 1, a questão da ideologia continua a ser o problema central a fazer a diferença entre os dois campos científicos.

---

<sup>21</sup> Na pg. 12 da referência [20] podemos ler a seguinte citação de Augusto Comte: "Eu entendo por física social a ciência que tem por objeto próprio o estudo dos fenômenos sociais, considerados dentro do mesmo espírito que o dos fenômenos astronômicos, físicos, químicos e fisiológicos, quer dizer sujeitos a leis naturais invariáveis, cuja descoberta é a finalidade especial dessas pesquisas".

## **Extensão e Limites desta Investigação**

Como acontece em toda pesquisa científica, é fundamental que se tenha, desde o seu início e sempre que possível, uma clara visão do alcance e das limitações do empreendimento a ser realizado. Nesta investigação isto foi feito em grande medida estabelecendo-se alguns objetivos a serem atingidos tendo em vista os meios e o tempo que estavam a nossa disposição para sua consecução.

Sendo nosso objetivo central analisar a história de um conceito de grande importância tanto para a física quanto para a economia, optamos por sua abordagem como um conceito saído da física e que com o advento da economia clássica é que vai se produzir seu entrelaçamento com o pensamento econômico. Isto porque existe uma grande lacuna nesta forma de abordagem. A imensa maioria dos estudos sobre o trabalho tem a preocupação maior de entendê-lo como atividade econômica relacionada ao problema de como atribuir valor a uma dada mercadoria e suas implicações também no campo da economia. Isto significa que uma vasta literatura também existe debruçando-se sobre as questões relativas ao trabalho, desde a antiguidade, mas com uma preocupação essencialmente econômica e são muito escassos os textos que se dedicam a ele no campo da história da ciência analisando-o como conceito físico. Para isto é necessário estudar sua gênese e suas metamorfoses embora sua forma de incorporação ao pensamento econômico seja muito mais uma exigência do que denominamos de *contexto das máquinas*. Esta linha investigativa privilegia a evolução do conceito físico de trabalho associado ao estudo do movimento e posteriormente ao estudo das máquinas. A parte final deste estudo passa, em grande medida, pela contribuição que os engenheiros politécnicos franceses deram a uma ciência das máquinas, embora em uma perspectiva mais ampla devêssemos levar em conta o contributo de outros empreendimentos até de natureza mais prática, como era o caso da Inglaterra. Uma outra forma de analisá-lo seria dentro do quadro conceitual, que leva aos princípios fundamentais da mecânica, estando diretamente relacionado ao problema do equilíbrio e que vai resultar no princípio das velocidades virtuais. De uma certa forma esta segunda linha de investigação, pelo menos parcialmente também foi contemplada em nosso texto quando estudamos aquele princípio, sua formalização e as principais investigações no sentido de sua consolidação.

Uma restrição importante e que foi por nós adotada desde o início como parte integrante do nosso objetivo maior descrito nos parágrafos anteriores foi fazer uma investigação abrangente do conceito físico de trabalho, mas que ela deveria ficar restrita ao campo da mecânica clássica. Isto por entendermos que o seu

desenvolvimento natural iria nos conduzir ao estudo da termodinâmica, se *o contexto das máquinas* viesse a ser explorado e aprofundado além do limite estabelecido. Assim, a história da termodinâmica ficou desde o início fora do campo investigado, embora muitas de suas interfaces com o desenvolvimento da mecânica clássica devam ser exploradas. A principal delas é justamente a quebra do paradigma newtoniano como consequência de sua insuficiência em explicar o processo de degradação de parte da energia envolvida na operação das máquinas. A ela dedicamos uma grande parcela de nosso esforço investigativo.

## **Sumário por Capítulo**

No Capítulo 1 apresentamos algumas idéias e concepções gerais que orientam todo o estudo. Tanto um breve resumo das concepções marxistas, como alguns elementos advindos da historiografia geral como da historiografia da ciência devem ser vistos, muito mais como fonte inspiradora, campo de reflexão e um quadro de referência, do que uma camisa de força ideológica ou algo dogmático a ser seguido a qualquer custo como se fosse possível enquadrar a realidade histórica em qualquer tipo de forma preestabelecida.

O Capítulo 2 tenta inicialmente descrever o processo de construção dos conceitos físicos tendo como base a matemática e sua adequação ao mundo físico, para em seguida apresentar um painel bastante amplo do desenvolvimento histórico e das concepções acerca dos conceitos físicos fundamentais que vão formar o conceito de trabalho.

O Capítulo 3 apresenta as idéias originárias e que estão na base da formação dos conceitos de trabalho e energia na mecânica. Em seguida uma ênfase especial é dada ao desenvolvimento dos três princípios fundamentais da mecânica: o princípio dos trabalhos virtuais, o princípio da mínima ação e o princípio da conservação da energia.

O Capítulo 4 mostra vários aspectos da contradição e do dilema enfrentado pela mecânica racional no final do século XVIII. Este dilema estava representado de um lado pelo grande acervo de conhecimentos práticos acumulado pela mecânica ao longo dos séculos, e do outro pelo apogeu por que passava a teoria mecânica com sua formalização por Lagrange em 1788. Apesar disso até essa época inexistia uma teoria geral para as máquinas saída da mecânica racional. O dilema começa a ser resolvido com os trabalhos de Lazare Carnot na virada do século XVIII para o XIX.



O Capítulo 5 tem como finalidade principal introduzir as idéias de Lazare Carnot sobre as máquinas, sua gênese, mostrando também como o conceito de trabalho é por ele utilizado desde os primeiros ensaios como elemento estruturante de sua teoria geral das máquinas. Uma biografia sucinta de Carnot é apresentada com ênfase em sua vida como político e homem de ciência da época da Revolução Francesa. Encerrando o capítulo os dois ensaios de Carnot, de 1779 e 1781 são apresentados e discutidos.

No Capítulo 6 a obra fundamental de Carnot dedicada a construção de uma teoria geral das máquinas é discutida em profundidade. *Os Princípios Fundamentais do Equilíbrio e do Movimento*, aparecem como o coroamento dos ensaios anteriormente citados e constituem o ponto de partida para os desenvolvimentos subseqüentes da mecânica aplicada pela geração seguinte de engenheiros politécnicos.

O Capítulo 7 é inteiramente dedicado às transformações sofridas pelo conceito de trabalho com vistas a sua adequação ao estudo das máquinas. A parte inicial do capítulo é dedicada à aplicação do princípio da conservação das forças vivas às máquinas. Em seguida o estudo de Coulomb dedicado ao atrito é discutido, pois ele é quem melhor representa o conceito de trabalho para vencer uma força passiva ao longo de um certo percurso. Depois Navier utilizando o conceito mecânico de trabalho tenta construir um modelo físico-econômico para medir os fatores da produção. Surge então o seu conceito de trabalho como moeda-mecânica O estudo que se segue é o coroamento do projeto de Carnot de criar uma teoria geral das máquinas. Trata-se do: *Sobre o Cálculo do Efeito das Máquinas*, de Coriolis. O último dos engenheiros politécnicos apresentado é Poncelet e o desenvolvimento de uma mecânica industrial. O conjunto dessas contribuições é responsável pelo processo de incorporação do conceito físico de trabalho ao pensamento econômico.

Encerrando nossa investigação vem o Capítulo 8, de conclusão. Nele fizemos um balanço geral do estudo enfatizando e complementando questões importantes e uma breve análise de três questões que guardam muita proximidade com o tema principal: o quadro político e cultural que a partir do século XV vai se desenhando por toda Europa no sentido da aceitação das artes práticas e mecânicas em pé de igualdade com a atividade intelectual; a questão da técnica, de sua caracterização e seu desenvolvimento histórico e, finalmente, os processos sociais que levaram à expansão do maquinismo e que trazem a marca do sistema de produção capitalista moderno. A análise resumida dessas três questões tem o objetivo de indicar caminhos para o seu aprofundamento.

## Capítulo 1: O Quadro de Referência Teórico-Histórico

*“A intenção original do materialismo histórico era oferecer fundamentação teórica para se interpretar o mundo a fim de mudá-lo. Isso não era apenas um slogan. Tinha um significado muito preciso. Queria dizer que o marxismo procurava um tipo especial de conhecimento, o único capaz de esclarecer os princípios do movimento histórico e, pelo menos implicitamente, os pontos nos quais a ação política poderia intervir com mais eficácia”.*

(Ellen Meiksins Wood - Democracia Contra Capitalismo - S. Paulo, Boitempo Editorial, 2003)

### 1.1 O MARXISMO

#### 1.1.1 Breve História [24]

Os fundadores do marxismo foram Karl Marx (1818-1883) e Friedrich Engels (1820-1895), que nasceram na década seguinte às guerras napoleônicas. Marx era filho de um advogado de Trier, e Engels, de um industrial de Barmen. Isso equivale dizer que ambos eram de origem renana. Foram criados em prósperas famílias de uma região das mais desenvolvidas da Alemanha.

Marx logo se sentiu atraído pelas sublevações do movimento operário europeu, que se sucederam à Revolução Industrial e, entre os vinte e os trinta anos, fez uma espécie de ajuste de contas com o legado filosófico de Hegel e Feuerbach. Engels, vivendo na Inglaterra, descobriu a realidade em que vivia a classe operária inglesa e foi, a essa época, um veemente crítico das doutrinas que a legitimavam.

Como resultado de sua participação política no movimento operário inglês, escreveram em parceria um documento programático, chamado de *Manifesto Comunista*, publicado em Londres em 1848. Isto se dá às vésperas de um amplo movimento político que se propagou em grande parte da Europa. Em decorrência da perseguição desencadeada pelo movimento contra-revolucionário vitorioso, eles exilaram-se em definitivo na Inglaterra. Nessa época, Marx realizou um balanço político da Revolução Francesa, substituída pelo Segundo Império e Engels debruçou-se sobre as causas do fracasso da Revolução Alemã, contemporânea da Francesa.

Marx, vivendo em condições extremamente precárias em Londres, toma para si a tarefa monumental de fazer uma análise global do modo de produção capitalista.

Após 15 anos de trabalho publica, em 1867, o primeiro volume de *O Capital*, pouco antes de fazer cinqüenta anos. Simultaneamente à elaboração de sua obra máxima, ele também participou da fundação da I Internacional, o que significava a primeira organização de trabalhadores estruturada internacionalmente e com alguma envergadura. Nessa época e em anos posteriores, consagrou enormes esforços ao trabalho prático de organização e direção do movimento socialista, agora organizado internacionalmente. Em 1871, celebrou a irrupção da Comuna de Paris, uma sublevação de artesãos e operários, que chegou a tomar o poder político em Paris por algumas semanas, servindo-lhe como fonte de inspiração, e em sua riqueza política para seu trabalho teórico sobre um futuro estado proletário.

Nos últimos anos de vida de Marx e após a sua morte, e antes de completar a publicação de *O Capital*, Engels começou a produzir as primeiras exposições sistemáticas sobre o materialismo histórico, popularizando a teoria criada por ambos em toda a Europa. Engels, por essa época na casa dos 70 anos, foi também o mentor intelectual da Segunda Internacional e viu sua teoria e de Marx tornar-se a doutrina oficial da maior parte dos partidos operários do continente europeu. Data dessa época a fundação dos partidos socialistas europeus e a Nova Internacional assume uma configuração política diferente do que foi a primeira, constituindo-se em uma espécie de federação daqueles partidos.

Algumas características sociais do trabalho de Marx e Engels devem ser ressaltadas, para que possamos compreendê-lo em maior profundidade e também tornar possível uma comparação com os desenvolvimentos futuros, próximos ou mais remotos. A primeira característica importante dessa intensa e extensa cooperação é que eles foram pioneiros e praticamente membros isolados de sua geração. Nenhum contemporâneo dessa dupla genial em qualquer país ou nacionalidade se envolveu ou mesmo compreendeu e partilhou completamente dessas concepções. A obra que ambos construíram foi fruto de um longo empreendimento e de uma colaboração intelectual que se estendeu por quatro décadas, aproximadamente.

Uma outra característica marcante e que é fundamental em sua obra, é que juntos, eles viveram as maiores privações, principalmente Marx. Sofreram o exílio, as perseguições, a fadiga e puseram à prova inúmeras vezes, a solidariedade e os laços de amizade que os uniam. Dessa forma, nem sempre eles participavam diretamente das lutas do movimento operário de seu tempo. Isto nos leva a concluir que sempre existiu uma articulação bastante complexa entre a teoria por eles desenvolvida e a prática política do movimento operário. Assim, os limites de seu trabalho teórico residem nos próprios limites do movimento operário de seu tempo. É importante também deixar claro que a influência do trabalho teórico de Marx, enquanto ele viveu,

foi sempre pequena e que a grande maioria dos seus estudos só seria publicada mais de meio século depois.

Ao morrer, Marx deixou como legado uma teoria econômica coerente, bastante desenvolvida, do modo de produção capitalista que podemos dizer começou com as obras da juventude como os *Manuscritos Econômicos e Filosóficos* e *Miséria da Filosofia*, passando pela *Contribuição à Crítica da Economia Política*, uma década antes da publicação do primeiro volume de *O Capital*. O mesmo não aconteceu se pensarmos em uma teoria política equivalente das estruturas do estado burguês, muito menos uma estratégia e táticas suficientemente desenvolvidas da luta pelo socialismo. A esse respeito, as teorias de Marx não poderiam jamais ultrapassar o ritmo histórico dado pelos movimentos sociais da época e que aos poucos, ia criando os próprios instrumentos políticos de sua libertação. Marx tinha plena consciência disto, e este é um forte argumento epistemológico contra os ataques que o materialismo histórico viria a sofrer na boca de seus detratores, como sendo uma forma de determinismo econômico. Marx e Engels se recusaram sistematicamente a fazer um tipo de análise de tipo determinística sobre o futuro da humanidade, muito menos arriscaram qualquer tipo de extrapolação histórica. Caso entendessem o materialismo histórico como uma teoria determinista da história, obviamente eles como fundadores, teriam sido os primeiros a explorar todas as *potencialidades* da teoria recém criada. Para ser mais preciso, Marx nunca apresentou nenhum estudo sistemático sobre o materialismo histórico. Essa tarefa coube a Engels no fim da década de setenta e oitenta do século XIX. Fazem parte desses trabalhos, entre outros, o *Anti-Duhring* e o *Ludwig Feuerbach e o fim da filosofia clássica alemã*.

A segunda geração que sucedeu a Marx e Engels, do ponto de vista teórico, é o grupo que vai dar continuidade ao marxismo e é bastante restrito. Na sua maioria, esse grupo chegava ao materialismo histórico em uma fase tardia do seu desenvolvimento pessoal. As quatro figuras mais importantes são Antônio Labriola, nascido em 1843, Franz Mehring, em 1846, Karl Kautsky, em 1854 e George Plekhanov, em 1856. Poderíamos ainda agregar a esse núcleo original, o nome de Eduard Bernstein (1850-1932) e que, muito embora no plano intelectual fosse uma figura menor, teve um papel político destacado como o primeiro grande revisionista do marxismo. Todos eles provinham de regiões menos desenvolvidas da Europa. Labriola era filho de um proprietário de terras da Campânia. Mehring era proveniente da Prússia. Kautsky vinha da Boêmia e Plekhanov da Rússia. Embora esse grupo tenha se sobressaído no cenário político, foi Plekhanov que teve uma atuação mais destacada como membro do comitê central do Partido Operário Social Democrata Russo, a matriz do futuro partido bolchevique.

Todos se corresponderam pessoalmente com Engels, que por sua vez, exerceu uma influência significativa sobre eles. Cada um a sua maneira tentou sistematizar o materialismo histórico, encarando-o como uma teoria global da sociedade e da natureza, de forma que pudesse fornecer ao movimento operário, uma visão coerente e consistente do mundo. Além disso, trabalharam incansavelmente no sentido de tentar substituir as disciplinas burguesas tidas como rivais do marxismo. Somente como exemplo, vejamos os títulos de algumas de suas obras. Franz Mehring escreveu *Sobre o Materialismo Histórico*, Antônio Labriola, *Ensaio sobre a Concepção Materialista da História*, Plekhanov, *O Desenvolvimento da Concepção Marxista da História*, e Kautsky, *A Concepção Materialista da História*.

De uma maneira geral, esses trabalhos tinham o propósito de complementar o esforço teórico de Marx. Devemos observar que Engels tinha publicado os volumes I e II de *O Capital*, além do que Kautsky editou *A Teoria da Mais-Valia* e Mehring se empenhou na publicação da *Correspondência de Marx e Engels*. Foi também Mehring que, no fim de sua vida, publicou o que talvez seja a mais importante biografia de Marx.

Para uma compreensão mais abrangente da produção intelectual dessa geração imediatamente pós-Marx e Engels é necessário situá-la em seu contexto histórico. A conjuntura do final do século XIX caracterizou-se por um crescimento econômico vertiginoso dos países mais industrializados, do fortalecimento e estabilização dos monopólios na economia, associada a uma enorme expansão imperialista. Portanto, a geração dos primeiros herdeiros de Marx e de Engels formou-se em um ambiente de relativa calma política e crescimento econômico, o que não iria se dar com a geração seguinte. Dessa maneira, é muito compreensível que certos setores da social democracia passassem a interpretar a realidade social e política de forma mais gradualista, pois era isto que estava se verificando na economia. Aparentemente, o capitalismo poderia se desenvolver ininterruptamente com a possibilidade quem sabe de até distribuir o produto desse desenvolvimento com os despossuídos. Arriscando uma perspectiva mais ousada, talvez o socialismo fosse a culminância desse processo. Evidentemente que essa análise é incompleta e outros fatores também pesaram no sentido de uma concepção gradualista da história. Por essa época, certas teorias científicas como o darwinismo adquiriu enorme notoriedade entre a intelectualidade européia, influenciando os setores mais predispostos a aceitar mudanças sem saltos nem rupturas. Não é por acaso que Eduard Bernstein propôs reformar o marxismo existente nessa época, negando a luta de classes e a ruptura revolucionária.

Para a terceira geração de marxistas, a segunda depois de Marx e Engels, estaria reservada uma conjuntura muito diversa da anterior. O capitalismo europeu caminhava celeremente para a Primeira Guerra Mundial e a própria geração seria bem mais numerosa e plasmada em outro ambiente político. Seus principais teóricos foram Lênin, filho de um funcionário público, nasceu em Simbirsky no Volga em 1870, Rosa Luxemburgo, filha de um comerciante e nascida na Polônia em 1870, Trotsky, filho de um fazendeiro da Ucrânia nasceu em 1879. Bukharin (1888-1938) e Preobrazhensky eram russos. Estes três últimos estiveram ao lado de Lênin, e desempenharam papéis bastante destacados como teóricos do partido bolchevique e personagens importantes da Revolução Russa.

O novo contexto histórico iria orientar os trabalhos teóricos dessa última geração em sentidos diferentes. Um deles era sobre a explicação teórica das mudanças que se operavam no modo de produção capitalista. *O Capital*, de Marx, que explicava esse modo não poderia ficar petrificado como uma bíblia, pronto para interpretar qualquer nova situação econômica. Era necessário desenvolvê-lo e atualizá-lo. Dessa forma, apareceu *A Questão Agrária*, de Kautsky, em 1899, tentando explicar as transformações agrícolas que ocorreram na Europa e na América. Surgiram ainda *O Desenvolvimento do Capitalismo na Rússia*, de Lênin e, finalmente, o primeiro trabalho que tenta dar continuidade a *O Capital*, ou seja, *O Capital Financeiro*, de Rudolf Hilferding, publicado em 1910. Este último foi um grande teórico da economia marxista e era proveniente da Áustria. Ensinou economia na escola de quadros do partido social democrático alemão e foi sucedido nesta função por Rosa Luxemburgo.

É muito importante observarmos que essa inversão na conjuntura do período da segunda geração depois de Marx e Engels significava precisamente o aprofundamento da crise capitalista no bojo da qual saíria a Revolução de Outubro. Com isso, o clima político era bem diverso daquele da geração anterior e isso traria outras conseqüências para a produção teórica.

Nesse contexto era perfeitamente aceitável que surgissem análises políticas prevendo e antecipando a Revolução na própria Rússia, o que do ponto de vista de Marx era uma tremenda heresia. Ele havia previsto a Revolução nos países capitalistas mais desenvolvidos, afirmando que um modo de produção, para ser substituído, teria que esgotar todas as suas possibilidades. O grande teórico dessa nova concepção era Trotsky, que bem antes de 1917 começou a desenvolver sua teoria da *Revolução Permanente*, a qual mais tarde daria amplo respaldo as possibilidades revolucionárias nos países atrasados. Lênin, ao entrar em 1917 na Rússia, apresentou seu novo ponto de vista em face da ruptura revolucionária em

suas famosas *Teses de Abril*, surpreendendo seus camaradas de partido, que o acusaram de trotsquismo.

A esse respeito, ficou muita conhecida a sua frase de que a cadeia imperialista poderia romper no elo mais fraco, ou seja, na Rússia. Essa dicotomia entre uma visão ortodoxa herdada de Marx e outra que apostava na possibilidade da Rússia antecipar seu processo revolucionário e sua ruptura com o capitalismo iria cindir em dois grandes blocos o movimento revolucionário russo. De um lado os mencheviques, situando-se em uma perspectiva de longo prazo para a superação do modo de produção capitalista. Do outro, os bolcheviques, vetores da transformação socialista ainda na Rússia atrasada, recém saída do feudalismo.

Para os propósitos de nossa investigação, essa breve história da produção intelectual marxista até a Revolução Russa é inteiramente suficiente. Ela fornece alguns elementos importantes para compreendermos o caráter histórico e político do trabalho intelectual. Evidentemente para o caso específico de um trabalho teórico que se preocupe não só com a interpretação da realidade, mas que fundamentalmente tenha um cunho transformador [25].

## **O Materialismo Histórico**

De uma maneira geral, o materialismo afirma que o mundo real é constituído e mantém uma relação de dependência com a matéria. Em outras palavras, a divisão que se dá no plano da filosofia entre materialistas e idealistas depende de como se coloca o primado entre o ser e o pensar. Por materialistas, entendemos aqueles que defendem a subordinação do pensar ao ser e idealistas, todos os que postulam uma subordinação inversa<sup>1 2</sup>. Evidentemente que, com a física moderna, o conceito de

---

<sup>1</sup> Para os fins aos quais nos propomos neste estudo não há necessidade de um aprofundamento no conceito da matéria do ponto de vista físico. Como sempre estaremos restritos ao campo da mecânica clássica, a matéria para todos os nossos propósitos se confunde com a massa sendo um dos conceitos fundamentais e a ela voltaremos no próximo capítulo.

<sup>2</sup> A questão da matéria do ponto de vista filosófico é bastante complexa. Lênin, em [28] observa que todos aqueles que discutem as questões relacionadas com a matéria recaem sempre no velho dilema entre o ser e o pensar e afirma: "O leitor vê que todos estes argumentos dos fundadores do empiriocriticismo gravitam inteira e exclusivamente em torno do velho problema gnoseológico das relações entre o pensamento e a existência, entre as sensações e o físico"... Mais adiante ele define matéria da seguinte forma: " A admissão da tendência filosófica negada pelos idealistas e pelos agnósticos encontra, ao invés, a sua expressão nas definições: a matéria é o que é, agindo nos nossos órgãos dos sentidos, produz as sensações; a matéria é uma realidade objetiva que nos é dada pelas sensações, etc.... E ele continua: "A matéria é o dado primeiro e o espírito o dado segundo para uma tendência filosófica, enquanto que para outra tendência, é o inverso".

matéria deve ser ampliado <sup>3</sup>. Einstein mostrou em seus famosos trabalhos de 1905 [26,27] que matéria pode se converter em energia e vice versa, através da famosa equação  $E=mc^2$ . Dessa maneira, quando se falar em matéria deve-se ter em conta que matéria é uma forma condensada de energia. No próximo capítulo, discutiremos em detalhes os aspectos fundamentais da matéria naquilo que diz respeito à mecânica clássica ao estudarmos o conceito de massa.

Do ponto de vista terminológico, o materialismo filosófico se divide em:

- a) Materialismo ontológico, que afirma a dependência do ser social em relação ao ser biológico e a emergência do primeiro a partir do segundo;
- b) Materialismo epistemológico, que afirma a existência do mundo físico independente dos objetos do pensamento científico;
- c) Materialismo prático, que acredita na ação transformadora do homem nas diversas formas de organização social.

Do ponto de vista histórico, quando pensamos em materialismo antigo, o primeiro nome que aparece é o de Epicuro (341-270 a.C.)<sup>4</sup>. Se isto acontece, as razões são numerosas. A obra de Demócrito (460-370 a.C.) [32] praticamente se perdeu enquanto que os textos de Epicuro são, até certo ponto, numerosos. Por outro lado, Lucrécio (98-55 a.C.)<sup>5</sup>, que deixou uma quantidade muito abundante de textos, é considerado como um doxógrafo, uma espécie de compilador e sistematizador para o latim dos textos gregos. Além disso, Leucipo (500-440 a.C.), que tido por muitos como o autor da teoria atômica, possui somente um fragmento de sua obra e o restante do que lhe sobrou foram citações feitas por outros autores. Alguns deles até duvidam de sua existência. Após essa pequena digressão sobre o materialismo em geral, voltemos

---

<sup>3</sup> Do ponto de vista físico, o que é atualmente aceito sobre a matéria é que ela pode se apresentar como: matéria visível, ou matéria comum, formada principalmente por prótons e nêutrons; matéria escura bariônica, matéria comum muito tênue para ser vista; matéria escura não bariônica, que são partículas exóticas como os "axions" ou neutrinos sem massa; energia escura que é a energia do espaço vazio.

<sup>4</sup> Referindo-se à Epicuro, Ilya Prigogine [30] afirma: "Foi Epicuro o primeiro a estabelecer os termos do dilema a que a física moderna conferiu o peso de sua autoridade. Sucessor de Demócrito, ele imaginava o mundo constituído por átomos em movimento no vazio. Pensava que os átomos caíam todos com a mesma velocidade, de acordo com trajetórias paralelas. Como podiam, então, entrar em colisão? Como podia aparecer a novidade, uma nova combinação de átomos? Para Epicuro, o problema da ciência, da intelegibilidade da natureza e do destino dos homens eram inseparáveis. Que podia significar a liberdade humana no mundo determinista dos átomos?"

<sup>5</sup> Foi Lucrécio quem introduziu a idéia do "clinamen" na teoria atômica de Epicuro. Esta palavra significa declinação e coloca a possibilidade da mudança no quadro determinístico da teoria atômica de Epicuro, ficando em aberto se em algum escrito ou fragmento de Epicuro que tenha se perdido, ele tenha mencionado tal termo [31].



à questão central abordada. A expressão materialismo histórico designa o corpo central da teoria da história do marxismo e que é também conhecida por concepção materialista da história. Na introdução de seu - *Do Socialismo Utópico ao Socialismo Científico* - publicado em 1892 [33], Engels escreveu: *O materialismo histórico designa uma visão do desenrolar da história, que procura a causa final e a grande força motriz de todos os acontecimentos históricos importantes no desenvolvimento econômico da sociedade, nas transformações dos modos de produção e de troca, na conseqüente divisão da sociedade em classes distintas e na luta entre essas classes.*

Em linhas gerais, os acontecimentos históricos mais significativos dependem do modo como a sociedade se organiza economicamente e são determinados pelo quadro dessas transformações, inclusive a estrutura das classes e a luta que se trava entre elas. Engels considerava que Marx era o responsável maior pela teoria do materialismo histórico e que acrescentava ser esta teoria, juntamente com a da mais-valia as duas grandes descobertas de Marx. De qualquer maneira, a contribuição de Engels é imprescindível. Ela, juntamente com a de Marx, são praticamente indistinguíveis, pois ambos começaram a construir a Teoria do Materialismo Histórico desde *A ideologia alemã* de 1845-46 [34], ou até mesmo antes. Podemos até dizer que alguns elementos dessa teoria já existem nos escritos anteriores de Marx e de Engels. De um ponto de vista científico, poderíamos dizer que o materialismo histórico repousa em uma base empírica ou em uma coleção de teses empíricas que Marx e Engels vão construindo, sendo que, seu caráter de cientificidade sempre vai depender de seu potencial explicativo e porque não dizer preditivo, sem cair em nenhuma forma de determinismo econômico, bem como das possibilidades que ele possa abrir em termos das investigações sociais e históricas.

No entanto, o texto que consagra as pretensões do materialismo histórico é o famoso prefácio de Marx a sua - *Contribuição à Crítica da Economia Política* - de 1859 [35]. Marx se refere a ele pelo menos duas vezes em *O Capital* que, como sabemos, é de 1867. O texto na íntegra é o seguinte: *Na produção social da sua existência, os homens estabelecem relações determinadas, necessárias, independentes de sua vontade, relações de produção que correspondem a um determinado grau de desenvolvimento das forças produtivas materiais. O conjunto dessas relações constitui a estrutura econômica da sociedade, a base concreta sobre a qual se eleva uma superestrutura jurídica e política e à qual correspondem determinadas formas de consciência social. O modo de produção da vida material condiciona o desenvolvimento da vida social, política e intelectual em geral. Não é a consciência dos homens que determina o seu ser; é o seu ser social que, inversamente, determina a sua consciência. Em certo estágio de desenvolvimento, as*

*forças produtivas materiais da sociedade entram em contradição com as relações de produção existentes ou, o que é a sua expressão jurídica, com as relações de propriedade no seio das quais se tinham movido até então. De formas de desenvolvimento das forças produtivas estas relações transformam-se no seu entrave. Surge então, uma época de revolução social. A transformação da base econômica altera, mais ou menos rapidamente, toda a imensa superestrutura. Ao considerar tais alterações é necessário sempre distinguir entre alteração material – que se pode comprovar de maneira cientificamente rigorosa – das condições econômicas de produção e as formas jurídicas, políticas, religiosas, artísticas ou filosóficas, em resumo, as formas ideológicas pelas quais os homens tomam consciência desse conflito, levando-o às suas últimas conseqüências. Assim, como não se julga um indivíduo pela idéia que ele faz de si próprio, não se poderá julgar uma tal época de transformação pela consciência de si; é preciso, pelo contrário, explicar esta consciência pelas contradições da vida material, pelo conflito que existe entre as forças produtivas sociais e as relações de produção. Uma organização social nunca desaparece antes que se desenvolvam todas as forças produtivas que ela é capaz de conter. Nunca relações de produção novas e superiores se lhe substituem antes que as condições materiais de existência dessas relações se produzam no próprio seio da velha sociedade. É por isto que a humanidade só levanta os problemas que é capaz de resolver e assim, numa observação atenta, descobrir-se-á que o próprio problema só surgiu quando as condições materiais para o resolver já existiam ou estavam pelo menos, em vias de aparecer. A traços largos, os modos de produção asiático antigo, feudal e burguês moderno, podem ser qualificados como épocas progressivas de formação econômica da sociedade. As relações de produção burguesas são a última forma contraditória do processo de produção social, contraditória não no sentido individual, mas de uma contradição que nasce das condições de existência social dos indivíduos. No entanto, as forças produtivas que se desenvolvem no seio da sociedade burguesa, criam ao mesmo tempo, as condições materiais para resolver esta contradição. Com esta organização social termina a pré-história da humanidade*<sup>6</sup>.

No prefácio desta sua importante obra, Marx traz valiosas informações sobre o desenvolvimento do materialismo histórico em parceria com Engels. Ele menciona uma linha de investigação anterior independente na mesma direção feita por Engels e em seguida, enumera a importância de alguns escritos como o *Manifesto Comunista* [37].

---

<sup>6</sup> Para uma exposição sistemática e mais recente do Materialismo Histórico ver [36].

A longa citação que apresentamos ficou famosa, tendo sido referida inúmeras vezes por todos aqueles que estudam o materialismo histórico de Marx e Engels. Questões de extrema importância para o marxismo e que até hoje causam exaustivas polêmicas estão colocadas de forma clara naquela citação. As relações entre base e superestrutura, a ênfase na importância da estrutura econômica sobre os aspectos políticos, culturais e religiosos de uma dada sociedade são apresentadas e sugerem um aprofundamento.

Curiosamente, Marx não menciona na citação em apreço a questão das classes sociais e o embate entre elas. Uma outra questão relevante explicada por Marx é o problema da passagem de um modo de produção a outro. Se aplicarmos este trecho da citação à queda da ex-União Soviética e ao fim do bloco socialista, ele soa como uma lúgubre profecia.

## **O Materialismo Dialético**

Freqüentemente o materialismo dialético tem sido apresentado como a filosofia do marxismo enquanto que o materialismo histórico seria sua ciência. Atribui-se até a George Plekhanov essa classificação.

A razão principal para isto é que a geração dos marxistas imediatamente após Marx e Engels e seus herdeiros diretos foi profundamente marcada pelas obras mais famosas dos fundadores do Marxismo. *O Capital*, de Marx e o *Anti-Dühring* [38], de Engels foram espécies de bíblias e textos de referência fundamental para todos os marxistas. O primeiro representava a ciência econômica e a base para o materialismo histórico enquanto que o segundo foi considerado como a forma mais bem acabada da exposição da filosofia marxista.

Não devemos, no entanto, esquecer a profunda influência que a geração marxista que se seguiu a Marx e Engels sofreu de uma visão cientificista de tipo positivista, conforme já vimos <sup>7</sup>.

O materialismo dialético é fruto de uma situação bastante peculiar. Ele é uma tentativa de superar o materialismo mecanicista saído da Revolução Científica, sofrendo forte influência do Iluminismo, com a utilização da dialética de Hegel de cunho idealista. De um lado, o mecanicismo era incompatível com a dialética de base idealista e foi, portanto, necessário para se criar um materialismo de tipo novo,

---

<sup>7</sup> Uma influência positivista mais recente aparece em Althusser que também explicita a diferença entre ciência e filosofia no marxismo: "A fundação da ciência da história por Marx provocou o nascimento de uma nova filosofia teórica e praticamente revolucionária: a filosofia marxista ou materialismo dialético". [39]

subverter a própria dialética de Hegel, como foi feito por Marx <sup>8</sup>.

O materialismo dialético suprimiu o reducionismo do velho materialismo que reduzia as idéias à matéria, afirmando tratar-se a matéria e as idéias, de realidades diferentes de fato opostos, mas existindo uma unidade entre eles, onde o aspecto material era o fundamental. No fundo, era a velha dicotomia cartesiana, embora pudesse vir revestida de outros aspectos. Ainda segundo o velho materialismo, a idéia, ou o espírito originam-se historicamente da matéria e continuam a depender da matéria a qual se subordina, existindo matéria sem espírito, mas nunca o contrário.

Do ponto de vista do novo materialismo, além da superação do reducionismo, o que lhe confere o conteúdo dialético é entender a realidade material como concreta, existindo independentemente da nossa vontade e formando uma unidade contraditória.

Como uma lei geral da própria dialética é a união e luta dos contrários que faz avançar a realidade num processo de transformação de caráter histórico e que dá origem ao qualitativamente novo. As leis fundamentais do materialismo dialético, que são consideradas leis gerais que governam a natureza, a sociedade e o pensamento são geralmente enunciadas como se segue <sup>9</sup> :

1ª) A lei da transformação da quantidade em qualidade, segundo a qual as mudanças quantitativas dão origem a mudanças qualitativas.

2ª) A lei da unidade dos contrários que entende a realidade como concreta e contraditória formando uma unidade entre contrários, cuja principal característica é a contradição.

3ª) A lei da negação da negação que expressa que, no conflito entre contrários, um deles nega o outro que é, por sua vez, negado em um nível superior de desenvolvimento histórico, o que sempre preserva algo de ambos os termos que são negados. Algumas vezes, essa lei é apresentada como uma síntese dos contrários, sendo uma a tese, outro a antítese e o novo como síntese.

---

<sup>8</sup> Também como observa Fataliev [40] era necessário que se alcançasse um certo grau de desenvolvimento científico para que surgisse um novo tipo de materialismo: “Por volta de 1840, o progresso das ciências da natureza já tinha mostrado o caráter limitado, mecanicista e metafísico do materialismo filosófico pré-marxista, fazendo aparecer a dialética materialista objetiva dos fenômenos naturais. Afirmara a necessidade de adotar novas concepções da natureza, de um caráter materialista dialético. Marx e Engels tomaram em conta dados da ciência para elaborar o materialismo dialético”.

<sup>9</sup> As três leis que se seguem foram extraídas do primeiro capítulo da “Dialética da Natureza” de Engels, pg.62. [41]

Voltando a questão anterior, isto é, da divisão do marxismo entre materialismo histórico e materialismo dialético, um sendo a ciência e o outro, a filosofia do marxismo, algumas observações devem ser feitas. Em primeiro lugar, não pode haver dúvida sobre o caráter materialista e também dialético da teoria da sociedade criada por Marx e Engels. Além disso, não há dúvida sobre o conteúdo histórico do materialismo dialético, ou seja, o materialismo ao incorporar a dialética passa a analisar os desenvolvimentos que se dão na sociedade ou na natureza como processos e movidos por contradições. Na realidade, o que existe é um entrecruzamento entre essas duas teorias explicadas além de uma característica de complementaridade. Não é por acaso que Gramsci denomina o materialismo histórico como teoria das contradições sociais [42].

Uma outra questão importante de ser colocada é que, se uma dimensão dialética não é incorporada ao materialismo histórico, ele corre o risco de ser visto como uma teoria de tipo determinista como freqüentemente vem acontecendo. Este problema de fato ocorreu com o marxismo, que pelas mãos de alguns marxistas da segunda geração posterior a Marx e Engels, da época da Segunda Internacional em um contexto de grande desenvolvimento do capitalismo como foi visto nas páginas anteriores na breve história do marxismo. Este fenômeno também se repete com alguns marxistas da época da Revolução Russa e da Terceira Internacional. Mas o pior só veio a acontecer no período de burocratização da Revolução Russa. Os *marxistas oficiais*, porta-vozes do Partido Comunista transformaram o materialismo histórico em uma caricatura grosseira e vulgar da teoria da história de Marx e Engels. O chamado marxismo-leninismo dos manuais do Partido Comunista da ex-União Soviética fez da teoria de Marx e de Engels uma forma de determinismo mecanicista pré-científico <sup>10</sup>.

## **Teoria do Conhecimento**

Apesar de Marx não ter escrito nenhum trabalho específico sobre a dialética, muito embora a tenha empregado largamente em seus escritos econômicos ou mesmo políticos, os textos de divulgação de Engels, principalmente *Do Socialismo*

---

<sup>10</sup> Henri Lefebvre, na década de 30 já chama a atenção para este empobrecimento da teoria promovido pelo marxismo oficial: “É interessante notar que esta ontologia simplificada da natureza material sucedeu a outras simplificações não menos abusivas. Durante um período muito longo, o da grande crise econômica (1929-1933) e de suas conseqüências, o marxismo foi reduzido a uma ciência: a economia política. Ele tornou-se um economicismo. Os dogmáticos desta tendência rejeitaram alegremente as outras ciências da realidade humana: a sociologia (como cheia de reformismo), a psicologia (como definitivamente aburguesada)...” [43]

*utópico ao socialismo científico*, *Ludwig Feuerbach e o fim da filosofia clássica alemã*, *Dialética da natureza* e o *Anti-Duhring*, fornecem um delineamento geral para uma teoria do conhecimento marxista. Evidentemente, Engels discutiu com Marx sobre dialética e não podemos dizer que os seus textos expressem somente sua posição individual em face da dialética. É importante também lembrar que, em 1908, Lênin escreveu o seu *Materialismo e empiro-criticismo*, dedicado à teoria do conhecimento, e mais tarde, outros marxistas também se dedicaram ao assunto. Georgy Luckács (1885-1971) e Gyorgy Makus, ambos filósofos húngaros marxistas escreveram sobre o assunto [44,45].

Nosso objetivo maior neste item é apresentar algumas observações importantes para um estudo em maior profundidade da teoria do conhecimento do marxismo e em seguida, uma breve sistematização com o propósito de fornecer uma organização resumida, mas abrangente. Em primeiro lugar, o marxismo dá ênfase especial à questão da objetividade, ou seja, da realidade independente do que possamos pensar sobre ela. Dessa forma, o marxismo defende o caráter ontológico da realidade.

Uma segunda questão vital para uma teoria do conhecimento marxista é o papel do trabalho no processo aquisitivo do conhecimento e, portanto no caráter social, evidentemente histórico do conhecimento. Essas duas características fundamentais, objetividade e trabalho descartam epistemologicamente empirismo e idealismo, ceticismo e dogmatismo como formas isoladas e com capacidade de explicar o processo de conhecimento.

Para um aprofundamento dessas duas questões ver as teses de Marx sobre Feuerbach <sup>11</sup>. Nelas ele critica tanto o materialismo como o idealismo. No caso do materialismo feuerbachiano Marx observa que o conhecimento é o conhecimento de um mundo criado pelo homem, isto é inexistente fora da história, da sociedade e da indústria e que Feuerbach ignora. Com relação ao idealismo Marx mostra que ao contrário do materialismo o idealismo viu e desenvolveu o *lado ativo*, a atividade subjetiva no processo do conhecimento e que o sujeito não capta determinados objetos em si, mas os produtos de sua atividade. Assim ele também reconhece o mérito do idealismo por haver assinalado o papel ativo na relação sujeito-objeto. No entanto essa postura só considera o sujeito como sujeito consciente, ou seja, pensante e daí seu caráter abstrato que não inclui a atividade prática, sensível e real.

---

<sup>11</sup> Para uma leitura comentada das “Teses sobre Feuerbach” de Marx, ver [46].

Levando em conta principalmente os textos citados anteriormente de Engels e tendo em vista as observações anteriores, poderíamos tentar uma breve sistematização, um pouco esquemática e obviamente incompleta, como se segue:

- a) Sendo o marxismo uma forma de materialismo de tipo novo, como foi enfatizado por Engels, uma primeira proposição seria que a realidade tem existência própria, independente de nossa mente ou das idéias ou representações que possamos dela fazer [28].
- b) O materialismo marxista implica em que o ser tem precedência sobre o pensar ou o que dá no mesmo, a existência precede a consciência. Isto não quer dizer como muitas vulgarizações grosseiras dão a entender, que o marxismo negue ou mesmo despreze a existência das qualidades espirituais, como atributos da alma ou da sensibilidade. Muito pelo contrário. O que o marxismo afirma é que essas qualidades são o produto de nosso ser social e estão subordinadas à nossa existência material <sup>12</sup>.
- c) O marxismo vê a realidade em permanente movimento, como já o faziam muitos filósofos gregos pré-socráticos. Em outras palavras, os processos sociais ou da natureza têm início, se desenvolvem e morrem. Neste sentido, é fundamental para que possamos apreender a realidade que nos situemos na perspectiva de seu movimento, buscando estabelecer e entender os momentos desse processo, identificando o seu encadeamento e suas múltiplas conexões através de suas infinitas relações <sup>13</sup>.
- d) Muito embora não exista um consenso entre os marxistas, no entanto os textos de Engels que tratam do assunto e aos quais temos nos referido consideram a dialética como pertencendo à estrutura do real e não somente como método de análise da realidade, o que não teria sentido se a realidade não fosse também dialética <sup>14</sup>.

---

<sup>12</sup> Sobre este problema Engels assim se pronuncia em [33]: “O problema da relação entre o ser e o pensar, entre a natureza e o espírito, problema supremo de toda filosofia, tem, pois, suas raízes, analogamente a toda religião, nas idéias limitadas e ignorantes do estado de selvageria”.

<sup>13</sup> Engels ao referir-se às limitações do velho materialismo mecanicista assim se expressa: “A segunda limitação específica desse materialismo estava em sua incapacidade de conceber o mundo como um processo, como algo sujeito a desenvolvimento histórico. Isto correspondia ao estágio das ciências naturais da época e a maneira metafísica, isto é, antidialética da filosofia relacionada a ele”.

<sup>14</sup> Logo no primeiro capítulo de [41], Engels afirma: “As leis da dialética, por conseguinte, extraídas da história da natureza, assim como da história da sociedade humana. Não são elas outras senão as leis mais gerais de ambas essas fases do desenvolvimento histórico, bem como do pensamento humano”.

e) A dialética pertence à estrutura do real seja ele social, o mundo natural ou o pensamento. Ela funciona como uma espécie de princípio unificador ou fio condutor da realidade e que esses três mundos embora tenham suas especificidades e do ponto de vista científico possam ser estudadas por ciências particulares completamente diferentes, eles não são estanques, se articulam entre si e pertencem a uma mesma totalidade. Não existe também consenso entre os marxistas com relação à existência da dialética na natureza, muitos afirmando que defender este ponto de vista é um retorno à metafísica [47].

Os recentes estudos em dinâmica de sistemas envolvendo os conceitos de complexidade e caos têm encorajado uma retomada da questão da dialética na natureza. Esses conceitos têm se mostrado bastante férteis e aplicáveis em vários campos do conhecimento como na biologia, na cosmologia, na origem da vida e em muitos processos que ocorrem na natureza.

f) Em última instância toda superestrutura da sociedade, as idéias políticas, religiosas, jurídicas, etc, são de alguma forma determinadas e condicionadas pela estrutura econômica. Isto equivale dizer que as formas de pensamento são determinadas, não como reflexo mecânico ou imagem especular, da forma como os homens estabelecem relações entre si para a produção, a circulação e distribuição dos bens da economia, em suma, do modo de produção econômico. É importante ressaltar que não podemos confundir esse determinar com um determinismo de tipo newtoniano, como alguns possam supor. Lembremos ainda que existe uma carta de Engels à Bloch onde ele afirma que outros fatores às vezes podem ser fundamentais e até mesmo determinantes<sup>15</sup>. A dependência da superestrutura da base material é uma indicação de caráter geral e não algo imutável com validade para qualquer situação. Há que se considerar outros fatores e analisar cada situação concreta.

g) Como uma espécie de corolário do item anterior, podemos dizer que além das limitações individuais, o modo de produção coloca limites e horizontes ao pensamento. Isto equivale dizer que o homem é limitado pelo seu tempo. É importante também acrescentar neste contexto que Engels considera as formas e os modos de produção diferenciados no espaço e no tempo e que é completamente estranho ao marxismo à afirmação segundo a qual os países

---

<sup>15</sup> Ver a carta de Engels a J. Bloch escrita em Londres em 21-22 de Setembro de 1890 em [48].



mais atrasados seguiriam o caminho dos países mais desenvolvidos. Nem Marx, muito menos Engels jamais afirmaram que os países seguiriam o caminho: comunismo primitivo, sociedade escravista, sociedade feudal, capitalismo e finalmente socialismo e comunismo [38].

- h) O marxismo considera a luta de classes como o *motor da história*, ou seja, é a contradição e luta entre as classes sociais que movimenta o próprio mundo social <sup>16</sup>. É importante deixar claro que o conceito de luta de classes não é um conceito marxista. Ele foi tomado de empréstimo dos historiadores franceses do período da Restauração. Além do mais aqueles que consideram o desenvolvimento das forças produtivas como o *motor da história*, são denominados, em maior ou menor grau, de economicistas. Marx e Engels muitas vezes dão uma importância exagerada ao desenvolvimento das forças produtivas e provavelmente se equivocaram. No entanto, foram eles os primeiros a chamar a atenção para a degradação do solo promovida pela agricultura capitalista bem como para a alienação dos seres humanos em relação à natureza e que se configurava na contradição entre cidade e campo.
- i) Do ponto de vista mais estrito do conhecimento, o marxismo foge daquela dicotomia se a fonte do conhecimento vem da experiência, das sensações, etc. ou da razão. Ele afirma que o conhecimento vem de ambas as fontes. Os dados da realidade, os resultados empíricos são articulados, interligados pela razão sem que isto implique em qualquer adição estranha ou qualquer encobrimento na apreensão do real. A recíproca também é verdadeira, ou seja, a realidade pode ser conhecida desde que o homem construa historicamente os instrumentos para tal. Neste sentido, a chamada *coisa em si* kantiana, no atual estágio do desenvolvimento científico, não faz qualquer sentido <sup>17</sup>. O real não tem nada de incognoscível e é o conjunto de suas múltiplas manifestações. A forma com que nos aproximamos do real é que é histórica, pois os instrumentos e a aparelhagem para este desvelamento vão sendo construídos, de sorte que a aproximação vai sendo feita progressivamente.

---

<sup>16</sup> Logo no início do “Manifesto Comunista”, Marx e Engels afirmam: “A história de todas as sociedades até hoje existentes é a história das lutas de classe”. [37]

<sup>17</sup> Piaget, em [49], pg 247, discute em profundidade o problema das idéias inatas. Ele assim se expressa: “Não existem “idéias inatas” no sentido dos cartesianos, etc. É verdade que por extensão podemos considerar como tais as categorias “a priori” no sentido de Kant. Em epistemologia, a existência de juízos sintéticos “a priori” foi admitida por H. Poincaré no que se refere a intuição do número (no sentido da iteração n+1) e ao “grupo dos deslocamentos”... Porém, do ponto de vista psicogenético, ditas interpretações não resistem ao exame”...

## 1.2 TEORIA DA HISTÓRIA E HISTORIOGRAFIA GERAL

Lucien Goldman (1913-1970) em seu *Ciências Humanas e Filosofia*, publicado no Brasil em 1970, afirma que *todo fato social é um fato histórico e inversamente*. Com isto o autor quer dizer que tanto a história quanto a sociologia *estudam os mesmos fenômenos*. Não se trata, portanto, de reunir os resultados da sociologia e da história, mas de abandonar toda sociologia e toda história abstratas para se chegar a uma ciência concreta dos fatos humanos e isto pode ser sintetizado na proposta de uma sociologia histórica ou de uma história sociológica. Colocando-se nesta perspectiva ele faz a seguinte afirmação:

*A sociologia não pode ser concreta se não for histórica, do mesmo modo, a história se pretender ultrapassar o simples registro dos fatos, tornar-se-á necessariamente explicativa, a saber, numa medida maior ou menor, sociológica [50].*

Sobre os objetivos da ciência histórica, Goldman acrescenta:

*O que procuramos no conhecimento do passado é a mesma coisa que procuramos no conhecimento dos homens contemporâneos. Primeiro, as atitudes fundamentais dos indivíduos e dos grupos humanos em face dos valores, da comunidade e do universo. Se o conhecimento da história nos apresenta uma importância prática, é porque nela aprendemos a conhecer os homens que, em condições e, com meios diferentes, no mais das vezes inaplicáveis à nossa época, lutaram por valores e ideais análogos, idênticos ou opostos aos que possuímos hoje; o que nos dá consciência de fazer parte de um todo que nos transcende, a que no presente damos continuidade, é que os homens vindos depois de nós continuarão no porvir. A consciência histórica existe apenas para uma atitude que ultrapassa o eu individualista, ela é precisamente um dos principais meios para realizar essa superação. Para o racionalismo, o passado não é senão um erro cujo conhecimento é útil para eliminar o progresso da razão; para o empirismo, consiste numa massa de fatos reais que são, como tais, exatos em relação a um futuro conjectural; só a atitude dialética pode realizar a síntese, compreendendo o passado como etapa e caminho necessário e válido para a ação comum dos homens numa mesma classe no presente, a fim de realizar uma comunidade autêntica e universal no futuro. [50]*

O que se depreende desta longa citação de Goldman é que o objeto das ciências históricas é construído pelas ações humanas de todos os lugares e de todos os tempos. Assim, o objeto da história por ele definido, contempla tanto os movimentos coletivos como as revoluções ou guerras, bem como, os atos individuais da vida de personagens como Napoleão e outras figuras que fizeram história. Além de fazer uma crítica às correntes racionalista e empirista ele ressalta a importância de

uma abordagem dialética para que a história seja de fato apreendida enquanto processo que se desdobra continuamente.

Respondendo a questão de um cientificismo e determinismo de alguns marxistas, Goldman coloca o problema da seguinte forma: *o erro epistemológico fundamental deste cientificismo é o fato de considerar a comunidade humana como objeto de estudo. Objeto neste caso sendo entendido como algo exterior e a parte.* É evidente que esta forma de considerar o fato histórico, como ele muito bem ressalta, separando o sujeito do objeto como se fossem duas realidades distintas, tem muito de uma visão positivista da história.

Com relação a posições economicistas de alguns marxistas, Goldman escreve: *Há na vida dos homens, não uma importância “única” e “decisiva”, etc mas um privilégio qualquer ligado aos fatores econômicos? De direito não; de fato uma história tal qual se desenvolveu até os nossos dias sim. Isso precisamente porque o indivíduo humano assim como a sociedade são fatos totais em que não se pode recortar camadas. O homem é um ser vivo consciente, situado no mundo ambiente de realidades econômicas, sociais, e políticas, intelectuais, religiosas, etc. Sofre a ação global desse mundo e, por sua vez, reage sobre ele. É o que chamamos uma relação dialética. Precisamente porque não há na consciência do indivíduo – salvo exceções bastante raras – compartimentos estanques subtraídos às influências do resto de sua personalidade, e ela constituirá sempre uma unidade mais ou menos coerente.*

*Isto basta para explicar e confirmar o privilégio da ação de fatores econômicos na história passada e contemporânea, pois os homens são constituídos de tal modo, que para amar, pensar ou crer, devem viver, nutrir-se e vestir-se. Esses domínios da atividade humana podem sem dúvida ter muito pouca ação sobre o pensamento e outras atividades, mas com a condição de que a satisfação das necessidades a que correspondem, seja amplamente assegurada, podendo os homens dedicar a elas parte relativamente reduzida de sua atividade total. Mas quer se regozije ou não, isto nunca ocorreu para a maioria dos homens. O povo, as classes oprimidas ou os membros das sociedades primitivas, sempre viveram sob necessidade, obrigados a conceder ao trabalho a maior parte de seu tempo e – no mundo moderno – presos pela insegurança e pelo temor permanente do futuro [50].*

As palavras de Goldman, principalmente no final soam até como proféticas. O que nos parece óbvio é que a influência dos fatores econômicos na história não é uma mera invenção dos marxistas, muito menos uma simples questão de opinião, mas o produto da própria evolução histórica quando os homens para viverem, produzirem, etc. estão submetidos a relações dessa natureza além do que essas influências são diferenciadas para classes ou camadas diferentes da sociedade. Quando essas

condições forem modificadas a marcha da história será influenciada por outros fatores e terá condicionantes diversos dos atuais. Não existe para o marxismo nenhuma ditadura dos fatores econômicos muito menos algo intrínseco à história que seja de natureza econômica e extra-histórica.

Antes de passarmos ao terreno da historiografia, vejamos em linhas gerais a questão da ideologia na história, segundo uma visão marxista<sup>18</sup>. O problema pode ser posto de forma bem simples. Em se tratando de ciências da natureza como a física, a geologia, a biologia, etc., a interferência dos fatores subjetivos tais como as opiniões, os juízos de valor, enfim os fatores de natureza ideológica sobre os métodos para a obtenção dos conhecimentos se dá de forma diferente daquilo que acontece no campo das ciências ditas sociais ou humanas. Dito de outra forma, a relação entre sujeito e objeto para o caso das ciências naturais difere fundamentalmente da mesma relação para o caso das ciências humanas. Para estas últimas sujeito e objeto praticamente se confundem sendo impossível fazer uma separação nítida ou bem mais definida como acontece hoje com a física, a química, etc. Isto não quer dizer em absoluto que as ciências naturais não sejam afetadas por fatores ideológicos, longe disso, a ciência como um todo é produzida socialmente e como tal não poderia estar fora do jogo de interesses e das estruturas de poder que regem o mundo atual.

A questão central para as ciências humanas é precisamente a seguinte: se o objeto dessas ciências está indissolúvelmente ligado aos fatores ideológicos como estabelecer o conhecimento científico, ou seja, como é que o conhecimento neste campo adquire o *status* de científico? Em termos já colocados pelos gregos, como diferenciar a doxa da episteme?

Aparentemente as ciências humanas estão inexoravelmente sujeitas a um relativismo perverso. A questão pode ser colocada de outra forma. Se é impossível separar os fatores subjetivos, os julgamentos de valor para se chegar ao fato social puro qual dessas opiniões deve prevalecer? Ou todas elas têm o mesmo peso em grau de cientificidade? O marxismo tenta fugir desta espécie de abismo relativista sem cair em uma posição positivista de algo como uma física social, afirmando que existe uma posição privilegiada para se observar os fatos históricos que é o ponto de vista do proletariado, enfim dos oprimidos e explorados. A razão para isto também é simples. Quem tem todo interesse em encobrir a verdade histórica, de falseá-la, de mistificá-la é a burguesia e as classes dominantes de uma maneira geral. Não admitindo que seja possível o fato histórico asséptico, isto é, destituído de julgamentos e de fatores

---

<sup>18</sup> Ver Michael Löwy em [51]. Logo na página 11 podemos ler: "O conceito de ideologia não vem de Marx: ele simplesmente o retomou. Ele foi literalmente inventado (no pleno sentido da palavra inventar, tirar da cabeça, do nada) por um filósofo francês pouco conhecido, Destutt de Tracy, discípulo de terceira categoria dos enciclopedistas, que publicou em 1801 um livro chamado "Elements d'Idéologie".

subjetivos o marxismo procura um referencial e um ponto de observação que mais se aproxime da verdade <sup>19</sup>. As outras duas possibilidades são ou o relativismo, algo semelhante à relatividade galileana que considera todos os referenciais com velocidades constantes como equivalentes ou a opção positivista de tentar separar o fato histórico de qualquer julgamento de valor.

Feitos esses breves comentários sobre o método histórico, passemos então ao campo da historiografia, entendida como o estudo da história dos escritos históricos, métodos, interpretações e suas respectivas controvérsias. Como disciplina, a historiografia é bastante recente e como ramo autônomo do conhecimento data do século XX. Devemos, no entanto deixar claro que os historiadores, mesmo os mais antigos já tinham a preocupação de situar suas obras em relação à de seus antecessores, como também compará-las com a de seus contemporâneos [52,53].

Os precursores da ciência histórica são Heródoto (484-425 a.C.) [54] e Tucídides (460?- 400? a.C.) [55]. O primeiro nasceu em Halicarnasso, na Ásia Menor, foi um grande viajante, teve que se exilar e viveu em Atenas. O segundo nasceu em Atenas, era filho de ilustre família, e também teve que se exilar, regressando à Atenas já perto de sua morte. Heródoto é o exemplo do que poderíamos atualmente classificar como de *historiador cultural*. Tucídides hoje seria classificado como *historiador político*.

O título de *pai da história* que é atribuído a Heródoto se deve ao fato que antes dele os registros históricos eram feitos pelos chamados logógrafos, ou escritores em prosa, em contraste com os escritores em verso que tanto podiam ser poetas ou filósofos e que até uma certa época usavam a forma poética para se expressarem.

O termo historiador encerra um conteúdo novo, na medida em que a história quer dizer originariamente busca, investigação e pesquisa o que não era função dos logógrafos realizarem. Como era natural Heródoto apesar de ter dado um grande salto a frente dos logógrafos, ainda conserva muitas de suas características. Seu apego e até certo ponto encantamento diante das genealogias, do maravilhoso, do lendário e até do puramente mítico, mantêm seu traço de união com os logógrafos. Um fato curioso é o seu descaso para com a cronologia.

Mas é a obra de Tucídides que mais se assemelha a um texto de história como o conhecemos atualmente. Sua *História da guerra do Peloponeso*, conflito que durou 27 anos (431- 404 a.C.), foi um acontecimento de proporções gigantescas para o mundo helênico e até outras regiões mais remotas. No entanto o autor morre e a obra é interrompida no vigésimo primeiro ano de sua conflagração (411-10 a.C.).

---

<sup>19</sup> Para uma discussão em profundidade dessa questão, ver [19], pg 195 e seguintes.

Da mesma forma que Heródoto é considerado o *pai da história*, Políbio (208?-125 ? a.C.) [56] pode ser denominado o *pai da historiografia*. Ao fazer um balanço de seus antecessores ele tem plena consciência da importância do tema que trata, que é o da supremacia de Roma, da qual ele é contemporâneo. Sua obra também oferece um panorama e uma crítica dos textos sobre história de Roma daqueles que o precederam. Finalmente, Políbio defende uma *história geral* em contraposição à uma *história* ou *histórias-parciais*.

Outro historiador antigo importante é Diodoro da Sicília (90- 20 a.C.), pois sua obra constitui um elo entre a civilização grega e a emergente sociedade romana. Ele é autor de uma compilação denominada de *Biblioteca Histórica*, elaborada entre 60 e 30 a.C. Como seu antecessor Políbio, ele empreendeu uma avaliação de seus predecessores em especial a historiografia helenística.

Se olharmos do ponto de vista da crítica a historiografia, outro nome importante é Luciano de Samostata (125 ?- 192 ?), autor de um texto intitulado *Sobre a maneira de escrever a história* e data do ano de 165 de nossa era. Este texto é uma crítica aos aspectos formais e ao conteúdo historiográfico de seus contemporâneos. Ele atribui ao historiador a tarefa de *contar o que aconteceu* e não se desviar ou perder tempo com outras coisas que não seja a verdade. Assim, ele antecipa em séculos as propostas de escolas históricas modernas.

Durante a civilização romana, a historiografia conhece um grande desenvolvimento. Diferentemente da civilização grega, o estado romano, desde os seus primórdios tem uma grande preocupação com a preservação dos registros históricos. Os grandes nomes da historiografia romana são: Júlio César (100- 44 a.C.), Salústio (86- 35 a.C.), Tito Lívio (59 a.C.- 17 d.C.), Tácito (55 ?- 117) e Suetônio (75?- 150).

Durante a Idade Média, vamos encontrar vários historiadores importantes: Jordanes (século VI), autor de uma *História dos Godos* (551), Gregório de Tours (538- 594), autor da *História dos Francos*, Isidoro de Sevilha (570 - 599), autor da *História dos Godos, Vândalos e Suevos*, Beda (673 - 735), autor da *História eclesiástica dos ingleses*, Paulo Diácono (720 - 799), autor da *História dos Lombardos*. Nesses relatos históricos uma *história sagrada* se mistura com uma *história profana*.

Com o fim da Idade Média grandes transformações sociais começam a ocorrer no ocidente europeu, principalmente a partir do século XI com um grande desenvolvimento comercial, com a dinamização dos centros urbanos e como consequência uma cultura e uma tradição tipicamente urbanas vai paulatinamente se formando. O peso desse novo quadro social na historiografia foi enorme. Ainda que mantendo uma roupagem e uma subordinação religiosa, o estudo da historiografia

ampliou sobremaneira seus horizontes temáticos e passou a tratar de outros assuntos de caráter mais geral como, por exemplo, o combate entre cristãos e muçulmanos. Quando as idéias renascentistas começam a se difundir pelo espaço cultural da sociedade, mais mudanças acontecem no panorama historiográfico. Aquilo que é mais perceptível é uma nova atitude crítica dos intelectuais face aos argumentos de autoridade, principalmente os da igreja católica. As novas idéias científicas também passam a repercutir sobre a historiografia, valorizando o experimento e a observação dos fatos.

Na Alemanha os impactos do movimento conhecido como Reforma Religiosa foram consideráveis. Desde o século XVI começa a estabelecer-se o ensino de uma *História Universal* nas escolas superiores, bem como, acentua-se a necessidade da formação de clérigos e teólogos protestantes. A culminância deste processo é o surgimento de uma *história científica* na Alemanha entre o fim do século XVIII e o início do século XIX, o que coincide com o auge da própria Revolução Industrial que ocorria na Inglaterra, mas tendia a se propagar por todo continente europeu.

Na segunda metade do século XVIII, sob o influxo do iluminismo, começa a prosperar a idéia de que era necessária uma nova visão dos estudos históricos. Neste contexto destaca-se Voltaire (1694-1778) com trabalhos importantes como *A era de Luiz XIV* e outros. Ele também é importante na historiografia da ciência por ter sido um dos grandes divulgadores das idéias de Newton no continente europeu. Seu trabalho *Elementos da filosofia de Newton* [57] é um texto clássico sobre as idéias do grande matemático e homem de ciência inglês. Com a consolidação da revolução burguesa na Europa, o ideal de unificação e de estado nacional, passa a nortear as idéias de dois grandes expoentes da filosofia e da história no continente europeu que são: Hegel (1770-1831) na Alemanha e Benedetto Croce (1866-1952) na Itália. Croce publicou um trabalho sobre teoria e história da historiografia (1917), tornando-se um texto de referência na área. Ambos os pensadores também dedicaram parte de seu trabalho à filosofia da história <sup>20</sup>.

Tendo dedicado grande parte deste capítulo, não propriamente à historiografia marxista, mas, principalmente, aos métodos e perspectivas históricas do marxismo, face ao objetivo maior de nosso estudo, vejamos de forma ainda que breve, o ponto de vista positivista na história.

Existe uma grande influência das idéias positivistas tanto na historiografia geral como na historiografia da ciência. Esta corrente de pensamento sociológico nasceu no

---

<sup>20</sup> Para um estudo extremamente interessante sobre o pensamento histórico e filosófico na Europa, ver [58] que o faz de forma original, articulando o desenvolvimento social e político com as idéias dominantes que iam surgindo nesses países.

século XIX depois das obras de Saint Simon (1760-1825), Augusto Comte (1798-1857) e Herbert Spencer (1820-1903). A obra desses três autores é muito mais um programa de investigação histórica do que uma investigação propriamente dita. No entanto, os expoentes máximos dessa corrente de pensamento histórico são Émile Durkheim (1858-1917) e seus seguidores e na Alemanha Max Weber. De uma maneira geral, considerando as muitas nuances e especificidades de cada autor dentro do pensamento positivista em sociologia e história, o que os caracteriza é que diante do abismo relativista ao qual nos referimos, o positivismo tenta saltá-lo propondo retirar dos fatos e acontecimentos históricos os aspectos ideológicos. Segundo eles seria possível uma operação tal que elevasse a história a um *status* científico que tem a física. Referindo-se a esta pretensão dos positivistas, Goldman afirma:

*Ora, havia, parece-nos, no pensamento desses investigadores, uma noção insuficiente de objetividade, pois faziam em que dependesse unicamente da inteligência, da penetração e da honestidade individual do pensador, desconhecendo a identidade do sujeito e do objeto nas ciências humanas e suas conseqüências para sua natureza e para seus métodos [50].*

São da autoria de Durkheim e Weber a *Regras do Método Sociológico e Estudo sobre a teoria da ciência*. As idéias positivistas tiveram e continuam tendo uma grande penetração e influência no pensamento sociológico e histórico. Até mesmo alguns pensadores marxistas em períodos diferentes se deixaram influenciar por essas idéias. Durante a época da Segunda Internacional, onde estão situados os herdeiros de Marx e de Engels da primeira geração, não foi raro aparecerem aqueles para os quais era possível construir uma ciência marxista como ciência empírica, herdando do positivismo sua concepção de método científico evolucionista e empirista. Em contraposição a essas idéias, a Escola de Frankfurt não só se insurgiu como também desenvolveu todo um trabalho teórico da melhor qualidade. Esta escola, fundada na Alemanha na década de 20 do século XX, contrapunha às correntes de pensamento não só positivistas, mas conservadoras e burocráticas, de uma maneira geral, uma teoria social autenticamente emancipatória que segundo eles deve ser reflexiva e interpretativa e nunca presa e obediente a um retrato da realidade empírica da sociedade. Esta talvez seja a melhor resposta às pretensões de interpretação da realidade social e política segundo os cânones positivistas [59] [60].

Este breve esboço de uma história da historiografia geral omite importantes contribuições da historiografia alemã e inglesa e faz somente uma curta menção a chamada *Escola dos Annales*, colocando em destaque Georges Lefèvre (1874-1959) com suas *Noções de historiografia moderna*. Lefèvre é também um dos mais conhecidos historiadores da Revolução Francesa e o trabalho citado tem um caráter



pioneiro na historiografia francesa. O nome desta escola histórica vem da fundação da revista *Annales* em 1929. Os nomes de maior destaque são os de Marc Bloch, um de seus fundadores, Lucien Fèvre e em seguida Fernand Braudel que pertence a segunda geração. Uma terceira geração surge depois de 1968 com Marc Ferro, Jacques le Goff, André Berguier, Jacques Revel e por último François Furet [61].

### 1.3 A HISTORIOGRAFIA DA CIÊNCIA

Apesar de haverem registros anteriores, a história da ciência como disciplina autônoma e acadêmica somente se estabeleceu e passou a se desenvolver no século XX. Durante o período clássico e mesmo na Idade Média, era comum e até mesmo cultivado o hábito de que uma produção científica envolvia um relato histórico de seus precedentes. Um exemplo disto é que quando um matemático grego se propunha a resolver um determinado problema ele o fazia começando por um levantamento histórico do referido problema, considerando ainda esse levantamento como parte integrante de sua solução [62].

Alguns textos antigos são importantes para a historiografia da ciência. Poderíamos começar com Eudemos, que viveu no século IV a.C., escreveu uma história da astronomia e uma história da matemática. Infelizmente esses textos desapareceram e seu resgate se deve a comentadores do período clássico ou da Idade Média. Um outro exemplo é o de Próclus (420 - 485) que escreveu uma história da matemática de Euclides. Aristóteles também pode ser considerado um dos precursores da história da ciência ao fazer uma história da filosofia e uma história das concepções da alma.

Modernamente, dois trabalhos com características de história da ciência são devidos a Joseph Priestley (1733 - 1804), *A História e o estado atual da eletricidade*, de 1767 e *História e estado atual das descobertas relativas à visão, luz e cores*, de 1772. São trabalhos pioneiros, mas nunca apresentados como textos de história da ciência. Priestley tinha uma visão interessante para sua época, a do desenvolvimento histórico como parte integrante do próprio desenvolvimento da ciência <sup>21</sup>.

No período vivido por Priestley, que era o da Revolução Industrial na Inglaterra, havia uma crença generalizada no progresso e a história da ciência era vista como

---

<sup>21</sup> Priestley é uma figura das mais importantes do final do século XVIII por combinar investigação científica, humanismo e política. Foi um dos descobridores do oxigênio e, a essa época, já tinha obtido fama internacional. Nunca teve uma participação ativa na política, mas em virtude de suas idéias republicanas, em 1791 foi atacado, tendo sua biblioteca e seu laboratório sido destruídos. Emigrou para os EUA onde faleceu em 1804. [63]

parte da história deste progresso. Este clima cultural gerou muitos trabalhos sobre as ciências particulares, biografias e textos diversos. Bailly (1736 - 1793) escreveu uma história da astronomia em uma série de textos entre 1775 e 1782. Haller, entre 1771 e 1778 publicou uma coleção de textos de história denominados de *biblioteca*. Eram textos sobre a vida e os trabalhos de cientistas e físicos antigos.

Durante o iluminismo, predominou uma concepção otimista, porém ingênua do desenvolvimento científico e ela não considerava a ciência como um fenômeno histórico. Dessa forma, a história da ciência era vista como um conjunto de detalhes cronológicos e não como uma reflexão no campo histórico. A própria Revolução Científica era tida como a expressão de uma sede de conhecimentos dos europeus e no máximo se estabeleciam conexões com a revolta contra o princípio da autoridade representado pela igreja. Todo um processo social que estava em marcha era ignorado.

Na França, onde predominava o pensamento racionalista por excelência, a idéia geral era que o conhecimento consistia em um ato puramente reflexivo e racional de caráter universal e, portanto a-histórico e abstrato. Com o crescimento e a difusão das idéias românticas com seu forte senso histórico, a historiografia da ciência passou a sofrer sua influência. Assim, uma visão de história mais relativa, bem como uma idéia de que o passado deveria ser julgado com base em suas próprias premissas.

Um fator de extrema importância para um aumento de interesse em história da ciência foi sem dúvida a nova forma de organização e de profissionalização da vida científica, fato ocorrido no final do século XVIII e começo do século XIX<sup>22 23</sup>. Nessa época também começavam a crescer e a se propagar visões instrumentalistas sobre o método científico começando a formar a base ideológica e metodológica para o positivismo do século XIX. Surge então a idéia de uma separação entre ciências naturais e humanidades, além de uma crença segundo a qual a filosofia tem muito que aprender e a se beneficiar da ciência, sendo, no entanto falsa a sua recíproca. O credo positivista passa a influir não só nas visões e concepções, mas penetra no próprio método de fazer ciência. Seu reflexo na história da ciência é uma concepção

---

<sup>22</sup> Bernal em [63] ressalta essa importância na Alemanha: "A Alemanha, especialmente, tomou a dianteira na tarefa de integrar a ciência na vida universitária corrente. As universidades alemãs haviam iniciado sua reforma no período da Ilustração, no século XVIII... Até os anos oitenta as universidades alemãs dos diferentes estados procuravam fundar cátedras científicas e mais lentamente, laboratórios técnicos cujo protótipo era o de Liebig, em Giessen"...

<sup>23</sup> As idéias de Bernal são confirmadas por Eric Ashby: "Em 1826 Justus von Liebig, cujos olhos tinham sido abertos quando ele esteve em Paris para trabalhar com Gay-Lussac, criou um laboratório de química na Universidade de Giessen; não o primeiro laboratório de química em qualquer universidade, mas o primeiro a oferecer um treinamento sistemático em pesquisa química, e então o primeiro núcleo de uma "Escola" de química".

relativamente a-histórica da história da ciência. É evidente que isto estreita os horizontes desta disciplina <sup>24</sup>.

No século XVIII e XIX acontece um fato interessante, quando muitos trabalhos científicos passam a conter uma introdução histórica, tornando-se importantes fontes historiográficas. Como exemplo, podemos citar a introdução histórica que foi incluída nas últimas edições de *Origens das Espécies*, de Darwin, que como sabemos foi publicado em 1859 [65]. Nela o autor faz um balanço histórico das concepções evolucionistas de Lamarck, indo até suas próprias contribuições. No século XIX, temos ainda um importante historiador da ciência que é Isaac Todhunter (1820-1884), tendo ele escrito uma série de história da matemática e da física. Como acontecem com muitos textos de história da ciência, eles somente podem ser totalmente compreendidos por especialistas na área, em face de sua extrema especialização. Isto tem sido uma característica de muitos historiadores da ciência. Frequentemente também, inúmeros cientistas que escrevem sobre seu campo de conhecimento, desconhecem os métodos da disciplina histórica e até mesmo a própria história.

Um marco na moderna historiografia da ciência e na epistemologia é William Whewell (1794 - 1866), muitas vezes considerado o primeiro historiador moderno da ciência com o seu *Filosofia das ciências indutivas*, publicado em 1840 <sup>25</sup>. Também é atribuído a este texto o início da epistemologia. Isto é perfeitamente natural pela forte relação que existe entre história da ciência e epistemologia. O trabalho de Whewell merece especial destaque por ser representativo de um tipo de história orientada filosoficamente para o positivismo. Seguindo uma linhagem semelhante podemos citar Mach (1838-1916), Berthelot, Ostwald e Pierre Duhem (1861- 1916), como seguidores desta tendência, os quais também se notabilizaram pelo fato de serem especialistas com grande interesse na história de suas respectivas disciplinas. Mach com seu clássico estudo de mecânica [67]. Ostwald com significativa contribuição à física e a química reeditou uma série de artigos que começa em 1889 e que contém mais de 250 volumes [68].

---

<sup>24</sup> Henri Lefebvre faz uma crítica contundente ao positivismo principalmente sua forma de classificar a ciência [64]: “O espírito” positivo “de Comte acreditou ter liquidado a metafísica – e ele não é senão uma forma sutil de metafísica. Dura lição, da qual convém se tirar proveito. É necessário retomar, mas ultrapassando-se – com o relativismo dialético – esta esperança de Comte: eliminar o espírito não científico, e constituir uma expressão válida, uma teoria da ciência”. E ele propõe uma outra classificação das ciências: “Entre as ciências da natureza, deve-se ter em conta suas relações, seus intermediários: biologia matemática, química biológica, física matemática, química física, etc. Entre as ciências do homem e as da natureza se intercalam a geografia humana, a pré-história, a antropologia”.

<sup>25</sup> Robert Blanché, em [66] considera d’Alembert em seu “Discurso Preliminar à Enciclopédia”, Dugald Stewart com o segundo volume de seu “Filosofia do Espírito Humano”(1814) e Augusto Comte com o “Curso de Filosofia Positiva”, como precursores da epistemologia. Os textos fundadores são, também segundo ele a “Wissenschaftslehre” (1837) de Bernardo Bolzano e “Philosophy of Inductive Sciences” (1840) de William Whewell.

Todos esses historiadores apresentam características e nuances diferentes. É possível perceber em Whewell e Mach uma maior consciência histórica que vai se disseminando a partir de meados do século XIX. As influências mais marcantes neste período são as de Hegel, do romantismo e dos métodos históricos desenvolvidos pela Escola de Berlim com Ranke (1795-1886) e Niebur (1776-1831) [69].

Outro personagem importante para a história da ciência é o pai do positivismo Augusto Comte (1798-1857). Em 1832 ele tentou fundar uma cadeira de história da ciência no *Collège de France*. Isto, no entanto só veio a ocorrer em 1872, tendo sido a primeira do gênero no mundo. Ela foi dada a um discípulo leal de Comte, que era Pierre Laffitte, que como sabemos liderou a chamada igreja positivista em Paris, mas teve um desempenho medíocre como historiador da ciência [70,71].

Comte via dois caminhos tanto para a apresentação como para a compreensão de uma disciplina científica. Uma chamada de via histórica e a outra denominada via dogmática. A via dogmática, essencialmente a-histórica, de acordo com a qual um assunto científico é representado logicamente de forma clara e distinta. Este caminho, segundo ele, é necessário por razões filosóficas e pedagógicas, mas não contribui para o entendimento da real natureza da ciência. Além disso, ele considera que histórias especializadas de disciplinas individuais são praticamente infrutíferas, pois elas artificialmente separam o desenvolvimento das ciências do desenvolvimento da ciência que é o real objeto do método histórico. Ainda segundo Comte, os dois caminhos supracitados têm um relacionamento dialético. A fim de entender a ciência temos que entender sua sociologia e sua história. Contudo o conhecimento da via dogmática (lógica) é essencial se queremos entender a história e não permitir que ela degenera em um amontoado de material cronológico, no entanto morto. Além disso, a via dogmática serve como quadro teórico para a interpretação da história.

Com sua perspectiva histórica, Comte também faz uma espécie de reabilitação da ciência medieval e que no período iluminista era vista pelos especialistas como pertencendo a tempos tenebrosos. Apesar de tudo isto a contribuição de Comte para a história da ciência é insignificante do ponto de vista historiográfico, além de que sua visão de história da ciência estava voltada para integrá-la a um sistema filosófico geral. Talvez o ponto fraco de suas concepções seja o fato de ele considerar que as fontes e dados históricos desempenham um papel menor na ciência histórica, analogamente a outros sistemas filosóficos do século XIX. Isto não deixa de ser um paradoxo em seu pensamento.

Com o progresso das idéias positivistas, no final do século XIX, foi se acentuando uma tendência entre alguns cientistas de enfatizar o método científico em detrimento dos métodos correntes nas ciências humanas, principalmente na história.

Eminentes homens de ciência da época como Virchow, Haeckel e Ostwald passaram a defender a idéia de que o estudo da história devia ser subordinado à nova cultura científica. O projeto dessa corrente de pensamento era substituir a história até então ensinada por uma história universal baseada no progresso da ciência. Na Alemanha, alguns historiadores como Droysen, Dilthey e Meinecke contra atacaram defendendo a história como uma disciplina humanística, cujos métodos e objetivos eram incompatíveis com os das ciências naturais.

No final do século XIX temos Paul Tannery (1843 - 1904) como um dos mais importantes historiadores da ciência [62]. Ele é considerado por muitos como o fundador da moderna história da ciência. De forma análoga a de Comte ele considerava a história da ciência como uma parte integral da história geral da humanidade. Um outro importante historiador da ciência do mesmo período é Pierre Duhem, químico, físico e filósofo da ciência. Seus trabalhos abordam o desenvolvimento das ciências físicas na Idade Média e renascença. Duhem, devido a sua posição de católico devoto, tratou de mostrar em suas obras que a chamada Revolução Científica era uma mera extensão natural de teorias e métodos que vinham sendo desenvolvidos desde os tempos medievais. Ele usou em seus estudos, textos originais e estabeleceu novos padrões para a investigação em história das ciências. No entanto suas idéias de continuidade foram bastante questionadas não invalidando seus argumentos e a rica documentação utilizada para lançar novas luzes neste campo do conhecimento.

Pierre Duhem juntamente com o historiador da ciência alemão Emil Wohwill, formaram a base de uma importante escola de história da ciência que tem em A. Maier, A. C. Crombie e Marshall Clagett seus representantes maiores. Eles estudaram em detalhes os predecessores e antecedentes da Revolução Científica.

Na virada do século XX, o progresso das ciências principalmente no campo da arqueologia, da antropologia e filologia, propiciou uma renovação na história das ciências. Novas descobertas nos campos mencionados revelaram outras fontes de investigação e que vieram a estender os horizontes da historiografia da ciência. Dessa forma, outras culturas científicas foram reveladas às vezes mais antigas que a grega. Como exemplo podemos citar o caso da descoberta pelo filólogo dinamarquês J. L. Heiberg (1854-1928) de um manuscrito em Istambul, em 1906 o qual levou a um novo entendimento dos métodos investigativos empregados por Arquimedes em particular e da matemática grega em geral. De maneira similar passou-se a conhecer bem mais sobre a matemática e a astronomia egípcia e babilônica [62].

Um outro fator relevante de renovação da história da ciência foi o reconhecimento por parte dos historiadores da importância da ciência como fator

histórico e cultural fundamental do desenvolvimento social. Ao lado disso, a história da ciência adquiriu o *status* de importante fator educacional. Neste quadro, estudos históricos começaram a ser incorporados às disciplinas científicas. Duhem chegou a afirmar que o método histórico era *o melhor meio, certamente talvez o único, a fornecer aos estudos de física uma correta e clara visão da complexa e viva organização desta ciência.*

Nas primeiras décadas do século XX, sobressai-se como grande nome da história da ciência o belgo-americano George Sarton (1884-1956), bastante influenciado por Comte e Tannery e com um projeto de história da ciência voltado para a crença em seu progresso contínuo. Sua importância também é muito grande na organização acadêmica dessa disciplina de acordo com uma série de premissas. As principais são as seguintes:

- a) O estudo do passado da ciência não tem um valor em si mesmo, mas só se justifica pela relevância para os assuntos atuais ou futuros.
- b) Ciência é conhecimento positivo, sistematizado e tanto sua aquisição como sistematização são atividades humanas que têm um caráter cumulativo e progressivo. A ciência do passado deve ser analisada de acordo com modernos padrões de progresso e racionalidade. É com base nesses padrões que pode ser determinado quando a ciência do passado é baseada em princípios realmente científicos ou é meramente uma pseudociência. Como exemplo Sarton recusava as teorias fisiológicas de Galeno, pois as considerava como fantasias especulativas.
- c) O desenvolvimento da ciência em princípio deve ser estudado como parte integral dos desenvolvimentos social e cultural, sendo que as condições sócio-econômicas não têm uma influência mais profunda na ciência. Ele é partidário de uma história da ciência mais internalista, tendendo a estudar a ciência como algo autônomo e isolado.

Muitos autores consideram que a maior contribuição de Sarton seja conferir ao historiador da ciência um *status* profissional e reconhecimento acadêmico, tendo sido um incansável propagandista dessa disciplina, unindo cientistas e outros profissionais em torno desses assuntos. Seu trabalho maior foi nos Estados Unidos aonde a história da ciência vinha sendo ensinada em muito poucas Universidades desde o fim do século XIX.

Avançando algumas décadas no século XX, vamos encontrar Alexandre Koyré (1892-1964) como uma espécie de pai de toda uma corrente de historiadores profissionais da ciência. Entre eles podemos citar Marshall Clagett, I. Bernard Cohen, A. Combrie, Marie Boas, C. Gillispie, Thomas S. Kuhn e Richard S. Westfall. Na França estão associados ao nome de Koyré os historiadores Pierre Costabel e René Taton. Sua influência também foi enorme tanto entre os franceses como entre os anglo-saxões.

O método de Koyré baseava-se em uma leitura atenta dos textos históricos do passado e a partir daí tentar captar os sistemas de crenças e dessa forma poder compreender e interpretar as razões de suas posições. Ele era um fiel rastreador da filiação das idéias e tentava a estruturação desses sistemas de pensamento para conseguir fazer com que seus leitores entrassem no mundo mental no qual viviam os cientistas. Ele aplicou este método a Galileu, Kepler e Newton, os nomes maiores ligados a Revolução Científica, mas também o faz com Paracelso ou mesmo Thomas Morus <sup>26</sup>.

Alexandre Koyré era judeu russo emigrado, e de cultura cosmopolita. Ele nasceu na Rússia, em Tanganrov. Começou sua educação secundária em Tíflis, em 1905, e por ter participado de algumas revoltas, o que era muito comum na Rússia de então, isto lhe valeu uma prisão como terrorista e perigoso propagandista político. Em 1912 radicou-se em Paris onde estudou com Henri Bérigson, que como Husserl, de quem também ele foi discípulo, levou a cabo uma campanha antipositivista.

O método historiográfico de Koyré foi forjado no ambiente francês dos anos vinte e trinta quando confluíam o antipositivismo e o historicismo com vistas a sistemas de pensamento distintos e descontínuos e que passaram a influir diretamente na ciência da época. Em linhas gerais o método de Koyré apresenta as seguintes características fundamentais:

- a) Seu caráter holístico. O pensamento científico não é uma parte independente e inseparável do sistema global de representação de uma dada época.
- b) Os sistemas de pensamento são descontínuos. Ele acreditava que a Revolução Científica fornecia os elementos para se concluir que os experimentos, as medições e as observações mais precisas permitiram a

---

<sup>26</sup> São os seguintes os trabalhos mais importantes de Koyré nos quais ele estuda a Revolução Científica [72]: “A Revolução Astronômica: Copérnico, Kepler, Borelli”; “Estudos Galilaicos”; “Nicolau Copérnico”; “Uma História Documentada do Problema da Queda de Kepler a Newton”; “Do Mundo Fechado ao Universo Infinito”.

matematização da natureza muito mais como uma conseqüência da mudança de mentalidade filosófica.

No fundo Alexandre Koyré era um idealista como historiador da ciência ao atribuir uma maior importância aos fatores de natureza subjetiva ao desenvolvimento científico, tais como os sistemas de pensamento, as crenças, as religiões, etc. Sua contribuição é, no entanto, fundamental e indispensável para quem se dedicar ao estudo da história da ciência.

Prosseguindo nossa trajetória ao longo do século XX, vamos encontrar Karl Popper como um dos mais influentes historiadores e filósofos da ciência. Ele nasceu em Viena em 1902. Na juventude foi marxista, e com o tempo vai se aproximando mais de uma posição social-democrata, embora na década de 40 estivesse ligado à corrente política e ideológica que deu origem ao neoliberalismo, como Hayek e seus seguidores<sup>27</sup>.

Foi professor secundário de física e matemática e com o tempo passou a se dedicar cada vez mais à filosofia. Fez oposição ao positivismo lógico do Círculo de Viena e Otto Neurath, membro do Círculo apelidou Popper de *oposição oficial*. Seu primeiro livro importante foi a *Lógica da descoberta científica*, publicado em 1934/35. Ele contém as idéias centrais daquilo que desde aquela época passou a ser visto como o núcleo central dos argumentos geralmente aceitos contra o positivismo lógico.

No período de 1937 a 1945 ensinou filosofia na Universidade da Nova Zelândia e dedicou-se a aprender grego por conta própria com a finalidade de se capacitar a estudar os filósofos gregos, em especial Platão. Logo em seguida escreveu: *A sociedade aberta e seus inimigos*. Este livro apareceu em 1945 e lhe deu enorme notoriedade e projeção no mundo de língua inglesa. No ano seguinte estabeleceu-se em definitivo na Inglaterra.

A contribuição fundamental de Popper, além de sua extensa obra em filosofia da ciência, é o seu critério de demarcação do que é ciência ou pseudociência e que ficou conhecido como critério da falseabilidade. Nele Popper oferece um critério para a solução do problema da indução colocado há muito tempo por Hume<sup>28</sup>.

Um outro lugar de destaque na história da ciência é ocupado por John Desmond Bernal. Físico de profissão, trabalhando no campo da cristalografia, ele escreveu um livro que fez bastante sucesso e até hoje é referência para muitos

---

<sup>27</sup> Como sabemos Frederik Hayek é o pai do neoliberalismo com o seu trabalho "O Caminho da Servidão", uma apologia do mercado. Eles formavam um grupo que a partir da Suíça passou a atacar a sociedade do bem-estar-social e toda forma de intervenção estatal.

<sup>28</sup> Para uma apresentação resumida das idéias de Karl Popper, ver [73], inclusive uma relação de todos os seus livros publicados em francês.



estudos. Trata-se da *História social da ciência* [63], com um conteúdo bastante abrangente do ponto de vista histórico e um dos poucos no gênero a adotar uma posição abertamente marxista.

Bernal nasceu na Irlanda em Maio de 1901 e morreu em Londres em Setembro de 1971. Dois de seus discípulos, Dorothy Hodgkin e Max Perutz conquistaram o prêmio Nobel. Ele foi membro da Royal Society e professor do Birkbeck College da Universidade de Londres e chegou a ser agraciado com o prêmio Lênin e a Medalha da Liberdade em Palma, nos Estados Unidos. Bernal tornou-se comunista em Cambridge, no início da década de vinte e foi um ardente defensor das idéias marxistas entre os cientistas. Um fato marcante em sua vida foi a atuação da delegação soviética que compareceu ao Congresso Internacional de História da Ciência e da Tecnologia, realizado em Londres em 1931. Naquele evento o famoso revolucionário russo Nikolai Bukharin defendeu com eloquência a tese segundo a qual a ciência deveria ser vista na relação com o desenvolvimento da produção, em contraposição às crenças da época da auto-suficiência da ciência.

Os livros mais influentes de Bernal são: *A função social da ciência*, publicado em 1939 e *Ciência na história*, saído em 1954. Eles tiveram uma ampla repercussão na Inglaterra e Rússia.

Um comentário de ordem geral ao trabalho de Bernal, é que ele exagera o papel desempenhado pela ciência; algo como se a ciência fosse o motor do progresso e que ela é uma espécie de farol que ilumina o caminho para o socialismo. As debilidades de suas análises se devem à época que ele viveu e escreveu, profundamente marcada pela guerra fria. Além disso, seu alinhamento político com o regime soviético já profundamente adaptado às razões de estado da burocracia estalinista, limitam e comprometem suas análises.

O último dos historiadores da ciência a ser mencionado neste item é Thomas Kuhn (1922-1996). Ele iniciou sua carreira universitária como físico teórico e as circunstâncias levaram-no ao estudo de história da ciência e a preocupações de natureza filosófica. Sua obra mais conhecida é *Estrutura das Revoluções Científicas*, publicado em 1962 [74]. Ele publicou ainda *A Revolução Copernicana*, em 1957 [75] e *A Tensão Essencial*, em 1977 [76], entre outros.

Sua contribuição fundamental e que é apresentada na primeira referência, está na discussão e no modelo por ele proposto para se analisar a substituição de uma teoria científica por outra, ou como ele denomina na mudança de paradigma científico. No modelo kuhniano o progresso científico é visto não como um acúmulo gradativo de conhecimentos e sim como um processo contraditório marcado pelas revoluções que

substituem a ciência tradicional, que ele chama de *ciência normal*, por um novo paradigma científico.

Poucos livros na história e filosofia das ciências causaram tanta polêmica nos meios científicos. Recentemente, em 2005, o biólogo alemão Ernst Mayr (1904-2005), lançou um livro de ensaios intitulado: *Biologia, Ciência Única*, no qual dedica algumas páginas a teoria kuhniana. Entre as críticas apresentadas Mayr ressalta: *A introdução de um novo paradigma de modo algum resulta invariavelmente numa imediata substituição do antigo. Como resultado, a nova teoria revolucionária pode existir lado a lado com a antiga; de fato, até três ou quatro paradigmas podem coexistir. Por exemplo, depois que Darwin propôs a seleção natural como mecanismo de evolução, saltacionismo, ortogênese e lamarckismo competiram com o selecionismo pelos oitenta anos a seguir. Foi só com a síntese evolucionista dos anos 1940 que esses paradigmas em competição perderam sua credibilidade.*

Em suma, muita cautela deve ser tomada em filosofia da ciência com as teorias ou modelos que tentam explicar o processo de mudanças e que resultam na substituição de uma teoria por outra. De forma análoga com os chamados critérios de demarcação (falseabilidade em Popper) e que tentam separar conhecimento científico de conhecimento não-científico ou pseudociência. Em ambos os casos muita investigação ainda deve ser feita no sentido de estabelecer os limites de validade desses modelos, a que tipo de ciência (ciências naturais, ciências históricas, etc) eles se aplicam para que de fato sejam úteis e possam ser incorporados à filosofia da ciência.

## **PARTE I: A GÊNESE CONCEITUAL**

## Capítulo 2: A Base Conceitual para o Estudo do Trabalho

A idéia

*“De onde ela vem? De que matéria bruta  
Vem essa luz que sobre as nebulosas  
Cai de incógnitas criptas misteriosas  
Como as estalactites duma gruta?*

*Vem da psicogenética e alta luta  
Do feixe de moléculas nervosas.  
Que, em desintegrações maravilhosas,  
Delibera, e depois, quer e executa.*

*Vem do encéfalo absconso que a constringe,  
Chega em seguida às cordas da laringe,  
Tísica, tênue, mínima, raquítica...*

*Quebra a força centrípeta que a amarra,  
Mas, de repente, e quase morta, esbarra  
No molambo da língua parálitica.”*

(Augusto dos Anjos, Eu e Outras Poesias)

### 2.1 O CARÁTER HISTÓRICO DA CONSTRUÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS

Em seu artigo: *O caráter histórico da adequação da matemática à física*, Michel Paty afirma: *Percorrendo-se através da história das ciências, vários casos marcantes de relações entre a física e a matemática, nos apercebemos que a capacidade do formalismo matemático em exprimir de uma maneira tão ajustada e fecunda os problemas físicos, não é um dado de natureza universal e intemporal. Ele resulta, em cada época, e para cada novo tipo de problema abordado, de uma construção, que coloca em jogo o “sistema” da matemática e da física dessa época e a natureza dos conceitos e das grandezas físicas envolvidas*<sup>1</sup>.

Ao analisarmos no presente capítulo a base conceitual na qual assenta o conceito de trabalho, fazendo-se uma decomposição em seus elementos básicos, o faremos em uma perspectiva histórica semelhante a esboçada por Paty na citação acima. Ela significa considerar que os conceitos da física e a utilização da matemática de forma tão fértil fazem parte de uma construção comum físico-matemática de caráter histórico. Depreende-se também da citação, que é necessário, para cada problema concreto da física, mobilizar o ferramental matemático disponível ou até mesmo

---

<sup>1</sup> Michel Paty trata especificamente do problema da adequação da matemática à física em dois artigos [77,78]. Ver também Petitot em [79].

desenvolvê-lo. Entendemos ainda que existe um aspecto constitutivo da matemática com respeito à representação do mundo físico.

Evidentemente, esta última afirmação não consta da citação, mas é o que podemos inferir da leitura do texto. Isto significa que a matemática não é uma mera linguagem de representação e de caráter operatório como alguns cientistas e filósofos têm afirmado. O que queremos dizer é que a matemática faz parte do conteúdo conceitual não sendo unicamente um sistema simbólico para fins de operação. Voltando novamente à citação, é importante assinalar que esta espécie de simbiose entre matemática e física está longe de ser um dado geral universal e independente do problema físico como se a matemática estivesse à disposição da física como sua fiel servidora. O que existe é uma complexa relação de construção conjunta condicionada historicamente.

A utilização e adequação da matemática à representação do mundo físico são ainda efetivas em momentos bem definidos e historicamente datados e se referem a formas e teorias matemáticas precisas, bem como a tipos de problemas físicos também bem definidos <sup>2</sup>. No campo que mais nos interessa discorrer que é o da mecânica racional é bem conhecido o fato de que o estudo das leis da mecânica se beneficiou enormemente da invenção do cálculo diferencial e integral feito alguns decênios antes pelo próprio Newton e de forma independente por Leibniz.

A formulação do cálculo das fluxões de Newton, saído dos resultados obtidos pelos estudos das séries infinitas, é ao mesmo tempo o estudo dos problemas do movimento de corpos considerados segundo métodos geométricos que também conduzem a este novo ramo da matemática [80]. Newton tinha consciência de como a física influía na construção dos conceitos da matemática ao afirmar no prefácio da primeira edição dos *Principia*:

*A geometria é fundada sobre a prática mecânica, e não é outra coisa senão esta parte da mecânica universal que propõe e demonstra exatamente a arte da medida* [81].

Para reforçar esta linha de argumentação, Paty também considera que os fundamentos do cálculo inventado por Newton a partir de 1666, utilizam grandezas matemáticas que são engendradas por um movimento contínuo ao qual ele opõe aos conceitos de grandezas infinitesimais.

É bem verdade que Newton não utiliza diretamente o cálculo diferencial em sua mecânica, o que somente veio a acontecer muito depois com Euler. É da autoria do

---

<sup>2</sup> Em [77] Michel Paty fornece vários exemplos da construção matemática de conceitos físicos tanto na mecânica clássica como na teoria da relatividade.

matemático suíço a forma matemática que conhecemos atualmente da segunda lei de Newton <sup>3</sup>.

Novamente Paty chama a atenção para o fato que as considerações feitas por Newton em suas *primeiras e últimas razões* e que abrem o livro I, *O movimento dos corpos*, são muito semelhantes ao que encontramos no cálculo das fluxões. E Michel Paty acrescenta: *A conceitualização das fluxões – sem o simbolismo – penetra por assim dizer esta geometria transformando-a em relação com a mecânica, o que em seguida será traduzido de uma maneira evidente pelo uso do simbolismo diferencial* [77]. Em outras palavras, a não utilização do cálculo em sua mecânica por Newton não é de todo verdade e faz parte de um processo um pouco mais complexo que Paty percebe e aponta com muita propriedade.

A formalização da mecânica que começa com d'Alembert, continua com Euler e tem o seu coroamento com Lagrange será apresentada em detalhes no capítulo 4. Ao lado dessas figuras de proa, Jacques e Jean Bernoulli além de Pierre Varignon aplicaram extensivamente o novo cálculo à mecânica.

Tratava-se realmente de um período de construção dos conceitos básicos da mecânica e serve de ilustração ao que foi afirmado anteriormente. Somente com a geração seguinte da qual fazem parte além de d'Alembert e Euler, Daniel Bernoulli e Aléxis Clairaut, é que teremos a plenitude e a universalização do cálculo diferencial e integral com imensas possibilidades de utilização na mecânica e na astronomia, alargando a exploração do sistema de mundo de Newton muito além dos limites dos estudos do movimento dos corpos. A construção e a vertente seguida por Euler pavimentam o caminho que levaria ao ápice e a formalização da mecânica por Lagrange, em 1788, com sua *Mecânica Analítica*.

Michel Blay, em seu trabalho: *La naissance de la mécanique analytique* [83], faz uma análise muito semelhante a nossa, após descrever o desenvolvimento da mecânica com a criação do cálculo diferencial e integral inclusive no que se refere ao papel da matemática na descrição do mundo físico. Assim, ele afirma: *A confrontação dos métodos leibnitzianos e varignonianos na segunda parte, nos mostrou de forma muito nítida que a conceitualização diferencial da ciência do movimento não deve ser interpretada como o resultado de uma simples transposição em termos diferenciais, dos conceitos e pontos de vista da ciência do movimento tal como eles se exprimiam precedentemente, mas antes como o resultado de uma verdadeira reconstrução conceitual que conduziu a uma reorganização do campo da ciência do movimento em*

---

<sup>3</sup> No trabalho intitulado: “Descoberta de um novo princípio de mecânica”, publicado em 1752 é que Euler apresenta as equações diferenciais representando a segunda lei de Newton. Posteriormente ele chamou essas equações de “os primeiros princípios da mecânica” [82].

*torno dos conceitos de velocidade em cada instante e de força aceleratriz em cada instante.*

Sobre o problema também discutido neste item da relação da matemática com a física, ele observa: *Por outro lado, de um ponto de vista mais geral, o trabalho conceitual varignoniano testemunha igualmente que as matemáticas têm com a física uma relação de constituição, melhor uma relação constituinte, pois ao examinar de perto este trabalho, na dinâmica de sua relação – podemos dizer também de sua interação – que se encontram engendrados os novos conceitos, na ocorrência aqui, da velocidade em cada instante e da força aceleratriz em cada instante.*

Um outro aspecto importante e que explicita o caráter histórico da formação dos conceitos e da construção de teorias, principalmente as teorias acerca do mundo físico, é o próprio desenvolvimento tecnológico. Como os conceitos e teorias têm que demonstrar sua capacidade explicativa e sua fecundidade diante dos fatos (fenômenos) emanados da física, eles necessitam de uma validação experimental e que em muitos casos só acontecem após um longo processo de aperfeiçoamento dos instrumentos e técnicas experimentais. É o caso da teoria da relatividade restrita que surgiu após ficar demonstrado experimentalmente a constância da velocidade da luz em qualquer referencial. Ao lado da construção ou reconstrução da mecânica clássica a partir deste fato, a teoria sobre o éter ficou em sérias dificuldades apesar das resistências.

Um outro exemplo marcante de como o aparato experimental interfere nas teorias e representações do real vêm dos modelos sobre a constituição da matéria <sup>4</sup>, as quais necessitam de sofisticados aceleradores de partículas e que também demandam tecnologias altamente rebuscadas do ponto de vista da informática. E por falar em informática, a utilização dos computadores no estudo das ciências físicas trouxe uma verdadeira revolução em termos conceituais. A descoberta do comportamento caótico [30] em sistemas determinísticos revolucionou as bases da mecânica clássica. Quando todos pensavam que os grandes progressos teóricos viriam da mecânica quântica ou da teoria da relatividade, quem sabe até uma unificação dessas duas teorias em novas bases, surpreendentemente é a mecânica de Newton que se revigora e se enriquece. Em decorrência das mudanças ocorridas, como por uma espécie de indução surgem novos conceitos como: fractais, atratores, o fenômeno da complexidade, etc. [86], e no bojo deste processo novas formas de

---

<sup>4</sup> Os experimentos com os aceleradores de partícula atuais conseguem explorar escalas de até  $10^{-18}$  m. Um novo colisor está sendo construído na fronteira da França com a Suíça e deverá penetrar mais fundo na matéria indo até  $10^{-19}$  m. Os cientistas esperam com isto obter resposta para uma série de lacunas existentes no chamado modelo padrão que reúne o conhecimento atual sobre as partículas fundamentais de matéria, bem como daquelas que transmitem força [84,85].

investigação e novas disciplinas científicas aparecem: a computação gráfica, a inteligência artificial e com essas novas ferramentas novas descobertas são feitas inclusive em geometria diferencial. É a própria base material da ciência que é revolucionada. Estes exemplos também só vêm corroborar aquilo que dissemos no primeiro capítulo sobre a teoria do conhecimento, ou seja, que o homem vai construindo historicamente novos instrumentos para explorar a natureza e que a aproximação em direção ao real se faz progressivamente (não continuamente nem linearmente) com um ritmo ditado pela sua capacidade de construir esses instrumentos.

Mas se a evolução dos conceitos da física está cada vez mais condicionada ao desenvolvimento tecnológico, ele não é o único fator neste processo. Essa evolução também depende do desenvolvimento de outros conceitos e outras teorias que eventualmente podem ser de importância capital para o progresso da física. Basta atentarmos para o fato de que a mecânica torna-se realmente fecunda com a aplicação do cálculo diferencial e integral. A facilidade que o formalismo do cálculo introduziu na mecânica após Euler é realmente impressionante. O sucesso da matematização da mecânica também *induziu* uma matematização extremamente fecunda nos fenômenos do calor, da luz, da eletricidade e do magnetismo, muito embora o projeto laplaciano de estender as leis de Newton a essas ciências tenha fracassado, como veremos no capítulo 4.

Conforme observaremos em seguida, os conceitos básicos ou elementares nos quais se apóia o conceito de trabalho, tiveram o seu desenvolvimento histórico, guardando evidentemente as suas especificidades, e sobre as quais colocaremos o foco de nossa análise nas próximas páginas.

## **2.2 A EVOLUÇÃO DAS CONCEPÇÕES DE ESPAÇO**

Nos limitaremos a apresentar as principais idéias acerca do espaço que estejam diretamente relacionadas com o conceito de trabalho. São elas principalmente as da geometria euclidiana e as visões que os fundadores da mecânica tinham deste conceito.

### **EUCLIDES (330- 260 A.C.)**

*Os Elementos de Geometria* de Euclides foram publicados por volta de 300 a.C., e tiveram, sem nenhuma sombra de dúvida, uma importância considerável em várias áreas do conhecimento, tendo até se tornado um paradigma do próprio



conhecimento. Para ressaltar sua importância, bastaria simplesmente acrescentar que tanto a mecânica newtoniana quanto a teoria da relatividade restrita ou especial utilizam o espaço euclidiano como parte essencial de suas teorias.

Antes que surgissem *Os Elementos*, a geometria não era uma ciência completamente sistematizada. O conhecimento geométrico dos povos mais antigos encontrava-se disperso e completamente desorganizado. Os egípcios, por exemplo, conheciam muitas verdades geométricas e como aplicá-las em muitos casos, mas desconheciam as relações lógicas que uniam essas verdades. Em outras palavras, a validação do conhecimento geométrico antes de Euclides se dava por uma via puramente empírica ditada pelas necessidades da vida cotidiana. Como sabemos o conhecimento dos egípcios foi adotado pelos gregos que também o desenvolveram em larga medida. Tales, por exemplo, trouxe para a Grécia o que tinha aprendido com os egípcios no século VII a.C. Foi nesse processo de passagem de conhecimento de outras culturas e no desenvolvimento realizado pelos gregos que começaram a se estabelecer as conexões lógicas no interior da geometria. Começou também a ficar claro que esse conhecimento repousava sobre princípios básicos. Euclides percebeu esta tendência e foi organizando as provas, classificando o material e adicionando suas próprias contribuições. Dessa forma ele chega a conclusão e prova em seus *Elementos* que todo conhecimento geométrico pode ser obtido pela via da dedução a partir de cinco postulados e deduções. Feita esta operação, toda a geometria estará contida nos axiomas donde derivam os teoremas <sup>5</sup>.

Essas observações preliminares nos permitem afirmar que o gênio de Euclides não está somente em descobrir que postulados são logicamente consistentes, mas principalmente encontrar quais são os cinco axiomas que conduzem ao resto da geometria. Muito posteriormente Hilbert mostrou, no final do século XIX que a geometria euclidiana pode ser deduzida através de 20 axiomas. Ele próprio adicionou mais um, o da completude. O que é importante observar é que mesmo nas formulações modernas, os cinco postulados de Euclides efetuam um grande número

---

<sup>5</sup> Leonard Mlodinov [87], pg. 49, resume da seguinte forma a contribuição de Euclides: “A mais importante contribuição de “Os Elementos” de Euclides foi o seu método lógico inovador: primeiro, tornar explícitos os termos, formulando definições precisas e garantindo assim a compreensão mútua de todas as palavras e símbolos. Em seguida tornar explícitos os conceitos apresentando de forma clara os axiomas ou postulados (esses termos são intercambiáveis) de modo que não possam ser usados entendimentos ou pressuposições não declaradas. Finalmente, deduzir as conseqüências lógicas do sistema empregando somente regras de lógica aceitas, aplicadas aos axiomas e aos teoremas previamente demonstrados.

de deduções, e que, devido à simplicidade, continuam a ser utilizados <sup>6</sup>. Além disso, o surgimento das geometrias não-euclidianas se faz através de uma crítica ao quinto postulado.

Em termos de teoria do espaço os *Elementos* apresentam os princípios básicos de sua teoria na forma de definições e postulados, os quais determinam um mundo abstrato que para o caso de duas dimensões determinam um plano. A partir daí ele passa a deduzir os teoremas e descobrir outras evidências que dão consistência a este mundo geométrico. Isto significa que as deduções são logicamente válidas e tanto os axiomas como os teoremas são consistentes.

Não sendo nosso objetivo submeter a geometria euclidiana a uma análise epistemológica que indagasse de sua consistência enquanto teoria, no entanto é importante discutir um pouco a preocupação fundamental de toda teoria, ou seja, em que medida a geometria euclidiana descreve adequadamente o mundo real.

Em primeiro lugar sendo os axiomas da geometria euclidiana um conjunto de proposições até certo ponto trivial, isto poderia nos induzir a pensar que essa teoria fosse falsa. Não é o caso. Muitos matemáticos e filósofos se debruçaram com afinco sobre esta questão e chegaram a conclusão da validade da geometria euclidiana em descrever corretamente o espaço físico. Isto remete à questão também fundamental de que evidências experimentais devem esta teoria apresentar além da coerência lógica interna. O passo seguinte será o de construir os experimentos a fim de testar as previsões da teoria.

Obviamente que ao submetermos a teoria euclidiana a um teste experimental ele deveria se fazer pelos teoremas. Por exemplo, o teorema dos *ângulos internos* de um triângulo. Deveremos encontrar um triângulo no espaço, medir seus ângulos internos e verificar se a sua soma é igual a dois ângulos retos conforme estabelece o teorema.

No começo de século XIX o matemático Karl Friedrich Gauss (1777 - 1855) realizou um tipo de experimento semelhante ao que estamos discutindo. Caberia a pergunta de por que isto não foi feito antes. Muito provavelmente porque até aquele momento ninguém seriamente considerou a possibilidade do espaço não ser euclidiano. No experimento montado por Gauss ele fez a hipótese natural que os raios

---

<sup>6</sup> Sobre a consistência lógica da geometria de Euclides ou mesmo de um sistema axiomático qualquer, a história em suas linhas gerais é a seguinte: Em 1903, o filósofo e matemático Bertrand Russel em seu livro "Princípios Matemáticos", sugeriu que toda a matemática deveria ser dedutível da lógica. Tentou mostrar como fazê-lo juntamente com Alfred Whitehead no livro "Principia Mathematica", em três volumes, publicado entre 1910 e 1913. Neste livro, os autores afirmaram ter reduzido toda a matemática a um sistema unificado de axiomas básicos dos quais todos os teoremas da matemática podiam ser demonstrados, de forma semelhante ao que Euclides tinha tentado fazer com a geometria. No entanto, em 1931, Kurt Godel demonstrou que em um sistema axiomático devem existir afirmações que não se pode demonstrar. Como um corolário deste famoso teorema, deve existir nos sistemas axiomáticos pelo menos uma proposição verdadeira que não pode ser demonstrada [88,89].

de luz viajam em linha reta no espaço e assim mediu os ângulos internos de um triângulo espacial cujos lados eram raios de luz. Isto foi feito montando o equipamento no topo de três montanhas, que seriam os vértices do triângulo, e realizou as medições. Gauss confirmou a hipótese euclidiana <sup>7</sup>.

### **DESCARTES (1596 - 1650)**

O filósofo francês René Descartes é muito conhecido por ter proferido a frase *cogito ergo sum* que quer dizer *penso logo existo*. A base fundamental de sua filosofia é a busca do conhecimento verdadeiro começando com a decisão de *duvidar de tudo que encontramos e que contenha a mínima suspeição de incerteza*. É o que podemos ler em: *Os princípios de filosofia* [91].

Do ponto de vista histórico, Descartes é o pai da filosofia moderna e responsável em grande medida pelo golpe de morte na filosofia medieval, teológica e dogmática por definição. A grande operação levada a cabo por ele foi, segundo Corbisier, o que se segue: *Que faz Descartes, seu fundador? (da filosofia moderna) Não parte da certeza, mas, ao contrário, da dúvida. Não aceita dogma algum, verdade alguma, que não possam ser submetidos à crítica, crítica da razão que, emancipando-se da tutela religiosa, e da alienação teológica, recupera a autonomia e o direito de constituir-se como instância última da verdade. O renascimento da filosofia implicava, como estamos vendo, a ruptura com o dogmatismo, ou, em outras palavras, esse renascimento estava condicionado à recuperação da liberdade, à reconquista do direito de pensar, de criticar, de discordar. A primeira providência, no procedimento cartesiano, consiste em retirar de sua crença todas as opiniões até então recebidas, a fim de recolocar na crença outras melhores, ou então as mesmas opiniões, desde que, devidamente modificadas ou "ajustadas ao nível da razão".*

A tese central da metodologia cartesiana é que o conhecimento é alcançado através de um ato da mente e não através da experiência: nós contemplamos várias idéias e usamos nosso poder mental para determinar o que é verdadeiro. Tal metodologia que é enfatizada por Platão e Leibniz é conhecida por racionalismo. A tese oposta, como sabemos, é o empirismo que encontramos em Aristóteles e especialmente em Berkeley e Mach, na qual somente a experiência fornece a base para um conhecimento verdadeiro.

Outra característica importante do pensamento de Descartes, para o estudo das concepções de espaço, é a distinção entre mente e matéria ou substância corpórea, entre aquilo que pensa e aquilo que preenche o espaço. Em última instância

---

<sup>7</sup> Para o estudo completo da obra de Euclides ver [90].

para ele todas as coisas exceto Deus são feitas dessas duas substâncias ou entendidas em termos delas. Este posicionamento de Descartes foi importante a sua época na medida em que as coisas da matéria poderiam ser objeto dos estudos científicos enquanto que a religião deveria se dedicar às coisas da mente, da alma, sem que o progresso conseguido pelo desenvolvimento científico interferisse no campo religioso.

Descartes acreditava que a característica essencial da matéria era a extensão em três direções. Ele rejeitava para a matéria atributos tais como a dureza, o peso, a cor e outras propriedades e que elas pudessem ser definidoras da mesma. Essa visão é importante para sua compreensão de espaço, pois para ele o espaço é pura extensão e ainda, espaço e matéria, são no fundo a mesma coisa. É desnecessário dizer que Descartes recusava a idéia de vácuo, pois está claro para ele que não poderia existir espaço vazio. Ainda segundo ele a geometria euclidiana descreve corretamente o espaço dessa forma concebido.

A contribuição fundamental de Descartes para o pensamento científico é, inegavelmente, a *Geometria*. Trata-se de sua primeira obra publicada, na qual ele reúne uma série de estudos, aos quais ele chama de *Ensaíos*. Isto no ano de 1637 quando ele já tinha 40 anos de idade. Inicialmente esta publicação tinha um título bastante longo e posteriormente ficou conhecida como *Discurso do Método*, acrescido da dióptrica, do estudo sobre os meteoros e da geometria, todos na forma de apêndices <sup>8</sup>.

### **NEWTON (1642-1727)**

É bastante frutífero do ponto de vista da compreensão do trabalho de Isaac Newton, compará-lo a Euclides, ou mais precisamente, comparar os *Principia* com os *Elementos*. Sendo os *Principia* a referência fundamental da mecânica clássica, publicado em 1687, enquanto que o livro de Euclides é a fonte da geometria clássica e foi publicado por volta de 300 a.C.

---

<sup>8</sup> A "Geometria" de Descartes é um livro de 87 páginas dividido em três partes: Livro primeiro - Problemas que podemos construir sem empregar senão círculos e linhas retas; Livro segundo – Da natureza das linhas curvas; Livro terceiro – Da construção de problemas que são sólidos ou mais que sólidos. Trata-se de um estudo de problemas de geometria convertendo-os em equações algébricas. Na página 3 Descartes descreve seu método: "Desse modo, querendo resolver qualquer problema, devemos de início considerá-lo como já feito, e dar nomes a todas as linhas que parecem necessárias para construir, bem como aquelas que são desconhecidas. Então, sem considerar nenhuma diferença entre essas linhas conhecidas e desconhecidas, devemos percorrer a dificuldade segundo a ordem que se apresenta o mais naturalmente de todos de forma que elas dependam mutuamente umas das outras, até que possamos encontrar um meio de exprimir uma mesma quantidade de duas maneiras, o que se chama equação; pois os termos de uma dessas duas maneiras são iguais aos da outra. E devemos encontrar tantas equações quantas linhas que estejam incógnitas" [92]. Ver ainda [93].

Euclides foi o grande sistematizador da geometria e Newton além de desempenhar este papel na mecânica, como ele deixa claro no prefácio de sua obra maior, também foi o descobridor da lei fundamental do movimento. Existem muitas semelhanças entre o livro de Newton e o de Euclides. Seus formatos são similares, sua apresentação na forma de definições e axiomas, seguidos de provas e proposições relativas a vários tipos de movimento, para o caso dos *Principia*. Suas lógicas também são comparáveis. Além de tudo, sem que isto seja um demérito para ambos, foram eles verdadeiros investigadores e seguidores de pistas deixadas por pensadores que lhes antecederam. Foi, no entanto o gênio criador de ambos o que permitiu o surgimento dessas duas novas ciências, a geometria e a mecânica clássica.

Do ponto de vista que mais nos interessa, que é compor um quadro das diversas visões de espaço, no sentido de entender o desenvolvimento desse conceito fundamental para a noção de trabalho mecânico, Newton se opõe abertamente à Descartes. Para ele matéria não se identifica com espaço e sua proposta alternativa é a noção de espaço absoluto e sua independência da matéria. Assim Newton atribui um *status* de verdadeiro tanto ao espaço absoluto, considerado por ele como infinito e ilimitado como as coisas distintas que ele contém.

Poderíamos reunir em duas características fundamentais as idéias de Newton acerca do espaço:

**a) Substancialismo:**

Newton considerava o espaço como sendo um objeto geométrico, exatamente como foi concebido por Euclides. Para ele o espaço era composto de pontos, coleção de pontos que compõem as linhas, superfícies e sólidos no sentido em que têm volume e não solidez, tudo como em geometria. Esses objetos geométricos são possíveis *lugares absolutos* para objetos materiais. Os pontos existem independentemente dos objetos materiais, pois as localizações existem antes que sejam ocupadas por objetos materiais.

O espaço é também absoluto no sentido de que ele existe mesmo que não haja nada nele contido já que não podemos pensar que o espaço não exista. Assim, a existência independente da matéria foi o primeiro sentido no qual Newton pensou o espaço absoluto<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Newton define espaço absoluto como: "O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. Espaço relativo é alguma dimensão ou medida móvel dos espaços absolutos a qual nossos sentidos determinam por sua posição com relação aos corpos, e é comumente tomado por espaço imóvel..." [81] pg. 45.

## b) Imutabilidade

Newton não somente acreditava que o espaço era distinto da matéria da mesma maneira que os objetos são distintos entre si. Assim, pontos, linhas, superfícies e sólidos existem e persistem através do tempo e permanecem do mesmo tamanho. O espaço absoluto é infinito, tridimensional, rígido como uma espécie de caixa euclidiana que existe e é imutável com o tempo.

Newton também elaborou o conceito de espaço relativo o que significa considerar a posição de um dado objeto em relação a um outro que lhe sirva como referência. Por exemplo, ao pilotar um avião devemos saber nossa localização relativa à rodovia. Em outras palavras, trata-se de definir um sistema de referência relativo a um dado objeto. Neste sistema de referência Newton introduz o conceito de movimento relativo <sup>10</sup>.

## LEIBNIZ (1646 - 1716)

Leibniz como Descartes pertencem à escola racionalista em filosofia. Assim, a geometria para ele era uma ciência que se inscrevia inteiramente no domínio da razão dispensando, portanto, qualquer experimentação para sua justificação. Os racionalistas, de uma maneira geral aplicaram este modelo a todo conhecimento e passaram a defender o ponto de vista que a partir de axiomas básicos era possível deduzir todos os fatos do mundo real.

Leibniz foi mais ousado e tentou uma proeza maior que a de Euclides. Ele defendeu a idéia de que era possível deduzir todo o conhecimento (não-matemático) de um axioma geral, denominado de *Princípio da razão suficiente* <sup>11 12</sup>.

Do ponto de vista de suas concepções de espaço, podemos dizer que sua visão de espaço era *relacional*, sendo o primeiro pensador a fornecer os argumentos básicos e as objeções às concepções de espaço e tempo absolutos defendidos por Newton. Segundo seus pontos de vista, o espaço não é uma substância absoluta e

---

<sup>10</sup> Newton assim distingue os movimentos absoluto e relativo: "Movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro; e movimento relativo, a translação de um lugar relativo para outro. Assim, em um navio que está navegando, o lugar relativo de um corpo é aquela parte do navio que o corpo ocupa... Mas repouso real, absoluto, é a permanência do corpo na mesma parte daquele espaço imóvel, no qual o próprio navio, sua cavidade e tudo que ele contém, se move... Uma vez que as partes do espaço não podem ser vistas ou diferenciadas uma das outras pelos nossos sentidos, usamos medidas perceptíveis por elas. Com efeito, das posições e distâncias das coisas a partir de qualquer corpo considerado imóvel, definimos todos os lugares, e, então, com relação a tais lugares, estimamos todos os movimentos, considerando os corpos como transferidos de alguns destes lugares para outros. Assim, em vez de lugares e movimentos absolutos, usamos os relativos, e isto sem qualquer inconveniente prático..." [81] pg. 45.

<sup>11</sup> Este argumento foi reforçado pela publicação do livro de B. Russel em 1900 sobre a filosofia de Leibniz. Nele o autor defendia a tese que a filosofia de Leibniz era praticamente toda derivada de sua lógica [94].

<sup>12</sup> Segundo Ross: "A abordagem de Leibniz foi tentar reconciliar as tradições lógica, retórica e matemática ao reunir suas três ênfases distintas (no formalismo, na propriedade linguística e na matematização) numa visão única de uma linguagem formal de notação matemática [95]".

sua concepção de espaço relacional é *uma ordem de coexistência* ou uma *situação de corpos entre eles mesmos*<sup>13</sup>. Em outras palavras: em um sistema de referência relativo, podemos determinar as posições relativas de todos os corpos a partir de um deles tomado como referência. Mas qualquer objeto pode, em princípio servir como referência, de forma que coletivamente podemos ter uma coleção de objetos com varias distâncias relativas a um outro. Como exemplo ele diz que podemos ter o sol ou a terra como sistemas de referência para os planetas, sendo isto diferentes maneiras de descrever as distâncias relativas entre todos eles.

*de corpos entre eles mesmos*<sup>13</sup>. Em outras palavras: em um sistema de referência relativo, podemos determinar as posições relativas de todos os corpos a partir de um deles tomado como referência. Mas qualquer objeto pode, em princípio servir como referência, de forma que coletivamente podemos ter uma coleção de objetos com varias distâncias relativas a um outro. Como exemplo ele diz que podemos ter o sol ou a terra como sistemas de referência para os planetas, sendo isto diferentes maneiras de descrever as distâncias relativas entre todos eles.

Leibniz apresenta ainda uma visão oposta a de Newton e segundo a qual o espaço é uma *substância* separada da matéria. Segundo sua visão relacional sem matéria não pode existir uma *situação de objetos* e assim um espaço relacional. Existem diferenças essenciais entre o pensamento de Leibniz e o de Descartes. Muitas delas discutiremos em detalhes tanto neste como no capítulo seguinte.

É importante assinalar que algumas das idéias de Leibniz foram retomadas por Mach em sua crítica ao movimento absoluto, de sorte que ele pode perfeitamente ser considerado como um precursor da mecânica não-newtoniana. Também como sabemos Leibniz polemiza com Newton sobre a criação do cálculo infinitesimal, tendo esta disputa se tornado uma das mais célebres querelas científicas. Finalmente, Leibniz tem importante e fundamental contribuição à construção da base conceitual da mecânica clássica e a este assunto retornaremos quando formos discutir o conceito de força.

Tendo apresentado de forma muito sucinta as visões e contribuições dos fundadores da mecânica com relação ao conceito de espaço, não poderíamos deixar de nos referir a uma mudança em profundidade nessas concepções ocorrida no século

---

<sup>13</sup> Segundo Daniel Garber, pg. 302 de [94], em seu artigo: "Leibniz physics and philosophy", podemos ler: "Leibniz estava interessado na noção de espaço em seus primeiros escritos. Assim, existe uma forte sugestão em alguns desses escritos que ele pensava o espaço como algo distinto do corpo. Em seus escritos de maturidade ele claramente nega a realidade do espaço independente, particularmente em oposição a forma específica como era apresentada pelos escritos de Newton".

<sup>13</sup> Segundo Daniel Garber, pg. 302 de [94], em seu artigo: "Leibniz physics and philosophy", podemos ler: "Leibniz estava interessado na noção de espaço em seus primeiros escritos. Assim, existe uma forte sugestão em alguns desses escritos que ele pensava o espaço como algo distinto do corpo. Em seus escritos de maturidade ele claramente nega a realidade do espaço independente, particularmente em oposição a forma específica como era apresentada pelos escritos de Newton".

XV. Ela veio das novas formas de representação do espaço por parte de alguns artistas renascentistas e que estão na base das novas teorizações acerca do espaço<sup>14</sup>. Embora, em contextos diversos, mas ambos analisando a Revolução Científica do século XVII, Alexandre Koyré<sup>15</sup> e René Thom<sup>16</sup> também confirmam e ressaltam a importância que elas tiveram para o desenvolvimento da mecânica newtoniana.

### 2.3 A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE TEMPO

Muitos estudos históricos e antropológicos têm mostrado que nossas concepções de tempo sofrem consideráveis mudanças ao longo da história. Isto tem se refletido na linguagem dos povos e em especial tem sido demonstrado pelas visões diferenciadas que as populações têm sobre as noções de passado, presente e futuro.

Estudos no campo da psicologia do conhecimento encontraram uma forte interação entre a origem do conceito de número, a origem da linguagem e o modo como nossas mentes trabalham a noção de tempo.

O que parece claro é que as formas sociais de organização, os sistemas de crenças e outros fatores culturais afetam nossa maneira de sentir e entender o tempo. Muitos estudiosos têm afirmado que nossa concepção linear de tempo, como algo se estendendo em linha reta até um passado e futuro infinitos, foi profundamente influenciada por nossa herança judaico-cristã. No judaísmo antigo não havia ciclos cósmicos. Deus tinha criado o mundo a partir do nada e após seis dias descansou. Por

---

<sup>14</sup> Pierre Thuillier afirma: “Foi em Florença, no início do século XV(Quattrocento) que pintores e arquitetos formularam a primeira teorização da perspectiva, teorização que teria mais tarde inúmeras repercussões sobre o pensamento científico. Ela não só tornará possível a geometria projetiva, como “preparava” o conceito de espaço sobre o qual se apoiaria a mecânica clássica. A geometrização do espaço deve ser compreendida do ponto de vista histórico, em relação a um contexto sócio-cultural extremamente rico” [96].

<sup>15</sup> Alexandre Koyré caracteriza a Revolução Científica do século XVII da seguinte forma: “Portanto, caracterizarei essa revolução por dois aspectos estreitamente ligados e até complementares: a) a destruição do cosmos e, por conseguinte, o desaparecimento, na ciência – pelo menos em princípio, embora nem sempre de fato – de todas as considerações baseadas nesse conceito; e b) a geometrização do espaço, isto é, a instauração do espaço dimensional homogêneo e abstrato – por mais que ele hoje seja considerado real – da geometria euclidiana em substituição ao continuum posicional concreto e diferenciado da física e da astronomia pré-galileanas. [97]”.

<sup>16</sup> René Thom afirma: “Creio, com efeito, que na origem da Revolução Galileiana esteve simplesmente o fato de que o espírito científico se encontrou em posição de modelar, graças precisamente à noção de função, um certo número de fenômenos, que até então não eram modelados de modo suficientemente fiel. A meu ver, dois fatores agiram conjuntamente: por um lado, uma série de necessidades práticas, penso, sobretudo na artilharia, que levava a estudar a trajetória das balas de canhão, dos projéteis, e, portanto do movimento dos graves; por outro, a noção de função, que começava a germinar no espírito dos investigadores e lhes permitiu descrever, com exatidão e fidelidade, precisamente a trajetória de um grave. Penso, pois, que a formação desta imagem de função – e digo imagem, porque função é aqui mais uma imagem do que um conceito – foi o que deu origem à grande Revolução Científica galilaica” [98].



outro lado, as concepções de tempo cíclicas, parecem sofrer influência direta das formas de produção econômica baseadas na agricultura onde as colheitas se fazem obedecendo a períodos determinados.

De qualquer modo, independente do peso maior ou menor que os fatores de organização social possam ter sobre as visões de tempo em cada sociedade é possível traçar pelo menos em linhas gerais, mudanças significativas nessas visões no curso da história.

Mesmo nas sociedades mais primitivas o homem já adquire uma idéia transicional de tempo enquanto fluxo e de sua inexorabilidade, pelo menos em relação ao nascimento e morte. Certos rituais, que surgem nessa época têm a finalidade de, no terreno da mágica, interromper este fluxo incessante. Indícios da realização de rituais de funeral aparecem desde o homem de neandertal há cerca de 60 mil anos.

Durante o império Romano, surgiram concepções interessantes de tempo que devem ser destacadas pela sua influência posterior. Uma delas é a que é expressa por Lucrécio (94-55 a.C.) em seu poema *De rerum natura*:

*De modo similar, o tempo por si mesmo não existe; mas das próprias coisas resulta um sentido do que já ocorreu, do que está ocorrendo e do que deve se seguir. Não se deve afirmar que alguém seria capaz de perceber o tempo em si mesmo, isolado do movimento das coisas ou de sua tranqüila imobilidade.*

Lucrécio já coloca o aspecto relacional do tempo o que nos parece bastante moderno para a época, onde predominava uma forte resistência à mudança e uma veneração excessiva à autoridade. No entanto Lucrécio é profundamente influenciado pelo epicurismo e pelos filósofos gregos pré-socráticos sendo muito difícil identificar claramente em seu pensamento as origens dessas influências <sup>17</sup>.

Uma corrente filosófica importante e que tem uma visão contrária a do tempo linear de natureza judaico-cristã é o estoicismo. Embora os primeiros estóicos tenham sido gregos, o estoicismo tornou-se uma doutrina muito difundida entre os romanos. O estoicismo foi fundado por Zenão de Cítio, que não deve ser confundido com Zenão de Elea, por volta de 300 a.C. Sua característica fundamental era uma visão cíclica dos acontecimentos. Os eventos estavam fadados a se repetir em ciclos interminavelmente recorrentes. Ainda segundo eles, ao fim de cada ciclo todo o cosmos seria destruído num imenso incêndio para depois ressurgir outra vez. Dentro desta cadeia de fatalidades somente o que havia de livre era a vontade humana.

---

<sup>17</sup> Marcel Conche descrevendo a influência de Epicuro sobre Lucrécio afirma: "Ele condensa, desenvolve, enriquece, negligencia, organiza de uma outra maneira os pensamentos de Epicuro, lhes dá uma vida nova"...[99]

Como é do nosso conhecimento, não houve progresso científico relevante durante o império Romano. A situação começou a mudar pelas mãos dos árabes, cuja contribuição ao desenvolvimento da ciência é extraordinário. Por volta do século IX muitos trabalhos científicos e outros de caráter mais aplicado do período helenístico começaram a ser traduzidos para o árabe. É o caso do famoso livro de Ptolomeu, o *Almagesto*.

Bagdá passa a desempenhar o papel que Alexandria tinha na antiguidade em termos de centro produtor e irradiador do conhecimento. O legado deixado pelos gregos, combinado com tradições iranianas e indianas foi sendo assimilado e aprofundado pelos árabes e começou a difundir-se por outras partes do mundo islâmico, inclusive no sul da Itália, na Espanha moura onde Córdoba e Toledo eram os principais centros do conhecimento em torno do século XII. E é precisamente nessa época que instrumentos para medir o tempo começam a tornar-se necessários.

Os muçulmanos já vinham desde algum tempo requisitando pessoas com conhecimento de matemática e que fossem capazes de determinar através da astronomia os momentos de prece e a direção de Meca a criar um instrumento para tal. Naquela época o principal aparelho usado pelos astrônomos árabes era o astrolábio. Com ele era possível calcular a posição das estrelas fixas em relação ao horizonte e ao sol, da lua e dos planetas em relação às estrelas. No entanto, seu uso mais importante era a determinação da hora do dia ou da noite a partir da observação da altura do sol, ou de uma das estrelas mapeadas, embora o resultado não fosse muito preciso. Os outros instrumentos para medição do tempo, nessa época, eram os relógios de água cuja maquinaria básica remontava a Arquimedes.

O que é importante ressaltar é que a real dificuldade que se tem na Idade Média em se fazer uma avaliação mais precisa do tempo deve-se ao desaparecimento técnico da sociedade de então problema esse que só encontraria uma solução com o próprio desenvolvimento e o desenrolar da Revolução Científica que dava os primeiros passos. As dificuldades eram imensas. Os relógios de água eram raros, caros e somente funcionavam em algumas cidades da Europa.

Embora ainda contenha pontos obscuros, a origem do relógio mecânico pode ser situada por volta do final do século XIII. Muito provavelmente um dos estímulos mais fortes para o seu desenvolvimento tenha sido a necessidade de impor uma maior disciplina nos mosteiros. A pontualidade nos atos religiosos era uma virtude cultivada e exaltada e sua desobediência punida com severidade.

Além dessas motivações de cunho religioso, a grande expansão do comércio marítimo exigia métodos de navegação cada vez mais precisos. A medição da latitude podia ser feita com facilidade pelos métodos astronômicos tradicionais desde os

fenícios, ou até em épocas anteriores. Quando a partir do século XV os navios passaram a cruzar os oceanos com mais freqüência, a determinação da longitude tornou-se cada vez mais imperiosa. Só existiam duas possibilidades para isto: a primeira consistia em uma previsão astronômica de tal ordem de magnitude que era impossível com os instrumentos de então; a segunda era através de um relógio de bordo.

Por volta de 1530 é que o relógio mecânico passou a ser considerado como alternativa possível. O problema é que os modelos dessa época, baseados no movimento de um volante e de um escape circular não forneciam medições precisas. O passo fundamental na obtenção de um relógio preciso foi dado com a idéia do pêndulo como peça de controle de seu mecanismo. Em 1581, Galileu observou a regularidade das oscilações de um pêndulo para pequenos arcos de deslocamento. Em 1641, voltado para as inúmeras aplicações que um tal instrumento teria, ele desenhou um relógio de pêndulo que somente foi construído parcialmente depois de sua morte <sup>18</sup>.

Nessa mesma época, Huygens (1629-1695), na Holanda, introduziu uma série de modificações no relógio de pêndulo até conseguir uma versão bastante aperfeiçoada <sup>19</sup>. Contudo, até 1726, persistia a dificuldade de construir um relógio de pêndulo que conseguisse se mover com regularidade dentro de um navio. Surge então um método mais promissor baseado na corda com mola e que havia sido inventada por Robert Hooke (1635-1703), também preocupado com os problemas colocados pela navegação. No entanto, os desenvolvimentos e trabalhos subseqüentes de Huygens e Hooke não apresentaram uma solução satisfatória.

Somente com a intervenção de governos e personalidades que começaram a oferecer prêmios para a solução do problema de um relógio de precisão embarcado, é que foi encontrada uma solução. Em 1714, o governo inglês ofereceu um prêmio que variava de 10 a 20 mil libras dependendo do grau de precisão obtido pelo aparelho fabricado. Deve ser acrescentada uma dificuldade adicional que tal relógio deveria

---

<sup>18</sup> Viviani, discípulo de Galileu, escreveu em 1659: "Um dia em 1641, enquanto eu estava morando com ele em sua vila em Arcetri, lembro que a idéia ocorreu a Galileu de que o pêndulo podia ser adaptado como relógio com pesos ou molas, servindo no lugar do usual instrumento... Mas porque ele estava privado da visão e impossibilitado de desenhar e construir modelos para determinar qual aparelho podia melhor se ajustar com relação ao efeito desejado e seu filho Vincenzio vindo um dia de Florença para Arcetri, Galileu deu-o esta idéia e várias discussões se seguiram. Finalmente ele decidiu com o esquema mostrado nos desenhos que acompanhavam, colocar em prática e aprender o fato de que aquelas dificuldades em máquinas as quais usualmente não são previstas com uma simples teorização". Ver [100] pg. 419.

<sup>19</sup> Sobre a contribuição de Huygens à construção dos relógios, principalmente os relógios portáteis: "Antes de abordar esta comunicação, devo precisar que, bem entendido, existem em um relógio moderno duas molas em forma de espiral; uma grande mola motora, que põe a máquina em movimento e uma muito pequena, ligada ao balancim. É esta última, chamada também de espiral reguladora, que nós nos ocupamos agora, pois é nela que reside a invenção de Huygens". Mais adiante o autor afirma: "A invenção da espiral reguladora data de 20 de janeiro de 1675". Ver [101] pg. 153.

superar que era a manutenção da precisão para variações significativas de temperatura. Uma solução satisfatória para o problema do relógio de bordo só foi obtida em meados do século XVIII por Harrison (Inglaterra), Le Roy (França) e Berthoud (Suíça), de forma independente e com poucos anos de diferença entre si. O primeiro ganhou o prêmio do governo britânico, mas os desenvolvimentos posteriores seguiram o caminho apontado por Le Roy em 1766. Nas décadas de 80 e 90 do século XVIII, um modelo suficientemente preciso de relógio passou a ser fabricado dando um novo impulso à navegação e colocando-a em outra era.

Em épocas mais recentes, o desenvolvimento da ciência coloca problemas novos ao conceito de tempo. Em primeiro lugar, o segundo princípio da termodinâmica, que tem origem com o trabalho de Sadi Carnot de 1823, vai estabelecer um sentido para o tempo<sup>20</sup>. Isto significa que determinados processos que ocorrem na natureza são irreversíveis e o segundo princípio da termodinâmica coloca um sentido para a flecha do tempo. Esta assimetria só teve sua justificação teórica com a segunda lei ou o segundo princípio, pois as equações de movimento de Newton são simétricas com relação a passagem do tempo. Não existe sentido preferencial para a flecha do tempo nas equações de Newton.

O segundo fato de extrema importância para as nossas concepções de tempo ocorre com o surgimento da teoria da relatividade restrita, em 1905 [27]. A observação de que a velocidade da luz era constante em qualquer sistema de referência, acarretou uma reformulação nas leis da mecânica clássica e a partir daí foi-se abandonando o conceito de tempo absoluto.

Apesar de tudo, tanto a mecânica clássica quanto a mecânica quântica continuam a admitir um tempo reversível. Finalmente, é importante observar que estudos recentes em dinâmica de sistemas dissipativos, a teoria do caos, o conceito de complexidade com aplicações não só nas ciências da natureza, coloca novas questões relativas ao tempo<sup>21</sup>.

---

<sup>20</sup> Michel Paty em [102] faz a seguinte observação sobre o segundo princípio da termodinâmica descoberto por Sadi Carnot: "Não é a física-matemática, desenvolvida então sobre os fenômenos do calor por Laplace, Poisson, Fourier, que determina o nascimento da nova ciência, mas essa observação de Carnot de que a produção de movimento nas máquinas a vapor é devida "não a um consumo real do calórico, mas a seu transporte de um corpo quente a um corpo frio". Disso resultou o segundo princípio da termodinâmica".

<sup>21</sup> Prigogine é bastante explícito a este respeito ao afirmar: "Nós sabemos que a concepção newtoniana da ciência moderna se colocava sob a proteção de um deus todo-poderoso, garantidor supremo de uma racionalidade que data da monarquia absoluta. Nesta perspectiva, que atribui à onisciência a um deus que dita as leis da natureza, o tempo não poderia ser outra coisa senão uma ilusão. É nesta medida que podemos afirmar que nossa época está em vias de redescobrir o tempo. Mas de início, coloquemos a questão de saber como, no início do século XX, podemos conceber a relação entre o tempo histórico, irreversível, e o tempo físico, reversível. É interessante notar que havia um certo consenso. Grandes pensadores como Einstein, Bergson ou Heidegger, a despeito de suas diferenças, compartilhavam a idéia que um tempo irreversível não é e não pode ser o objeto de uma ciência verdadeira". Ver [103].

## 2.4 O CONCEITO DE FORÇA E SUAS CONTROVÉRSIAS

Se nos dias de hoje possa parecer estranho discutir-se o conceito de força, ao tempo de Newton e até muitos anos depois este tema foi motivo de acalorados debates e famosas controvérsias. Com o sucesso da mecânica de Newton em resolver problemas, em especial com a utilização do cálculo diferencial e integral, com a forma que a segunda lei do movimento tomou com Euler e finalmente com a formalização proposta por Lagrange, o conceito newtoniano de força se estabeleceu até bem recentemente e só foi abalado com a teoria da relatividade geral, em 1916.

A questão central e o questionamento fundamental ao conceito de força à época de Newton provinha da idéia da atração universal a distância proposta por ele nos *Principia*. Este conceito foi seriamente colocado em causa principalmente pelos Cartesianos, entre os quais d'Alembert. A recusa dos Cartesianos em aceitar uma força que se propagasse a distância, repousava fundamentalmente em seu caráter misterioso e até metafísico na forma como se dava esta ação, inexplicável para o próprio Newton. Até ele estava convencido de que não tinha solucionado completamente o problema pelo fato de não ter encontrado a causa desta força a distância <sup>22</sup>.

Contudo, a crítica ao conceito de força tinha raízes mais profundas além de conter elementos e heranças mais antigas que remontam a antiguidade indo até Aristóteles. Como sabemos o grande filósofo grego não aceitava a idéia do vazio. Em outras palavras, se era verdade que uma força podia se propagar à distância, no entanto ela necessitava de um meio que a conduzisse do ponto de partida ao ponto de chegada. Daí o surgimento de outras concepções voltadas para explicar o movimento dos planetas em torno do sol, bem como as diversas teorias sobre os meios que preenchiam o espaço. Essas teorias e idéias deram impulsos a estudos que seguiram em várias direções. As idéias sobre o éter impulsionaram estudos em mecânica dos fluidos que por sua vez influíram na construção da teoria do eletromagnetismo e na moderna teoria dos campos <sup>23</sup>. Um golpe mortal contra a teoria do éter foi desferido

---

<sup>22</sup> Sobre este problema Newton assim se expressa: “Mas, até aqui, não pude descobrir a causa dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e não invento hipóteses”. Ver [97] pg. 312.

<sup>23</sup> Segundo Harman: “Enquanto Thomson desenvolveu uma teoria de um éter contínuo como uma materialização física do pleno de força de Faraday, Maxwell explorou as implicações geométricas das linhas de força, e também desenvolveu um modelo físico do éter de partículas para representar a transmissão da ação no campo através das partículas contíguas do éter”... Mais adiante o autor afirma: “A suposição da elasticidade do meio magneto-elétrico permitiu a extensão da teoria para a eletrostática, com as tensões elásticas do éter mecânico correspondendo ao campo eletrostático, e assim completou a teoria mecânica de campo de Maxwell. A teoria teve uma implicação inesperada. Maxwell calculou a velocidade das ondas transversais elásticas correspondendo a propagação de um deslocamento elétrico no meio magneto-elétrico e encontrou que as ondas elásticas transversais eram transmitidas com a mesma velocidade das ondas luminosas. Ele concluiu: “a luz consiste em ondulações transversais do mesmo meio o qual é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos”. Ver [104] pg. 84 e 93.

por Einstein em 1905 com a teoria da relatividade e as experiências que a precederam e a embasaram. No entanto os fatos são obstinados e a história das ciências reserva surpresas inquietantes. Os estudos mais recentes em cosmologia e os dados enviados a terra pelo telescópio Hubble mostraram a existência no universo de uma matéria e de uma energia escura recolocando a questão de um meio sutil preenchendo o espaço intergaláctico. Novamente a teoria do éter vem à baila revigorada pelas evidências experimentais embora se reapresente com uma nova roupagem.

Voltando ao centro das polêmicas sobre a questão da força, além da severa crítica dos Cartesianos ao conceito de força apresentado por Newton, um outro personagem muito conhecido também o criticava. Era Leibniz. Ele questionava tanto Newton como os próprios Cartesianos. Conforme já mencionamos anteriormente, ele foi o primeiro a colocar em causa o movimento absoluto além de ter apresentado idéias extremamente originais sobre o conceito de força, como veremos em seguida. A crítica que Leibniz fazia aos Cartesianos e em especial a Descartes é mais uma das célebres controvérsias científicas. A questão versava sobre que quantidade se conservava no movimento, se a quantidade de movimento ou a força viva, denominada de *vis viva*, e que mais tarde viria a se chamar de energia cinética, com a adição do  $\frac{1}{2}$  feito por Coriolis. Descartes afirmando a conservação da quantidade de movimento e Leibniz da *vis viva*<sup>24</sup>.

É importante também ressaltar a discordância de d'Alembert, como bom cartesiano, do conceito de força de Newton, indo até um pouco mais além e propondo em seu *Tratado de dinâmica*, publicado em 1743 [106] uma outra forma de resolver o problema geral do movimento de um sistema de partículas, o que viria a ser conhecido como o princípio que tem o seu nome.

Consideramos também muito oportuno, abrir um breve parêntese, sobre o famoso princípio de d'Alembert. O que se observa da leitura dos livros-texto de mecânica é um abandono do que aconteceu historicamente com o estabelecimento deste princípio. Todos os livros-texto, sem exceção, apresentam duas impropriedades fundamentais. A primeira é não levar em conta que existiam diferentes concepções de força entre d'Alembert e Newton. A segunda é considerar que d'Alembert utilizou a formulação matemática da segunda lei de Newton para transformar um problema de movimento em um problema de estática ao considerar uma força fictícia atuando sobre a partícula e assim obter uma equação de equilíbrio. O princípio de d'Alembert é

---

<sup>24</sup> Nos "Escritos de Dinâmica", referência [105] pg. 3, podemos encontrar a posição de Leibniz com relação a questão da conservação da energia cinética (*vis viva*) na famosa polêmica com Descartes que postulava a constância da quantidade de movimento no universo.

completamente diverso do que é apresentado pelos livros [107]. Em nossa bibliografia estão indicadas referências que elucidam o problema colocado.

Voltando ao centro do debate entre d'Alembert e Newton, podemos ler no *Tratado de Dinâmica*:

*Assim, eu proscreei inteiramente as forças inerentes aos corpos em movimento, seres obscuros e metafísicos, que não são capazes senão de trazer as trevas sobre a ciência clara por ela mesma... E discorrendo como estimar as forças que atuam sobre um determinado corpo ele acrescenta:*

*É unicamente pelos obstáculos que um corpo encontra e pela resistência que lhe oferecem... Mais obstáculos que um corpo pode vencer ou que ele possa resistir... mais se pode dizer que a força é grande... E não é então senão no equilíbrio ou no movimento retardado que devemos procurar a medida (das forças)... Então no equilíbrio o produto da massa pela velocidade, ou, que é a mesma coisa, a quantidade de movimento, pode representar a força.*

Fica claro que o quadro conceitual de d'Alembert é bem diferente do de Newton. A questão da força é o centro de toda controvérsia e sua concepção de força se aproxima e às vezes se confunde com a própria quantidade de movimento. Para Newton a força é bem distinta da quantidade de movimento sendo ela exatamente quem vai provocar uma variação na quantidade de movimento que o corpo possui. Newton relaciona nos *Principia* a ação das forças com os movimentos que elas produzem sendo a partir delas que é possível identificar os movimentos absolutos e relativos: *As causas pelas quais os movimentos verdadeiros e relativos são diferenciados um do outro, são as forças imprimidas sobre os corpos para gerar movimento. O movimento verdadeiro não é nem gerado nem alterado, a não ser por uma força imprimida sobre o corpo movido; mas o movimento relativo pode ser gerado ou alterado sem qualquer força imprimida sobre o corpo.*

É nesta discussão que Newton apresenta a famosa experiência na qual um recipiente com água é suspenso por uma corda e girado em torno de seu eixo vertical para que o movimento da água seja observado. Newton assim se refere à experiência: *Se um recipiente, suspenso por uma longa corda, é tantas vezes girado, a ponto, de a corda ficar fortemente torcida, e então enchido com água e suspenso em repouso junto com a água; a seguir, pela ação repentina de outra força, é girado para o lado contrário e, enquanto a corda desenrola-se, o recipiente continua nesse movimento por algum tempo; a superfície da água, de início, será plana, como antes de o recipiente começar a se mover, mas depois disso, o recipiente, por comunicar gradualmente o seu movimento à água, fará com que ela comece nitidamente a girar e a se afastar pouco a pouco do meio e a subir pelos lados do recipiente,*

*transformando-se em uma figura côncava (conforme eu mesmo experimentei) e quanto mais rápido se torna o movimento, mais a água vai subir, até que finalmente, realizadas suas rotações nos mesmos tempos que o recipiente, ela fica em repouso relativo a ele.* Como existe força atuando sobre o recipiente exercida pela corda ao se desenrolar, vai existir um movimento absoluto da água, embora no movimento relativo desta em relação ao recipiente ela possa se mover ou ficar em repouso, como observa Newton. Este experimento tem dois propósitos: - Mostrar a necessidade do espaço absoluto como a melhor forma de observar as forças de inércia sobre o fluido; - Contestar o modelo de gravitação proposto por Descartes, segundo o qual o movimento de rotação em torno do sol, da matéria da qual o céu é feito, é que mantém os planetas em suas órbitas. Descartes faz uma analogia com os vórtices gerados pela água escoando em torno de determinados objetos cujas velocidades são maiores perto deles e menores quando deles nos afastamos. Era o que acontecia com o movimento dos planetas em torno do sol.

No período de 1680 a 1690, ou seja, ao mesmo tempo em que Newton elaborava sua obra máxima estabelecendo as leis gerais para o movimento dos corpos, Leibniz desenvolvia idéias muito originais e interessantes acerca da força e do movimento. As abordagens que ele faz sobre o conceito de força são completamente diferentes e até opostas as de Newton. Se o conceito de força em Newton é algo externo, atuando a partir de fora, em Leibniz a força é uma espécie de qualidade inerente ao próprio corpo. Uma outra diferença marcante entre ambos é que a mecânica de Newton se desfaz de toda metafísica, embora o conceito de força a distância envolvesse algumas dificuldades em seu entendimento o que fizesse muitos pensarem em uma explicação metafísica. Em Leibniz o conceito de força está eivado de metafísica, o que em nada diminui sua contribuição à construção da base conceitual da mecânica.

Leibniz usa os conceitos de forças primitivas e derivativas sendo que cada um destes dois tipos pode ser subdividido em ativa e passiva<sup>25</sup>. Assim podemos ter forças primitivas, ativas ou passivas e forças derivativas, também ativas e passivas. Segundo ele as forças primitivas, tanto ativas como passivas fazem parte da constituição corpórea de uma dada substância. Ele afirma:

---

<sup>25</sup> É interessante observar que os conceitos de primitivo e derivado já haviam sido usados por Leonardo da Vinci com relação ao movimento: "Movimento primitivo é aquele que é feito pela coisa móvel durante o tempo em que ela estiver unida a seu movedor. Movimento derivado é aquele que a coisa móvel faz através do ar depois de ser separada de seu movedor. Movimento derivado tem sua origem no movimento primitivo e nunca tem uma rapidez ou poder igual à rapidez e ao poder desse movimento primitivo". Ver [108] pg. 72



*A força primitiva distingue-a da força secundária (isto é derivativa) a qual chamamos de força movente, que é uma limitação ou uma variação acidental de força primitiva.*

As forças derivativas são as forças de maior interesse para os físicos. Leibniz acrescenta:

*Por forças derivativas denominamos aquelas que efetivamente atuam uma sobre as outras ou são atuadas por outras, eu entendo somente que o que é conectado ao movimento (movimento local) e, que por seu turno, tende posteriormente a produzir o movimento local.*

E completando seus comentários sobre as forças:

*São estes movimentos (i.e. as forças derivativas) que as leis de ação se aplicam, leis que são entendidas não somente através da razão, mas são também corroboradas pelo senso através dos fenômenos<sup>26</sup>.*

Finalmente, as forças primitivas tanto ativas como passivas são as partes substantivas da matéria, enquanto as forças derivativas, tanto as ativas como as passivas, são formas acidentais ou modos diferentes de existência das forças primitivas, do mesmo modo que a forma corpórea é um acidente de uma coisa extensa.

## **2.5 O CONCEITO DE MASSA**

Se analisarmos o conceito de massa antes de Newton, veremos que ele se confunde com o conceito de energia, na forma como este conceito era entendido antes de Faraday e de outros cientistas do século XIX. Na antiguidade clássica, a classificação de Empédocles de que as substâncias eram constituídas de terra, ar, fogo e água predominam por muito tempo<sup>27</sup>.

Do ponto de vista que mais nos interessa aqui analisar e discutir, o conceito físico de massa deve-se a Newton e é um dos pilares de sustentação da mecânica clássica, pois é através dela que se expressa completamente o princípio da inércia (1ª lei do movimento) e o princípio fundamental do movimento (2ª lei do movimento), desde que se admita sua invariabilidade e seu aspecto intrínseco ao corpo. Dessa forma, é possível distinguir a massa de um corpo de seu peso, que passa a ser uma solicitação externa devido a ação da gravidade sobre o mesmo. A massa, dessa forma

---

<sup>26</sup> Ver [105] pg. 59.

<sup>27</sup> Ver "The Fragments of Empédocles", 1973, pg. 35, traduzido por William E. Leonard, Open Court Publishing Company, Illinois, EUA.

definida, também possibilita a definição da lei da gravitação universal de vez que a força de atração gravitacional está relacionada com o produto das massas e inversamente ao quadrado da distância que as separa <sup>28</sup>.

Depois de Newton o conceito de massa volta a se relacionar com a química através de Lavoisier e muito depois com a teoria da relatividade, com a energia, em uma visão mais ampliada deste conceito, através da equação  $E = mc^2$ , mostrando que massa e energia são duas formas intercambiáveis de uma mesma realidade.

Lavoisier demonstrou em um contexto restrito aos fenômenos físicos e químicos, a lei da conservação da massa, enunciada como se segue:

*A massa total de um sistema fechado permanece constante qualquer que seja a transformação físico-química a que ele seja submetido* <sup>29</sup>.

O experimento que leva ao enunciado acima foi realizado em 1768 e consistiu em ferver água durante um período de 101 dias, pesando o conjunto antes e depois da operação em uma balança de precisão. Verificou-se que o peso do conjunto continuava inalterado.

Esta lei permitiu muitos avanços na química, como a lei das proporções definidas e múltiplas, de Proust e Dalton e que exprimiam as relações entre as massas dos elementos de um composto químico; não menos importante ainda no campo da química foi a classificação periódica dos elementos de Mendeleiev, de 1869, ligando as propriedades das substâncias químicas a seus pesos atômicos organizados em uma tabela em ordem crescente. Outro experimento importante foi efetuado por J. J. Thomson em 1897 e que mediu a relação entre a massa e a carga do elétron. Esta experiência foi realizada através de descargas de raios catódicos e que foram identificados como elétrons [110].

Após esta breve incursão no terreno da química, voltemos ao conceito de massa na forma como ele foi estabelecido por Newton. Neste sentido, o conceito de força de inércia e que é inerente ao corpo significa a resistência que o corpo oferece a qualquer mudança de seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta.

É importante ressaltar a diferença entre o princípio da inércia formulado por Newton e o de Descartes baseado na conservação do movimento que por sua vez era concebido em uma perspectiva geométrica. Newton quantifica o conceito de massa como sendo a quantidade de matéria que o corpo possui. Além disso, se pensarmos a

---

<sup>28</sup> A primeira quantidade a ser definida no "Principia" de Newton é exatamente a massa: "A quantidade de matéria é a medida da massa, obtida conjuntamente a partir de sua densidade e volume". Ver [81] pg. 39.

<sup>29</sup> Lavoisier assim se expressa sobre esta questão: "Com efeito, eu posso considerar as matérias colocadas em presença uma das outras e o resultado obtido, como uma equação algébrica; e supondo sucessivamente cada um dos elementos desta equação desconhecida, poder tirar um valor e retificar assim a experiência pelo cálculo e o cálculo pela experiência". Ver [109] pg. 130.

segunda lei como uma variação da quantidade de movimento, a mesma aparece como um coeficiente de proporcionalidade entre a força e a aceleração.

Modernamente, ou seja, a partir das experiências efetuadas com os elétrons dos raios catódicos, foi possível identificar uma variação de sua massa com a velocidade. Pensou-se então numa espécie de massa eletromagnética em oposição a uma massa mecânica que permaneceria invariável. O que foi verificado, é que os elétrons que atingem velocidades muito elevadas, isto é próximas da velocidade da luz, fruto de emissões de raios beta, têm sua massa total elevada com essa velocidade sem deixar resíduo constante que seria a massa mecânica. Isto trouxe vários questionamentos à própria mecânica como teoria fundamental da física e, muitos físicos tentaram substituir a mecânica pelo eletromagnetismo. A teoria da relatividade restrita ao reescrever a cinemática, recoloca a mecânica e o eletromagnetismo em uma base nova.

Para esta espécie de refundação da mecânica foi necessário também redefinir os conceitos de espaço e de tempo subordinados agora ao valor finito da velocidade da luz.

A definição de massa deixa de ter seu significado anterior e de valor invariável

e é redefinido como:  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$ , que é a massa de inércia relativística e que

varia com a razão quadrática da velocidade do corpo pela velocidade da luz. O valor  $m_0$  é conhecido como massa própria ou massa em repouso; esta última não é senão a massa newtoniana. Conforme a expressão mostra, para baixas velocidades ambas as massas se confundem. Esta variação da massa com a velocidade, foi demonstrada por Einstein em seu terceiro artigo publicado em 1905 e era intitulado: *Sobre a Eletrodinâmica dos corpos em movimento*.

Como uma conseqüência dessa nova teoria, Einstein estabeleceu a equivalência entre matéria e energia através da equação  $E = mc^2$  tornando possível

ver que  $\Delta m = \frac{1}{c^2} \Delta E$ . Como a equação indica a variação de massa somente é

perceptível para grandes variações de energia. Isto só vai ser possível com as altas energias das transmutações radioativas e as grandes liberações de energia nuclear.

Outro problema importante relacionado com a massa no sentido newtoniano é a equivalência entre massa gravitacional e massa inercial. Pela lei da atração gravitacional  $p = mg$  e  $f = ma$ , ou seja  $f = p$  e  $a = g$ ; então a massa gravitacional é igual a massa inercial. Esta igualdade bastante utilizada pela mecânica clássica ficou durante muito tempo sem explicação. Uma série de experimentos

realizados entre 1890 e 1909 por L. Eotvos, aquela igualdade foi sempre verificada. Einstein, em 1907 teve a idéia da equivalência entre um movimento uniformemente acelerado e um campo gravitacional homogêneo. Isto o conduziu à teoria da relatividade geral o que fez do *princípio da equivalência* um princípio fundamental da natureza. A nova teoria saída de seu trabalho de 1911 a 1915 mostrou uma nova estrutura do mundo físico, o espaço-tempo determinado unicamente pelas massas dos corpos físicos que contém e que atuam como fontes do campo. O movimento de um corpo segue as equações de natureza puramente geométricas das geodésicas do espaço-tempo.

## Capítulo 3: As Idéias de Trabalho e Energia na Mecânica

*“A história da ciência não oferece outro caso mais surpreendente do fenômeno conhecido como descobrimento simultâneo. Já nomeamos doze figuras que, em um breve intervalo de tempo, chegaram por si sós às partes essenciais do conceito da energia e sua conservação. Poderia aumentar-se esse número, porém inutilmente. Esta multiplicidade sugere suficientemente que nas duas décadas anteriores a 1850 o clima do pensamento científico europeu continha elementos capazes de guiar os cientistas receptivos até um significativo e novo ponto de vista sobre a natureza”.*

(Thomas S. Kuhn – A Tensão Essencial – Fondo de Cultura Editores, México, 1996)

### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A maioria dos conceitos físicos apresenta grande dificuldade em se fazer o seu rastreamento histórico. Com os conceitos de trabalho e energia esta dificuldade também se apresenta. Uma das vias de investigação tem sido o processo de invenção e construção das máquinas. As máquinas e todos os dispositivos inventados para economizar trabalho sempre foram motivo de pesquisa pelos mais variados objetivos, isto em diversas épocas. Dependendo da época na qual as máquinas, mecanismos e dispositivos fossem investigados, poderiam até ser vistos como associados à magia, pelos efeitos às vezes espetaculares que exibiam. Desde cedo também, os inventores de máquinas se deram conta que ao lado das vantagens mecânicas que elas ofereciam, isto era acompanhado ou compensado por desvantagens, como uma espécie de preço a ser pago à natureza de vez que ela não dava nada de graça [111].

Desde muito tempo também se reconheceu que era possível elevar um peso através de um sistema de polias com um esforço bem menor do que o de elevar diretamente o peso. Além disso, ficou evidente que a velocidade com que o cabo que acionava todo o sistema se movia era bem maior do que a velocidade com a qual o peso estava sendo elevado na outra extremidade do sistema de polias. Dessa forma se o sistema fosse acionado com baixa velocidade o tempo requerido para a elevação do peso era muito grande.

Esses fatos já eram conhecidos de Heron de Alexandria, em torno dos anos 60

da nossa era <sup>1</sup>. Este princípio, que foi se desenvolvendo ao longo da história, de que os ganhos obtidos pela utilização das máquinas eram compensados por certas desvantagens ou perdas, contém em si o germe do conceito de energia. Com um pouco mais de sutileza, também estava implícito que inerente ao funcionamento do sistema o qual envolvia perdas e ganhos ou vantagens e desvantagens, alguma coisa deveria permanecer constante. E essa quantidade que permaneceria constante com o sistema em funcionamento e que só seria revelada em meados do século XIX, era precisamente a energia. Evidentemente estamos falando de um sistema, ou seja, de uma máquina idealizada, na qual todas as suas partes sejam constituídas de elementos rígidos, de superfícies completamente lisas, o funcionamento se faz sem choques, etc. Na realidade, como sabemos, com uma máquina em funcionamento parte da energia utilizada em seu acionamento se degrada na forma de calor ou outros tipos de perdas, como ruído, etc. No entanto, o raciocínio é válido em primeira aproximação, isto é, descontadas as perdas a energia permanece praticamente constante. Este problema das perdas coloca imediatamente a questão de como evitá-las, ou seja, de como tornar uma máquina mais eficiente. Todas essas questões vão sendo colocadas historicamente e o objetivo maior desta nossa investigação é ir discutindo este desenvolvimento tendo como pano de fundo o progresso científico de cada época.

Tentando encontrar as origens do conceito de energia através do estudo das máquinas, podemos descobrir algumas pistas desde a antiguidade com Aristóteles (384 - 322 a.C.) que foi o primeiro a escrever sobre mecânica em sua *Physis*, que literalmente significa um estudo de física<sup>2</sup>. No entanto, para ele a física tinha um caráter bem mais geral, algo como um estudo da natureza. Neste tratado, Aristóteles apresenta de forma abrangente o movimento, mas não se dedica ao estudo das máquinas. No entanto, existe um outro tratado que lhe é atribuído por alguns historiadores intitulado *Problemata Mechanica* ou *Quaestiones Mechanicae*, que pode ser considerado o primeiro estudo a tentar explicar como as máquinas funcionam. Uma das características mais importantes deste estudo, se estivermos interessados nas origens do conceito de energia, é que a abordagem das máquinas tem um enfoque dinâmico, diferentemente das formas como Euclides e Arquimedes o

---

<sup>1</sup> Em René Dugas [112], pg. 32, podemos ler: “Tudo indica que Heron de Alexandria viveu durante o segundo século da nossa era. Seu tratado “Mecânica”, discute certas máquinas simples como a alavanca, a polia e o bloco e o parafuso, sozinhas ou em várias combinações, e o tratado somente está disponível em uma versão árabe a qual foi traduzida e publicada por Carra de Vaux”.

<sup>2</sup> Os trabalhos de Aristóteles sobre física não estão contidos somente em sua “Physis”. Temos ainda o tratado “Sobre os Céus”, “Os Metereológicos” e “Do céu e da geração e da corrupção”. O estudo do movimento pode ser encontrado nos livros II e III, [113] pg. 96 e seguintes.

fazem quando estudam situações de equilíbrio nas máquinas, usando o princípio da alavanca.

Segundo Pierre Duhem [114], o autor do referido tratado de mecânica das máquinas, independente de ser ou não Aristóteles, usou um axioma básico tomado de empréstimo da física aristotélica, ou seja, que a força exercida por um corpo sobre outro para movê-lo era medida pelo peso do corpo e pela velocidade impressa ao mesmo. Isto significava que para uma mesma força aplicada, a velocidade impressa seria inversamente proporcional ao peso, como se a força motriz fosse o produto do peso pela velocidade. São idéias que já contêm em germe as noções de quantidade de movimento e energia cinética e que só iriam se esclarecer em definitivo com a Revolução Científica ou até mesmo um pouco depois.

O problema da constância de uma certa grandeza continuaria ao longo de todo desenvolvimento da mecânica até que se estabelecesse o princípio da conservação da energia em 1847. As polêmicas e os debates foram intensos em termos deste problema, envolvendo as figuras mais eminentes da física e da matemática dos séculos XVII e XVIII<sup>3 4</sup>.

Depois da morte de Galileu, este problema da conservação em física tornou-se mais acentuado. Descartes estudou-o em conexão com os problemas de choque entre corpos. Estes estudos levaram-no ao princípio da conservação do *momentum* ou quantidade de movimento linear. Ele ficou tão impressionado com o alcance de sua descoberta que passou a enunciá-la como válida para todo o universo. Estes estudos também conduziram-no muito próximo da idéia que uma medida para a força, uma entidade que produzia movimento era exatamente a variação da quantidade de movimento na unidade de tempo. Newton, posteriormente foi bastante influenciado por

---

<sup>3</sup> D'Alembert dedica o capítulo IV de seu Tratado de Dinâmica, II Vol., ao princípio da conservação das forças vivas. Ele o enuncia e faz a sua demonstração para diversos casos particulares inclusive para o caso dos fluidos. Sobre a aplicação deste princípio por parte de outros geômetras, como ele os denominava, d'Alembert afirma: "Huygens é o primeiro, que eu saiba, que fez menção desses dois princípios, e Bernoulli o primeiro que fez seu uso para resolver elegantemente e com facilidade diversos problemas de dinâmica. O que pretendo fazer neste capítulo, senão uma demonstração geral para todos os casos, ao menos os princípios suficientes para encontrar a demonstração em cada caso particular", pg. 163. E na pg. 185: "Daniel Bernoulli em sua excelente obra que tem por título "Hidrodinâmica", obtemos as leis do movimento dos fluidos nos vasos, da conservação das forças vivas, mas sem o demonstrar".

<sup>4</sup> Huygens, em [115], pg. 48, em sua proposição X, afirma: "Se um móvel tomba verticalmente ou desce segundo a superfície que se queira, e de novo é levado ao alto segundo uma outra superfície que se queira, terá ao subir e ao descer, sempre a mesma velocidade nos pontos igualmente elevados". Na proposição IV, pg. 108, podemos ler: "Se um pêndulo composto por vários pesos é abandonado a partir do repouso, realiza uma parte qualquer da oscilação inteira, abandonado de um lugar comum, retorna em sentido inverso a velocidade adquirida e ele sobe até onde pode; isto feito, o centro de gravidade de tudo retornará a mesma altura que aquela que ele possuía antes da oscilação começada". A partir das citações acima, podemos observar que Huygens dá os primeiros passos, a partir do estudo da queda de corpos de Galileu, no sentido de um balanço de energia potencial e cinética, o que ainda não é uma aplicação do princípio da conservação da "vis viva" às máquinas. Ele remete os leitores para o seu "Tratado de equilíbrio e de movimento dos fluidos", onde o princípio é demonstrado de forma geral. Ver [106].

estes estudos de Descartes. Para tanto, basta ver como Newton enuncia a segunda lei nos *Principia*, atribuindo à força uma variação do movimento <sup>5</sup>.

Conforme já mencionamos ao apresentarmos as controvérsias em torno do conceito de força que uma das primeiras polêmicas envolvendo duas grandes figuras da física e da matemática colocou em oposição Leibniz e Descartes. Em 1686, Leibniz publicou na *Acta Eruditorum*, em Leipzig um pequeno artigo no qual denomina a tese de Descartes de perversão da mecânica. Leibniz questionava a tese de Descartes da constância da quantidade de movimento e postulava, como sabemos, que quem se mantinha constante era a *vis viva*, que era medida pelo produto da massa pela velocidade do corpo ao quadrado. A argumentação de Leibniz baseava-se no seguinte: se imaginarmos duas massas  $m$  e  $4m$  e se as abandonarmos do repouso, a primeira de uma altura  $4h$  e a segunda da altura  $h$  do solo, ele assegura que cada massa ao cair adquire o que ele chama de *força* necessária para elevá-lo a altura inicial. Essa forma de visualizar a força significa trabalho, se colocado em termos da mecânica atual. Assim, a mesma *força* está envolvida na queda do corpo de massa  $m$  quanto no de massa  $4m$ . Se aplicarmos ao problema o princípio da conservação da quantidade de movimento veremos que ele não se conserva [105].

No capítulo anterior já discutimos as idéias mais importantes de Leibniz com relação ao conceito de força. Ao lado delas e do princípio da conservação da energia cinética (*vis viva*), poderíamos ainda acrescentar um conjunto de outras elaborações teóricas que justificam também considerá-lo como um dos precursores da idéia de energia potencial. Ao comentar o choque entre os corpos, Leibniz argumentava que se eles fossem perfeitamente duros e inflexíveis, quando colidissem com outros, mudariam instantaneamente suas direções e velocidades. Como isto não era possível, pois violaria o princípio da continuidade, não poderia existir os tais átomos. Nessa crítica a uma visão atomística, encontramos a justificativa para a existência da elasticidade dos corpos. Uma outra linha de argumentação que ele usa para explicar a propriedade elástica dos corpos está relacionada ao problema do choque, quando ele discute as leis do impacto formuladas por Huygens e que muito o influenciaram. Ele sustenta que nas colisões os corpos são comprimidos e deformados e é em virtude de sua elasticidade que eles retornam as suas formas originais e ao fazê-lo se afastam um do outro. É importante também ressaltar que Leibniz em seu arrazoado sobre o mundo físico recorre freqüentemente à metafísica, o que não é o caso de Newton.

---

<sup>5</sup> Sobre a influência de Descartes sobre Newton, Alexandre Koyré vê no título “Principia”, uma referência evidente aos “Princípios de Filosofia”, embora lhe fazendo oposição. Ela se revela na medida em que o trabalho de Descartes apresenta como solução para o problema do movimento uma mistura de metafísica e física. Já Newton ao falar de “Princípios Matemáticos” tenta se beneficiar da revolução galileiana, a saber, a matematização ou geometrização da natureza. Em suma, os princípios matemáticos se opõem aos princípios físicos e a filosofia natural à filosofia especulativa.



Essas considerações todas nos levam a conclusão de que Leibniz é não só um dos fundadores da mecânica, mas um dos precursores da mecânica analítica, sendo seus sucessores d'Alembert, Euler e Lagrange <sup>6</sup>.

Uma outra observação que julgamos importante é que esta vertente analítica da mecânica, diferentemente do enfoque newtoniano que usa sempre o conceito de força, posteriormente vai se consagrar como uma via extremamente fértil na solução de problemas da física e da engenharia, e que é conhecida pela denominação de *métodos de energia*. Esses métodos, muito adequados para a solução de uma gama enorme de problemas, têm como base conceitual a energia cinética e potencial do sistema ou corpo.

### **3.2 O CONCEITO DE TRABALHO E SUA FORMALIZAÇÃO**

O conceito de trabalho que é formalizado no século XVIII no contexto da estática deve ser analisado em outras situações e épocas diferentes para que se tenha um entendimento correto de seu real significado, ao ser aplicado às máquinas no começo do século XIX. Isto quer dizer que as idéias que deram origem ao conceito de trabalho se desenvolvem em direções diferentes e em contextos bastante diferenciados. Assim, as idéias que decorrem do estudo do equilíbrio da alavanca, desde Aristóteles, passando por Heron de Alexandria, Arquimedes e mais modernamente por Leibniz e outros, darão origem ao princípio dos trabalhos virtuais. Uma outra direção e contexto de evolução das idéias de trabalho, diz respeito ao movimento das máquinas no sentido de encontrar uma quantidade que se mantém constante após o sistema sair da situação de equilíbrio. Este contexto é o que mais nos interessa e a ele dedicaremos a maior parte de nosso esforço. Também verificaremos que no contexto do desenvolvimento das máquinas o conceito de trabalho desempenha um papel fundamental.

Existem outras direções nas quais o conceito de trabalho também se desenvolve como, por exemplo, o do estudo do trabalho humano enquanto dispêndio físico ou visualizando o corpo humano como uma máquina. Este caminho conduziu aos estudos de fisiologia e começou medindo-se a capacidade de um trabalhador polir lentes. Quem dá início a estas investigações é Guillaume Amontons (1663 - 1705), que mede a pressão média exercida pelos homens no polimento, através da velocidade de sua ação e a duração efetiva de seu trabalho diário. Ele chega então a medida da

---

<sup>6</sup> No próximo capítulo a história da mecânica analítica será estudada em detalhes.

potência do trabalho humano, como sendo comparável a de um cavalo ou de uma máquina térmica. Amontons antecipa todos os elementos que se desenvolverão depois de um século com Coulomb<sup>7</sup>.

Uma outra linha evolutiva do conceito de trabalho, e que consideramos de extrema importância, é a da degradação do trabalho no interior das máquinas, o que conduz ao estudo da termodinâmica. Na realidade ela é um desdobramento da linha principal seguida neste estudo. Nos referiremos a esta linha de investigação somente de passagem e na medida que ela se relacionar diretamente com nosso objetivo principal, que é seguir o conceito físico de trabalho como uma elaboração teórica no campo da mecânica clássica e da matemática. E em seguida acompanhar o desenvolvimento de uma teoria geral das máquinas e finalmente o processo de incorporação do conceito de trabalho da mecânica ao pensamento econômico.

Historicamente a idéia de trabalho como o efeito que aparece ao se vencer uma resistência já estava presente no início do século XVIII. Seu precursor foi Amontons, ao qual nos referimos anteriormente ao tentar estabelecer uma forma de medir o trabalho humano. E ele é de uma modernidade surpreendente. Seu nome também está associado a um dos primeiros projetos de construção de uma máquina a vapor, juntamente com Denis Papin (1647-1712) e Thomas Savery (1650-1715) [117]. Eles submeteram o projeto de uma espécie de *moinho de fogo* à Academia de Ciências, em 1699, mas nunca conseguiram realizá-lo.

Nos estudos de Amontons que podemos considerar como pioneiro na questão do trabalho como a ação de deslocar uma força, a força dinâmica é medida como o produto de uma força estática (assimilável a um peso) pela velocidade e um tempo. O produto  $P V t$  que posteriormente vamos reencontrar nos estudos de Coulomb (1736-1806) deve ser entendido como um trabalho no sentido moderno, pois o produto  $V t$  pode ser considerado como um deslocamento.

No que tange à passagem desses conceitos para o estudo das máquinas, mais precisamente ao desenvolvimento do conceito de trabalho no contexto da busca de uma quantidade que se conserve para a máquina em movimento, temos que considerar como ponto de partida uma memória escrita por Antoine Parent (1666-1719) na qual ele tenta estimar a velocidade ótima na qual deve girar uma roda de um moinho no sentido de se obter *o maior efeito possível*<sup>8</sup>. Os esforços nesta direção

---

<sup>7</sup> Ver [116].

<sup>8</sup> Jean-Pierre Sérís resume assim a contribuição de Parent: “Enquanto que na máquina em equilíbrio, a velocidade do fluido (elevada ao quadrado) é tomada absolutamente como componente do esforço sobre a área, é a diferença da velocidade do fluido – velocidade da área que, elevada ao quadrado, intervem no cálculo do esforço da corrente sobre a área em movimento. Este princípio, como veremos, não introduz nenhum conceito novo, mas adota um procedimento sem precedentes”. Ver [118], pg. 290.

continuam com Henri Pitot (1695-1771)<sup>9</sup>, em 1725 e por Bernard Forest de Bédidor em sua *Arquitetura Hidráulica*, em 1737-39, que vem a se tornar um manual de referência dos mais populares entre os engenheiros do século XVIII. Este manual também tem uma importância histórica considerável dentro do contexto que estamos enfocando, pois ele vai ser atualizado por Navier nas primeiras décadas do século XIX e esta reedição de Bédidor feita por Navier é um dos elos fundamentais na cadeia que liga o empreendimento de Lazare Carnot com os engenheiros politécnicos. No último capítulo trataremos deste problema em detalhes.

Voltando a trajetória descrita pelo conceito de trabalho do ponto de vista estrito da física, merece especial destaque o trabalho de Jean Bernoulli (1667-1748) em particular a carta endereçada a Pierre Varignon (1654-1722) datada de 26 de Janeiro de 1717, na qual ele faz a generalização do que viria a ser *O Princípio dos Trabalhos Virtuais*. Vejamos um trecho da referida carta:

*Suponhamos várias forças diferentes que estejam atuando ao longo de linhas diferentes ou direções com tendência de manter em equilíbrio um ponto, uma linha, uma superfície, ou um corpo, e suponhamos também que imprimamos ao sistema como um todo um pequeno deslocamento, sempre paralelo a si próprio ao longo de qualquer direção, ou em torno de qualquer ponto fixo; é fácil ver que devido a este deslocamento cada uma das forças avançará ou retrocederá em sua direção, a menos que algumas delas tenham suas direções perpendiculares à direção do pequeno deslocamento; neste caso a força ou as forças não avançarão nem retrocederão: para os avanços ou retrocessos os quais chamamos “velocidades virtuais”, outra coisa não acontecerá senão que as quantidades pelas quais cada linha ou tendência aumenta ou decresce devido ao pequeno deslocamento; e esses incrementos ou decrementos são encontrados desenhando-se uma perpendicular da extremidade de cada linha da tendência a qual será cortada pela linha da tendência de cada força em torno da posição, para a qual ela tenha sido trazida, pelo pequeno deslocamento, uma pequena porção da qual será a medida da “velocidade virtual” desta força.*

Em seguida a esta longa citação, Jean Bernoulli faz um diagrama explicativo onde fica bastante clara a operação efetuada a qual ele descreve. A carta termina com uma Proposição Geral ou teorema XL que sintetiza suas idéias:

---

<sup>9</sup> Na pg. 296, Sérís [118], afirma: “Na realidade Henri Pitot (1695-1771) que em sua memória de 1725 intitulada “Novo método para conhecer e determinar o esforço de toda sorte de máquinas movidas por uma corrente ou uma queda d’água”, apresentará as coisas desta maneira mais clara e mais coerente. Sabendo que ele deve obter o máximo da quantidade (V-v), Pitot fez de início “o cálculo da velocidade que as palhetas de uma máquina de uma máquina deviam atingir para produzir o maior efeito possível”. Esta apresentação nova, mais inteligível e mais inteligente, da idéia de Parent não deve ser subestimada. É ela que a popularizará, que permitirá atingir um público mais amplo de sábios (Euler, Mc Laurin, Daniel Bernoulli), homens de arte (Bédidor) e experimentalistas (Deparcieux, Smeaton)”.

*Em todo caso de equilíbrio de forças, em qualquer que seja a maneira como elas sejam aplicadas, e quaisquer que sejam as direções que elas atuem sobre as outras, mediatemente ou imediatamente, a soma das energias positivas será igual a soma das energias negativas, tomadas como positiva.*

Este é o texto fundador do princípio dos trabalhos virtuais. Ainda no campo da física, o trabalho de Daniel Bernoulli (1700-1782) intitulado *Hidrodinâmica*, de 1738, retoma a questão do trabalho no contexto do *princípio das forças vivas*. Este texto é muito importante por ser um ponto de partida para uma série de estudos tanto teóricos como ligados às máquinas como veremos no decorrer desta investigação. Ele também é importante do ponto de vista terminológico, pois introduz o termo *labor* ao conceito de trabalho <sup>10</sup>.

Finalmente, Fourier em 1798, publica um artigo intitulado *Memória sobre a estática e a teoria dos momentos* [119]. Neste estudo, ele parte de Jean Bernoulli e faz o desenvolvimento matemático e a generalização do conceito físico de trabalho aplicando-o desde um ponto material até um sistema complexo, na forma como o conhecemos atualmente, muito embora o termo trabalho ainda não tivesse sido adotado. É importante ressaltar que a memória de Fourier é um dos estudos mais completos sobre o princípio das velocidades virtuais. Em suma, no final do século XVIII o conceito de trabalho estava perfeitamente estabelecido, formalizado, podendo ser utilizado no estudo das máquinas. Lazare Carnot (1753-1823) será o primeiro a criar uma teoria geral para as máquinas embora utilize termos diferentes para designar o trabalho. Outros estudos também merecem destaque no sentido de abordar as máquinas. Neste sentido devemos mencionar John Smeaton (1724-1792) na Inglaterra e Jean Charles Borda na França. Smeaton era um construtor de instrumentos e seu nome está associado à construção de modelos mais eficientes da máquina de Newcomen melhorando seu processo de fabricação. No entanto, nada comparável com o grande esforço teórico de Carnot.

---

<sup>10</sup> Daniel Bernoulli, em [119], dedica todo o capítulo 9 à aplicação de sua teoria dos fluidos às máquinas. O título deste capítulo é bastante sugestivo: "Relativo ao Movimento de Fluidos que não são impulsionados por seu próprio peso, mas por uma força exterior, e diz respeito particularmente às Máquinas Hidráulicas e seu último grau de perfeição que pode ser alcançado, e como isto pode ser aperfeiçoado posteriormente através da Mecânica dos Sólidos como também dos Fluidos". Este capítulo está dividido em três partes, a saber: Primeira Parte - Relativa às Máquinas Expelindo Água para Cima com Ímpeto. Segunda Parte - Relativa às Máquinas Hidráulicas Transportando Água sem Ímpeto Apreciável de uma Posição mais Baixa a uma Mais Alta. É precisamente nesta seção, pg. 202, que aparece explicitamente seu famoso princípio mecânico como a Regra 10, como um princípio mecânico, o qual ele aplica aos fluidos; o que ele faz em seguida para o caso do parafuso de Arquimedes. Terceira Parte - Relativa às Máquinas as quais são Movidas pelo Ímpeto de um fluido, tal qual a Força do Vento. Este título se refere, evidentemente, às rodas d'água, nas quais o fluido comunica seu movimento de queda livre às palhetas de uma roda obrigando-a a girar. Bernoulli considera que se o fluido tiver uma velocidade  $v$  e a palheta outra velocidade  $V$ , devemos considerar a velocidade relativa  $(v-V)$  a impulsionar a máquina. Ele também faz uma série de considerações sobre o movimento da palheta, monta uma equação algébrica entre  $v$  e  $V$ , cujo máximo é  $V = 1/3 v$ .

Estava, portanto, formada a base e criadas as condições para que pudesse se desenvolver a primeira teoria geral das máquinas integrada ao quadro teórico da mecânica racional, como veremos em profundidade no quinto capítulo.

Conforme temos nos referido ao longo do texto, a criação desta teoria será obra de Lazare Carnot. Ela vem a público pela primeira vez em 1780, mas o seu coroamento só será feito em 1803. Sua obra ocupa uma posição intermediária entre a mecânica racional e uma ciência mais aplicada típica dos engenheiros. Sua teoria geral é também um ponto de partida importante para uma série de desenvolvimentos e aplicações levadas a efeito por um grupo de engenheiros da Escola Politécnica de Paris os quais são responsáveis em grande parte pela mecânica aplicada que surge nas primeiras décadas do século XIX, principalmente do ponto de vista da constituição desta disciplina.

O empreendimento de Lazare Carnot só não tem uma repercussão muito maior porque ele é em grande parte obscurecido pelo brilho da *Mecânica Analítica* de Lagrange, publicada em 1788. De qualquer forma, no começo do século XIX a teoria das máquinas conheceu enorme desenvolvimento na França, passando a ser incorporada ao ensino acadêmico de engenharia da Escola Politécnica.

Conforme também será visto o conceito de trabalho segue o curso e a linha evolutiva dos últimos progressos no campo da mecânica das máquinas e tem uma posição de relevância dentro da teoria de Carnot.

### **3.3 O DESENVOLVIMENTO DO PRINCÍPIO DOS TRABALHOS VIRTUAIS**

O conhecido Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), vem sendo intensivamente usado como método alternativo às equações de equilíbrio extraídas das leis de Newton para um dado sistema mecânico. Se esses sistemas têm a particularidade de possuírem vários graus de liberdade e forem constituídos por sub-sistemas interligados, o PTV apresenta uma série de vantagens sobre o método convencional de equilíbrio, pois opera somente com as forças (externas) que realizam trabalho, evitando-se a perda de tempo com a manipulação das forças internas, que ao aparecerem aos pares e com sinais trocados, seu trabalho total é nulo. Uma outra vantagem adicional do PTV em relação ao método tradicional é que ele permite estudar a natureza do equilíbrio. Estando também a posição de equilíbrio de um sistema associada a um problema de encontrar os máximos e mínimos de sua função potencial, o PTV está diretamente relacionado com a estabilidade do sistema, que ocorre quando essa função passar por um mínimo. No caso inverso ocorre a

instabilidade, evidentemente, podendo ainda o sistema apresentar um tipo de equilíbrio dito *indiferente*, quando a primeira e segunda derivada da função potencial se anularem simultaneamente.

Uma observação importante deve ser feita. Nos textos mais antigos, este princípio é sempre referido como princípio das velocidades virtuais e isto se deve ao fato de que somente após 1829 quando o termo *trabalho* foi adotado por Coriolis, Poncelet e o grupo de engenheiros politécnicos deste período. E dessa forma este conceito passou a ser incorporado ao vocabulário da mecânica e somente a partir daí é que tem sentido em se fazer a substituição do termo velocidade por trabalho no famoso princípio.

Após a carta de Jean Bernoulli a Varignon, à qual nos referimos no item anterior, uma cronologia das investigações mais importantes sobre o PTV é apresentada a seguir:

- a) Em 1788, o *Essai sur les machines en général*, de Lazare Carnot.
- b) Em 1796, a *Memória sul principio della velocita virtuali*, de Fossombroni.
- c) Em 1797, a *Théorie des fonctions analytiques*, em primeira edição, de Lagrange.
- d) Em 1797, o *Considérations sur le principe des vitesses virtuelles*, texto de Poinsot que não foi publicado.
- e) Em 1798, temos três trabalhos dos mais importantes. O primeiro é a *Memoire sur la statique*, de Fourier. O segundo é *Sur le principe des vitesses virtuelles*, de Lagrange e finalmente o terceiro *Sur le principe des vitesses virtuelles et la décomposition des mouvements circulaires*, de Prony.
- f) Em 1799, temos o tema dos trabalhos virtuais tratado dentro da *Mécanique Céleste*, de Laplace e um segundo estudo de Prony no qual o problema é abordado e é intitulado *Mécanique philosophique*.
- g) Em 1803, Lazare Carnot retorna ao assunto em seus *Principes*.
- h) Em 1806, temos dois estudos interessantes. O primeiro denominado *Théorie general de l'équilibre et du mouvement des systèmes*, de Poinsot e a

*Démonstration générale du principe des vitesses virtuelles, dégagée de considération des infiniment petits*, de Ampère.

- i) Em 1811, temos a segunda edição da *Mécanique analytique*, de Lagrange.
- j) Em 1813, temos a segunda edição da *Théorie des fonctions analytiques*, de Lagrange.

Algumas observações devem ser feitas. Primeiramente é que o período que começa com Carnot em 1788 e termina em 1813 que é o ano da morte de Lagrange é extremamente profícuo em termos de estudos sobre o PTV. Devemos ressaltar que a grande maioria dessas investigações faz parte de estudos fundamentais da própria mecânica como disciplina científica e o PTV é praticamente incorporado à sua base conceitual como um princípio fundamental e fundador da mecânica. É pelo menos o caso dos *Principes* de Carnot, da *Mécanique analytique*, de Lagrange e da *Mécanique céleste*, de Laplace. Os textos isolados mais importantes e que tratam especificamente dos trabalhos virtuais são o de Fourier, Lagrange, que também o trata no contexto de sua mecânica analítica o de Prony e Poinsot. Os textos de Carnot nos quais o PTV aparece apresentam um grande interesse histórico para a nossa investigação e por esta razão serão estudados em item específico. Carnot apresenta o conceito por ele elaborado dos movimentos geométricos os quais estão intimamente relacionados com o PTV conforme será visto posteriormente. Vejamos então de forma resumida de que tratam as contribuições de Fourier, Lagrange, Prony <sup>11</sup> e Poinsot.

#### **FOURIER (1798)**

O título completo do trabalho de Fourier é: *Memoire sur la statique contenant la démonstration du principe des vitesses virtuelles et la théorie de moments*. De uma maneira geral a demonstração do PTV neste estudo está baseada no princípio do equilíbrio da alavanca. Fourier também toma de empréstimo de Galileu a noção de momento, como o produto da força pela velocidade virtual do ponto no qual ela é aplicada. Algumas imprecisões são percebidas, como por exemplo, a utilização de um sinal contrário ao que normalmente se usa atualmente, o que é explicado por certas

---

<sup>11</sup> Para um estudo bastante consistente sobre a história do princípio dos trabalhos virtuais, ver [120]. No entanto este autor comete um equívoco ao atribuir à Poncelet a adoção do termo “trabalho”, ao invés de Coriolis.

indefinições no terreno da própria teoria, tanto do cálculo diferencial como do conceito de energia.

Fourier considera de início o caso de duas forças iguais e opostas atuando sobre uma linha inflexível, e pela análise entre a ligação que se estabelece entre as duas superfícies rígidas ele prova o PTV para o caso de um corpo rígido. Os outros casos analisados são os corpos flexíveis e os sistemas contendo fluidos incompressíveis.

Na demonstração apresentada por Fourier, que conforme afirma o historiador René Dugas [112] é *a redução lógica do teorema dos trabalhos virtuais ao princípio da alavanca*, ele também mostra que este princípio e o princípio da composição de forças se reduzem um ao outro. Em outras épocas, algumas investigações já haviam obtido o princípio da alavanca a partir do paralelogramo de forças. Fourier, no estudo mencionado percorre o caminho inverso. No fundo, o que ele buscava era dar uma melhor fundamentação ao PTV com base no princípio da alavanca, o que também já havia sido feito de forma satisfatória por Arquimedes e Huygens <sup>12</sup>.

### **LAGRANGE (1798)**

A demonstração do PTV apresentada por Lagrange apareceu pela primeira vez no 5º Caderno do Jornal da *École Polytechnique* e foi republicado com algumas modificações na segunda edição de sua *Mécanique analytique* em 1813. Sua demonstração é bastante sucinta e contém somente quatro páginas <sup>13</sup>.

Logo no parágrafo introdutório, Lagrange menciona o mesmo tipo de problema enfrentado por Fourier: *Na demonstração que fizemos do princípio das velocidades virtuais, o mesmo foi feito depender do princípio da composição de forças ou do equilíbrio da alavanca*. O que ele questiona é o fato de que mesmo sendo estes dois princípios fundamentos ordinários da estática, eles precisam de demonstração. Assim, na busca de um princípio mais elementar e básico, Lagrange recorre ao princípio do equilíbrio de uma talha, entendendo ele ser o mesmo evidente em si e autoexplicativo e conduzindo diretamente ao princípio das velocidades virtuais. Na segunda edição de sua *Mécanique analytique*, Lagrange chama este princípio de *princípio das polias*.

---

<sup>12</sup> Arquimedes, em seu “Sobre o Equilíbrio de Planos” ou “Os Centros de Gravidade de Planos”, Livro I, em [120], utiliza o princípio da alavanca para o estudo dos centros de gravidade de figuras planas.

<sup>13</sup> Na Segunda Seção de sua “*Mécanique Analytique*”, pg. 12, [122], podemos ler: “A lei geral do equilíbrio nas máquinas, é que as forças ou potências estejam entre elas reciprocamente como as velocidades dos pontos onde elas são aplicadas, estimadas segundo a direção dessas potências. É nesta lei que consiste o que chamamos comumente o “Princípio das velocidades virtuais”. Princípio reconhecido após longo tempo por Princípio fundamental do equilíbrio, ainda que tenhamos mostrado na Seção precedente, e que se possa por consequência considerá-lo como uma espécie de axioma da Mecânica”.



O procedimento empregado por Lagrange consiste em fazer a representação das forças aplicadas por um sistema mecânico composto por máquinas simples. Isto torna sua demonstração semelhante a de Fourier com a diferença de substituir as alavancas por uma combinação de polias.

Tudo indica que o sistema montado por Lagrange tenha como fonte de inspiração o trabalho de Stevin, pois este último chegou a enunciar o PTV numa situação restrita para um sistema de polias em seu famoso *Hypomnemata mathematica*<sup>14</sup>. Além disso, Lagrange cita Stevin (1548-1620) logo nas primeiras páginas de seu mais conhecido livro.

### **PRONY (1798)**

O estudo de Prony intitulado: *Sur le principe des vitesses virtuelles et la décomposition des mouvements circulaires*, está dividido em duas partes conforme o próprio título sugere.

De início ele considera o caso dos sistemas rígidos e define cinco movimentos elementares a partir dos quais é possível compor qualquer movimento. Ele calcula então em função dos parâmetros que representam os cinco movimentos já definidos, o deslocamento elementar de um ponto qualquer do sólido animado de um movimento qualquer. Em seguida ele obtém a projeção do deslocamento virtual sobre a direção da força aplicada no ponto. Então, como ele já havia demonstrado em estudo anterior, a partir da composição de forças, as seis equações de equilíbrio de um sólido são aplicadas aqui para deduzir o princípio das velocidades virtuais dessas seis equações.

Prony não se satisfaz inteiramente com a sua demonstração e afirma: *É necessário, para conservar na equação das velocidades virtuais o caráter de princípio, de deduzi-la de um teorema da mecânica ainda mais elementar e mais próximo das verdadeiras definições*. Dessa forma ele busca se apoiar sobre *a composição das forças aplicadas a um único ponto e das forças paralelas*. A demonstração do PTV consiste então em ir demonstrando sua validade para diferentes casos, como o de um único ponto, o de uma linha inflexível, de um triângulo sólido, aplicando em todos eles o princípio da alavanca. Seu método lembra o de Fourier já apresentado.

Na parte final do estudo, Prony aplica o PTV ao caso dos corpos deformáveis. No entanto ele se limita ao caso dos polígonos funiculares.

---

<sup>14</sup> Em 1608, Stevin reuniu uma série de trabalhos ao qual denominou "Hypomnemata Mathematica". Eles foram traduzidos para o francês no início de 1634. Segundo René Dugas, [112], a estática de Stevin é desenvolvida geometricamente de maneira muito similar a usada por Arquimedes. Com relação ao princípio das velocidades virtuais, podemos encontrá-lo no volume IV de sua "Hypomnemata", quando ele trata do equilíbrio de um sistema de polias.

O estudo de Prony teve uma influência direta sobre o seu aluno Poinsot que também trouxe uma contribuição importante ao PTV.

Os desenvolvimentos feitos por Fourier, Lagrange e Prony, demonstram que o PTV é um princípio fundamental da mecânica estando diretamente relacionado com o equilíbrio da alavanca e a composição de forças. O encadeamento de muitos estudos versando sobre o PTV logo após a publicação da *Mécanique analytique* de Lagrange indica também que ela provocou intensos debates no meio científico. Este problema, que já havia sido abordado anteriormente, foi um dos assuntos preferenciais desde a fundação da *École Polytechnique* poucos anos antes.

Outras contribuições, buscando uma demonstração convincente do PTV, surgiram nos anos posteriores, e o próprio Lagrange volta ao tema nas reedições de sua *Mécanique Analytique* e na *Théorie des Fonctions Analytiques*.

### **POINSOT (1806)**

Louis Poinsot, aluno de Monge, Lagrange e Prony, é quem vai trazer uma grande contribuição à mecânica, não tanto por ter apresentado uma nova demonstração do princípio das velocidades virtuais, mas pelo fato de ter recolocado o debate sobre os princípios fundamentais da mecânica em novas bases. Se tivermos em conta que durante os primeiros anos desde a fundação da Escola Politécnica e nas duas primeiras décadas do século XIX, mais ou menos até a morte de Lagrange em 1813, foi um período muito fecundo em termos de discussões sobre em que bases e quais os princípios realmente fundamentais sobre os quais a mecânica está assentada, esta contribuição tem um mérito todo especial.

Segundo a grande maioria dos matemáticos e engenheiros da época, o princípio das velocidades virtuais era inegavelmente um deles. Lagrange e muitos outros tentaram reduzir este princípio ao princípio da alavanca. É devido a isso que em sua *Mecânica Analítica* de 1788 não existe nenhuma demonstração do princípio das velocidades virtuais. E, como sabemos, sua mecânica repousa em grande medida sobre este princípio.

O mérito dos estudos de Poinsot foi provocar uma reviravolta naquilo que já parecia por demais óbvio e plenamente estabelecido. O questionamento que ele fazia do princípio das velocidades virtuais se assemelha a crítica que d'Alembert fazia do conceito newtoniano de força como algo obscuro e incompleto. Ele argumentava em sentido contrário que o princípio em questão deveria ser deduzido a partir das condições gerais de equilíbrio do sistema.

Poinsot volta então a reelaborar o conceito de um sistema mecânico e das relações entre suas partes generalizando o problema do equilíbrio de um ponto para um sistema de pontos materiais. Foi devido à essas críticas que Lagrange fez importantes modificações no que se refere ao princípio das velocidades virtuais na segunda edição de duas de suas obras fundamentais: a *Mecânica Analítica* e a *Teoria das Funções Analíticas*, publicadas respectivamente em 1811 e 1813.

### 3.4 O PRINCÍPIO DA MÍNIMA AÇÃO

Um dos objetivos mais perseguidos pela física ao longo dos anos tem sido encontrar um princípio, o mais simples possível, no qual todos os fenômenos naturais pudessem ser enquadrados, além do que o mesmo permitisse calcular todas as ocorrências passadas e principalmente as futuras. Evidentemente, isto está muito longe de ser alcançado e muito provavelmente este princípio nem sequer exista. No entanto, uma aproximação desse ideal é sempre possível e a história da física tem mostrado que alguns resultados neste sentido vêm sendo obtidos.

Entre as leis mais gerais e que se colocam na perspectiva apontada está o princípio da mínima ação. Em todos os ramos da ciência no qual ele se aplica, é possível obter uma explanação geral de certas características dos fenômenos envolvidos, além de fornecer as regras que indicam como esses fenômenos variam com o tempo e o espaço e como determiná-los. Dessa forma, o princípio da mínima ação tem ocupado uma posição central na física moderna, juntamente com o princípio da conservação da energia. Vale ressaltar que este último tem uma posição similar ao primeiro e governa uma grande quantidade de processos físicos.

O princípio da conservação da energia pode ser deduzido do princípio da mínima ação e conseqüentemente está nele contido. A recíproca, no entanto, não é verdadeira, o que confere ao princípio da mínima ação um caráter mais geral. Como exemplo podemos considerar o movimento de uma partícula livre da ação de qualquer força. Pelo princípio da conservação da energia a partícula deve mover-se com velocidade constante, mas nada é dito sobre a direção do vetor velocidade, pois a energia cinética independe daquela direção. Em princípio a trajetória da partícula tanto poderia ser retilínea como curvilínea, se o movimento considerado somente do ponto de vista da energia. Se aplicarmos o princípio da mínima ação, concluiremos que a partícula deverá mover-se em linha reta.

Este problema é inteiramente geral e pode ser generalizado. Para o caso de um pêndulo esférico, ou seja, de uma massa concentrada movendo-se sem atrito

sobre uma superfície esférica fixa, o princípio da conservação da energia só tem a dizer que durante o movimento para cima, a energia cinética diminui de uma certa quantidade e aumenta durante o movimento descendente. A trajetória da partícula não pode ser determinada, pela conservação da energia, enquanto que o princípio da mínima ação resolve inteiramente todas as questões relacionadas a este tipo de movimento.

A diferença fundamental na aplicação dos dois princípios a qualquer problema, é que o princípio da conservação da energia fornece uma equação somente, enquanto que é necessário obter tantas equações quantas variáveis ou graus de liberdade existirem, para que se possa determinar o movimento do sistema completamente. Assim, no caso da partícula livre, três equações são necessárias e no caso do pêndulo esférico somente duas. E o princípio da mínima ação fornece em todos os casos tantas equações quantas variáveis existirem.

Não devemos esquecer que o PMA fornece várias equações de uma única fórmula, pois se trata de um princípio variacional. Sua grande vantagem é que de um número infinito de movimentos virtuais imagináveis, sob as condições particulares dadas, ele indica um movimento bem definido por meio de um critério simples e aponta qual o movimento efetivo. Este critério significa que para um movimento arbitrário infinitamente próximo do movimento efetivo, ou mais precisamente, para toda variação infinitamente pequena do movimento dado, consistente com as condições de vínculo dadas, uma certa função característica da variação se anula. Desta forma, uma equação é deduzida de toda variável independente, ou seja, de todo grau de liberdade do sistema, como um problema de máximo ou de mínimo.

As origens do PMA remontam a Leibniz<sup>15</sup>. Em um teorema por ele enunciado, estabelecia-se que de todos os mundos que podem ser criados, o mundo efetivo é tal que contém, ao lado de todo mal inevitável, o máximo bem. Embora postulado no terreno moral, o teorema propõe uma solução de tipo variacional como o PMA. Segundo alguns historiadores, Leibniz formula pela primeira vez este princípio em uma carta datada de 1707, cujo original teria se perdido. Posteriormente, o PMA viria a ser desenvolvido por Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), Euler e Lagrange<sup>16</sup>.

O PMA está indissoluvelmente ligado ao nome de Maupertuis, que não só reconheceu a existência e significado deste princípio, mas também usou de toda sua

---

<sup>15</sup> Em março de 1751, Koenig, professor em La Haye, membro da Academia de Berlim, assegurou que Leibniz foi o primeiro a enunciar o princípio da mínima ação. Esta afirmativa se apoiava em uma carta de Leibniz à Hermann datada de 16 de outubro de 1707, cuja autenticidade foi posta em questão por diversos estudiosos do assunto. Ver [123].

<sup>16</sup> Embora esta correspondência não tenha sido encontrada, Leibniz se pronunciou algumas vezes sobre o princípio da mínima ação, não sendo improvável que seja ele próprio o primeiro a enunciar este princípio. Os defensores da originalidade de Maupertuis, no entanto, argumentam que o rigor e a precisão na formulação do princípio se deve a ele. Ver [123].

influência no mundo científico para trabalhar sua aceitação. Não podemos esquecer que ele foi nomeado por Frederico, o grande, presidente da Academia Prussiana de Ciências, cargo que exerceu de 1746 a 1759.

Maupertuis nasceu em Saint Malo, França, em 1698 e foi um dos grandes divulgadores na França das teorias newtonianas, em especial a mecânica e a lei da gravitação universal. Neste sentido, ele conduziu uma expedição à Lapônia, nos anos de 1736/37 com o objetivo de fazer medições da aceleração da gravidade, tendo em vista a confirmação da suposição de Newton sobre o achatamento da terra. Os resultados positivos obtidos por esta expedição tiveram uma grande influência na aceitação das idéias de Newton no continente europeu.

O PMA foi apresentado e discutido por Maupertuis em sua memória intitulada: *Accord des différentes lois de la nature qui avaiant jusqu'ici paru incompatibles* e apresentada à Academia de Ciências de Paris em 1744. Como sabemos este princípio foi enunciado originalmente para a ótica geométrica e só posteriormente é que o mesmo foi estendido para o domínio da mecânica <sup>17</sup>.

Em sua memória, Maupertuis enuncia as três leis que a luz deve seguir:

- 1º) Em um meio uniforme a luz se move em linha reta.
- 2º) Quando a luz encontra um corpo que não pode penetrar, ela é refletida e o ângulo de sua reflexão é igual ao ângulo de sua incidência.
- 3º) Quando a luz passa de um meio transparente para outro, seu trajeto, após encontrar o novo meio, faz um ângulo com o trajeto anterior, e o seno do ângulo de refração está sempre na mesma razão que o seno do ângulo de incidência.

A chamada lei dos senos para a refração já havia sido proposta por Descartes e de forma independente por Snell. Na Dióptrica, de 1637, Descartes apresentou uma dedução dessa lei baseada em argumentos mecânicos e também supondo que a luz tenha uma facilidade maior de se mover nos meios mais densos. Pierre Fermat (1602-1665) discordava dos argumentos de Descartes e somente com os experimentos de Leon Foucault (1819-1868) e Hippolyte Fizeau (1819-1896), em meados do século XIX é que seriam confirmadas as hipóteses de Fermat.

---

<sup>17</sup> Para uma exposição detalhada do princípio de Maupertuis, além da memória citada, ver Suzanne Bachelard em [124], pg. 99.

Vejamos então como Maupertuis enuncia o PMA, extraindo da famosa memória o trecho no qual o princípio aparece: *Meditando profundamente sobre o assunto, pensei se a luz, que abandona o caminho (ou a linha reta) quando passa de um meio a outro, não poderia também deixar de seguir o caminho mais rápido. Com efeito, que preferência deveria ter aqui o tempo sobre o espaço? A luz não podendo mais seguir ao mesmo tempo pelo trajeto mais curto e pelo mais rápido, por que iria por um deles e não pelo outro? De fato, ela não segue nenhum dos dois, ela toma um caminho que tem a vantagem mais real: o caminho que ela toma é aquele no qual a quantidade de ação é mínima. Falta explicar agora o que entendo por quantidade de ação. Quando um corpo é levado de um ponto a outro, é necessário para isto uma certa ação. Essa ação depende da velocidade que o corpo tem e do espaço que percorre, mas ela não é nem a velocidade nem o espaço tomados separadamente. A quantidade de ação será tanto maior quanto maior for a velocidade do corpo e quanto maior for o caminho percorrido. Ela é proporcional a soma dos espaços multiplicados cada um pela velocidade com a qual o corpo os percorre. É essa a quantidade de ação que é aqui o verdadeiro dispêndio da natureza e o que ela economiza o mais possível no movimento da luz [125].*

Maupertuis chega assim a um problema de minimização. Ao tornar mínima essa função, ele conclui que o seno da incidência está para o seno da refração na razão inversa das velocidades que a luz tem em cada meio. Este resultado está em desacordo com o que obteve Fermat e em concordância com Descartes. Esta formulação proposta por Maupertuis não permite conclusões a serem tiradas em relação às leis que regem o fenômeno nem das condições que devem ser satisfeitas.

Seguindo o caminho aberto por Maupertuis, Euler <sup>18</sup> estende as idéias subjacentes ao princípio da mínima ação e propõe um princípio formulado como um teorema matemático aplicado à mecânica, para o caso da energia se manter constante. Euler afirma: *Desde que todos os processos na natureza obedecem a certas leis de máximo ou mínimo, não há dúvida de que as curvas descritas pelos corpos sob a influência de forças arbitrárias, também possuem alguma propriedade de máximo e mínimo.* Ele ainda acrescenta que na forma proposta no seu teorema só era aplicado quando as forças dependessem da posição e que os sistemas dissipativos não se prestariam a uma descrição dessa natureza.

---

<sup>18</sup> Segundo Moreira [126], Lanczos em seu "The Variational Principles of Mechanics", afirma que Euler teria descoberto o princípio da mínima ação independentemente de Maupertuis.

Após Euler, Lagrange<sup>19</sup> é quem expressa o PMA em uma formulação inteiramente geral como um princípio de ação estacionária para um sistema geral de  $n$  corpos interagindo entre si. Este empreendimento é feito em sua *Mécanique analytique*, publicada como sabemos em 1788.

Em 1834, William Rowan Hamilton (1805-1865) mostrou que o PMA admite outras representações. Assim ele estabeleceu uma forte analogia entre a mecânica e a ótica, relacionando o princípio de Fermat ao de Maupertuis. Foi assim que ele chegou a forma atual e mais usada do PMA como um princípio variacional da mecânica, conhecido como princípio de Hamilton.

De início, a postulação do PMA não causou nenhum abalo maior nem teve um efeito considerável no avanço da ciência, mesmo após a formulação geral feita por Lagrange. A existência deste princípio foi considerada mais como uma curiosidade matemática e até mesmo como um corolário desnecessário às leis de Newton. Também não faltaram vozes que se levantavam contra sua utilidade. Em 1837, Poisson denominou o PMA de *regra inservível*.

Somente com as investigações de William Thomson (1824-1907), Peter Guthrie Tait (1831-1901), Gustav Robert Kirchoff (1824-1887), Von Neumann (1832-1925) e Ludwig Boltzmann (1844-1906), principalmente, é que ficou provado que o PMA era o método mais adequado para resolver problemas de hidrodinâmica e elasticidade. Além disso, o PMA era insuperável quando os métodos usuais da mecânica ou funcionavam com dificuldade ou até falhavam. Só então é que seu valor e alcance começaram a ser percebidos. Isto fica claro da seguinte afirmação de Thomson e Tait, feita em 1867:

*O célebre princípio de Maupertuis da mínima ação tem sido, até o presente, olhado mais como uma curiosidade e uma propriedade de alguma forma estranha do movimento do que uma regra útil nas investigações cinéticas. Estamos fortemente impressionados e com a convicção de que um significado muito mais profundo está ligado a ele, não somente na dinâmica abstrata, mas na teoria dos vários ramos da ciência física agora começando a receber uma explicação dinâmica [127].*

Com o passar do tempo e o sucesso de suas aplicações, foi-se percebendo o significado fundamental do PMA como um princípio geral que podia ser aplicado a sistemas cujos mecanismos físicos internos eram inteiramente desconhecidos, ou então tão complicados que não podiam ser representados por meio de sistemas ordinários de coordenadas. Outro fato importante é que depois de Boltzmann, Rudolf Clausius (1822-1888) percebeu que existiam relações próximas entre o PMA e a

---

<sup>19</sup> Como sabemos, Lagrange em sua "Mécanique Analytique", postulou uma formulação geral do princípio da mínima ação para um sistema de  $n$  corpos interagindo entre si. Ver [122].

segunda lei da termodinâmica. Além disso, Hermann von Helmholtz (1821-1894), pela primeira vez, demonstrou existir uma completa e sistemática aplicação do PMA aos três grandes ramos da física: a mecânica, a eletrodinâmica e a termodinâmica. Isto deu ao PMA um status mais elevado e aprofundou sua compreensão como um princípio geral da natureza.

Dessa forma, o PMA seguiu um curso semelhante ao do princípio da conservação da energia que como sabemos foi originalmente considerado como um princípio mecânico, apesar de sua validade geral.

Mais recentemente, sem fazer uso de nenhuma hipótese mecânica, Joseph Larmor (1857-1942) em 1900 e Karl Schwarzschild (1873-1916) em 1903, entre outros, deduziram as equações fundamentais da eletrodinâmica e da teoria do elétron a partir do princípio de Hamilton.

Também com relação às mecânicas quântica e relativística, o PMA demonstrou sua validade e potencial explicativo. Em um primeiro momento, o caráter probabilístico da mecânica quântica parecia excluir o PMA de seu campo de aplicação. No entanto, Feynman em um estudo clássico mostrou que era possível incluí-lo neste campo e criou um princípio variacional englobando os fenômenos quânticos.

Finalmente, um dos resultados mais brilhantes alcançados pelo PMA foi o fato da teoria da relatividade de Einstein ter mostrado que ele ocupa uma posição de destaque entre as leis da física. A razão para isto é que a função denominada *ação*, segundo Hamilton e não a de Maupertuis é um invariante com respeito a todas as transformações de Hendrik Lorentz (1853-1928), significando que ela é independente do sistema de referência dos observadores.

Por tudo que foi dito neste breve esboço histórico do PMA, tudo indica que ele parece governar todos os processos reversíveis na natureza. O que continua em aberto é que ele não oferece nenhuma explicação para o fenômeno da irreversibilidade. De acordo com o PMA todos os fenômenos podem seguir em qualquer sentido no tempo, a exemplo das leis de Newton, podendo ir para frente e para trás.

### **3.5 O PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA**

A palavra energia é razoavelmente nova e seu sentido atual está relacionado ao princípio de sua conservação, estabelecido em 1847<sup>20</sup>. Não que uma noção

---

<sup>20</sup> Segundo Atkins, ref. [128], pg. 83, o termo energia deve-se a Thomas Young (1773-1829). Já Robert Locqueneux, afirma que foi William Thomson quem introduziu o termo energia, isto em 1850. Ver [129].



intuitiva não existisse desde muito tempo, como foi visto anteriormente. Eram bem conhecidas as descargas atmosféricas, a força dos ventos e das chuvas, etc. No entanto, esses *poderes*, como eram conhecidas essas forças da natureza, eram consideradas distintas e não relacionadas entre si. Como veremos, o princípio da conservação da energia vai não só relacioná-los, como unificá-los e enquadrá-los em uma mesma manifestação da natureza.

Um dos personagens chave no caminho da unificação das diversas visões e manifestações da energia é inegavelmente Michael Faraday (1791-1867) que de aprendiz de encadernador de livros, tornou-se uma figura extremamente importante da física do século XIX. Saído das camadas mais pobres da sociedade inglesa, conseguiu um emprego que tinha uma vantagem singular: *havia muitos livros lá*; revelou ele a um amigo anos depois. Algumas vezes ele passava noites sozinho a luz de velas para ler os livros que mais o interessasse. Quando tinha vinte anos, um visitante da oficina onde ele trabalhava ofereceu-lhe um ingresso para uma série de conferências na *Royal Institution*, proferidas por Sir Humphry Davy (1778-1829). Elas versavam sobre eletricidade e energias ocultas que deviam existir na natureza. As conferências não só despertaram seu interesse como também apontaram um caminho para uma vida melhor. Mas como entrar na vida acadêmica se nem tinha frequentado o que chamamos de escola secundária? Além disso, seus recursos materiais eram praticamente nulos. Seu pai era ferreiro e nunca tinha conseguido lhe dar coisa alguma.

Faraday utilizou então o recurso que mais dominava, a arte de encadernador. Com as notas das conferências de Davy, ele redigiu e inseriu alguns desenhos da aparelhagem das demonstrações e usando couro e ferramentas de entalhar, encadernou todo este material e encaminhou à Humphry Davy. Foi então que Davy manifestou o desejo de conhecê-lo, se encontraram e finalmente Faraday foi contratado como assistente de laboratório. Vários anos se passaram para que entre ele e Davy se estabelecesse um relacionamento natural e profissional.

Nessa época Davy pediu a Faraday que estudasse e procurasse entender uma descoberta que havia sido feita na Dinamarca e que vinha causando enorme repercussão em toda Europa. Tratava-se do experimento de Oersted (1757- 1851). Os fenômenos da eletricidade e do magnetismo eram conhecidos, mas completamente não relacionados. Foi então que um conferencista em Copenhague tinha descoberto que ao passar uma corrente elétrica através de um fio, ele defletia

a agulha de uma bússola, colocada sobre o fio <sup>21</sup>.

Ninguém tinha sido capaz de explicar como isto acontecia. Segundo alguns biógrafos de Faraday, a falta de uma formação melhor curiosamente favoreceu-o, o que normalmente não acontece. A falta de formação específica em matemática e em física impede até que se entenda a complexidade do problema físico estudado. Foi dessa forma que Faraday começou a estudar as relações entre eletricidade e magnetismo no verão de 1821. No laboratório ele prendeu um ímã e imaginou várias linhas circulares invisíveis passando em torno dele. Caso isso fosse verdade um fio frouxamente suspenso poderia ser arrastado, atraído pelos mencionados círculos. Ele ligou a pilha e o fio comportou-se como imaginado por ele.

Evidentemente, existem uma série de hipóteses sobre as crenças de Faraday, no sentido de tentar explicar o porque de suas suposições. Vamos evitá-las e somente assinalar que foi dessa maneira que ele fez a descoberta do século. Descobrendo o movimento de um fio conduzindo eletricidade em um campo magnético ele havia descoberto o princípio de funcionamento do motor elétrico, fenômeno que já tinha se manifestado na experiência de Oersted. Além desta descoberta, Faraday conseguiu relacionar energia elétrica com magnetismo e embora tanto o conceito de energia como o princípio de sua conservação ainda não tivesse sido estabelecido, ele deu uma enorme contribuição neste sentido ao fazer a ponte entre eletricidade e magnetismo. Posteriormente, Ampère (1775-1836), Gauss (1777-1855) e Ohm (1787-1854), desenvolveram suas teorias as quais permitiram compreender em profundidade o fenômeno dos campos magnéticos produzidos pelas correntes elétricas e o modo como elas fluem pelos condutores <sup>22</sup>.

A descoberta das leis que ligavam os fenômenos elétricos aos magnéticos criou as condições favoráveis no plano científico para que a Revolução Industrial atingisse sua segunda fase. Como sabemos, a primeira fase da Revolução Industrial caracterizou-se pela utilização da máquina a vapor e do carvão como forma de energia

---

<sup>21</sup> Maxwell, na introdução do livro de Faraday, referência [130], descreve a descoberta do fenômeno da indução das correntes elétricas por parte do mesmo: "Em dezembro de 1824, Faraday havia tentado obter uma corrente elétrica por meio de um ímã. Em três ocasiões, fizera tentativas complexas mas infrutíferas de produzir uma corrente num fio por meio de uma corrente noutro fio, ou por meio de um ímã. Mesmo assim, perseverou. Em 29 de agosto de 1831, obteve a primeira prova de que uma corrente elétrica poderia induzir outra num circuito diferente... Esse foi seu primeiro experimento bem sucedido. Em mais nove dias de experimentação, ele chegou aos resultados descritos em sua primeira série de "Pesquisas experimentais", lidas perante a Royal Society, em 24 de dezembro de 1831".

<sup>22</sup> Em setembro de 1820, na seção da Academia de Ciências que se seguiu aquela onde foram anunciadas na França as experiências de Oersted, André-Marie Ampère publicou suas primeiras observações sobre as ações magnéticas das correntes elétricas. Ele mostrou à Academia que as correntes elétricas se atraíam ou se repeliam mutuamente e seguiam aquelas leis, descoberta que ele chamava de eletrodinâmica e tem sua importância fundamental pelo fato de eliminar da ciência os fluidos magnéticos. Georg Simeon Ohm, começou suas experiências com correntes elétricas em 1825. Utilizou a pilha de Volta e substituiu-a posteriormente por elementos termo-elétricos cobre-zinco e pôde assim estabelecer a famosa lei que leva seu nome. Ver [131], pg. 210-215.

em substituição as máquinas movidas a água. A segunda fase ou a segunda Revolução Industrial foi a era da eletricidade e de suas aplicações aos motores e aparelhos elétricos, dos novos meios de transporte com o automóvel movido pelo motor de combustão interna. Essas mudanças nos meios de produção tiveram inúmeras implicações sociais que não cabe aqui tratar mesmo superficialmente.

No período que estamos analisando, ou seja, do final do século XVIII até as primeiras décadas do século XIX, as ciências físicas passaram por transformações sem precedentes em termos de rupturas com o paradigma newtoniano, bem como com o surgimento de perspectivas bastante promissoras no sentido de novas sínteses e novas teorias explicativas para os fenômenos físicos ligados a luz, ao calor, a eletricidade e ao magnetismo. Um quadro sintético dos acontecimentos mais significativos é apresentado a seguir:

a) Laplace (1749-1827) e seus seguidores haviam formulado uma teoria matemática baseada na mecânica newtoniana e que deveria ser ampliada aos fenômenos térmicos e óticos. Contudo, essa teoria teve que ser substituída por novos desenvolvimentos nas referidas áreas na década 1815-25. Apesar disso a matematização e a proposta unificadora do mundo físico contida no chamado projeto laplaciano teve um importante efeito no desenvolvimento posterior da teoria física <sup>23</sup>.

b) A publicação da teoria matemática de Joseph Fourier (1768-1830) para o calor em 1822 trouxe o estudo do calor para dentro da análise matemática, anteriormente aplicada somente para problemas mecânicos. Estabeleceu-se então uma diferença entre representação matemática e representação física. Em 1840, influenciado pela analogia matemática entre a teoria de Fourier do calor e a teoria eletrostática, William Thomsom explicou essas analogias de um lado, e do outro as leis do calor e da eletricidade, introduzindo novas visões com relação à mecânica das partículas de um fluido e um meio elástico <sup>24</sup>.

c) Em 1824, Sadi Carnot escreveu uma obra revolucionária: *Reflexões sobre a potência motriz do fogo*, em um contexto industrial no qual a tecnologia das

---

<sup>23</sup> No próximo capítulo, abordaremos em detalhes o chamado projeto laplaciano, suas influências e suas limitações.

<sup>24</sup> Joseph Fourier pode ser considerado como o primeiro físico-matemático típico. Seus estudos sobre a propagação do calor datam de 1807, ou antes, e foram agrupados em uma memória apresentada à Academia de Ciências em 1811, e sua obra "Théorie analytique de la chaleur", foi publicada em 1822. É na solução de sua famosa equação a derivadas parciais de segunda ordem, que ele apresenta o desenvolvimento das séries de Fourier. Ver [132].

máquinas a vapor crescia de interesse entre os engenheiros franceses e ingleses. Conforme veremos em detalhes no capítulo dedicado a Lazare Carnot, o modelo usado por Sadi para a análise dos princípios que regem as máquinas térmicas deve muito a seu pai Lazare. O trabalho de Sadi inaugura uma nova ciência a termodinâmica, inicialmente como uma ciência das máquinas e mais tarde como uma ciência geral dos processos de transformação na natureza <sup>25</sup>.

d) A teoria ondulatória da luz de Augustin Jean Fresnel (1788-1827), a qual supõe que a luz se propaga por vibrações de um éter mecânico, trouxe a ótica para o quadro conceitual da visão mecânica da natureza. Em 1830 essa teoria ondulatória foi aceita e os físicos passaram a explorar a grande variedade de teorias físicas e matemáticas na tentativa de construir uma teoria mecânica coerente da ótica <sup>26</sup>.

e) Ao examinar ao microscópio grãos de pólen suspensos em água, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) percebeu em 1827 que aquelas partículas permaneciam em movimento ao acaso. A este fenômeno que se observa tanto em líquidos como em gases, dá-se o nome de movimento browniano. Embora esta descoberta não esteja diretamente relacionada com as rupturas que estamos tratando, é importante deixar aqui registrado este fato, pois ele se relaciona diretamente com outra ruptura importante que iria acontecer só recentemente com a teoria atômica <sup>27</sup>.

---

<sup>25</sup> Sadi Carnot tinha plena consciência da importância que o desenvolvimento da máquina a vapor e seu emprego pelos diversos ramos da economia traria para a sociedade. Logo nas primeiras páginas de seu célebre ensaio podemos ler: “O estudo dessas máquinas é do mais alto interesse, sua importância é imensa, seu emprego cresce todos os dias. Elas parecem destinadas a produzir uma grande revolução no mundo civilizado. Há algum tempo a máquina a vapor explora nossas minas, faz mover nossos navios que cruzam os portos e rios, forjam o ferro, modelam a madeira, trituram os grãos, tecem e urdem nossos tecidos, transportam os mais pesados fardos, etc. Ela parece que um dia servirá como motor universal e vai obter a preferência sobre a força animal, as quedas d’água e as correntes de ar. Ela tem sobre o primeiro desses motores, a vantagem da economia; sobre os dois outros, a vantagem inestimável de poder se empregar em qualquer tempo e todos os lugares, e de jamais sofrer interrupção em seu trabalho”. Ver [133], pg. 2.

<sup>26</sup> A teoria ondulatória de Fresnel foi uma contribuição decisiva para o abandono das teorias dos fluidos imponderáveis. A origem de seu trabalho repousa na oposição não só ao esquema dos fluidos imponderáveis, como também a teoria corpuscular da luz de Laplace e a teoria do calórico para o calor. No início desses trabalhos por volta de 1814, Fresnel escreveu que suspeitava que a luz e o calor estariam de alguma forma conectados com as vibrações de um fluido. Seu compromisso com o conceito de luz como forma de movimento de um meio, foi básico para sua teoria ótica. Em 1821, ele reformulou a ciência da ótica em termos do movimento de propagação ondulatória em um meio, o éter luminífero. Ver [104], pg. 21.

<sup>27</sup> Einstein em um de seus cinco artigos publicados em 1905 vai estudar o movimento browniano e definir um coeficiente de difusão para as partículas em suspensão, em função da dimensão das partículas, da viscosidade do fluido, de sua temperatura e do número de Avogadro. Seguindo o caminho inverso, ou seja, tendo-se uma forma de medir este coeficiente de difusão, é possível determinar experimentalmente o número de Avogadro. Ver [134], pg. 26 e 27.

f) A formulação da lei da conservação da energia em 1847, embora tenha abalado a unidade da física, se esta unidade for olhada dentro do quadro conceitual anterior, ela, no entanto, colocou os fenômenos do calor, da luz, da eletricidade e do eletromagnetismo dentro de uma mesma base de princípios. É o que passaremos a descrever em detalhes até o final deste capítulo.

Um passo fundamental no sentido do estabelecimento do princípio da conservação da energia foi a medida da equivalência entre o trabalho mecânico e o calor. Nos séculos XVII e XVIII os físicos tinham considerado as perdas de energia dentro dos sistemas mecânicos como fatos isolados e provenientes de processos não mecânicos e assim não se aventuraram a enunciar uma teoria da equivalência entre o calor e a energia mecânica. O conceito da conservação da energia mecânica já pode ser encontrado no século XVIII em alguns autores. Como vimos anteriormente, Leibniz enunciou o princípio da conservação da força viva. Ele havia afirmado que a força viva, ou seja, o produto da massa pelo quadrado da velocidade se conservava nos processos mecânicos.

O que deve ser observado com cautela, é que o uso do princípio da conservação da força viva, apesar de largamente aceito, não significava um compromisso com as teorias da natureza de Leibniz. Este princípio foi especialmente aplicado ao choque perfeitamente elástico dos corpos.

Jean Bernoulli é o responsável pelas exposições mais sistemáticas e consistentes sobre o assunto no período de 1720 a 1730. É bem verdade que tanto ele quanto Leibniz já tinham percebido que poderia haver perdas nesses choques e eles faziam a analogia entre os choques elásticos a molas que eram impedidas de se expandirem após serem comprimidas. Assim eles explicavam as possíveis perdas no consumo de energia na compressão dos corpos.

Daniel Bernoulli posteriormente discutiu a operação de uma máquina térmica que utilizava força viva armazenada no carvão, pela geração de gases do carvão, mas não sugeriu qualquer equivalência entre calor e trabalho mecânico, nem mesmo atribuiu as perdas mecânicas da força viva nas colisões inelásticas ao calor; como os seus predecessores ele continuou a considerar as perdas do ponto de vista estritamente mecânico.

No começo do século XIX, a medida da força viva através do trabalho mecânico, isto é, o produto da força vezes distancia, foi introduzida em vários escritos de cunho mais tecnológico, como foi o caso de Lazare Carnot. Peter Ewart (1767-

1842) encontrou uma relação quantitativa entre o calor gerado pela queima de carvão e a potência mecânica ou força que ele poderia produzir.

Conforme veremos em detalhes, Lazare Carnot utiliza a conversão da força viva em trabalho mecânico, embora não adote o termo trabalho para o produto da força pelo deslocamento. Ficava claro que o trabalho era uma medida da energia no campo da mecânica, pois a soma dessas quantidades se conservava e se elas podiam ser somadas significava que elas se equivaliam.

As experiências de Rumford (1798) sobre o aquecimento produzido na usinagem de canhões mostraram que uma grande quantidade de calor era gerada neste processo. Ele então interpretou o fenômeno como advindo do movimento, ou seja, do atrito, ponto de vista adotado por Humphry Davy e Ampère. Rumford obteve também uma medida do equivalente mecânico do calor. Ela estabelecia que uma caloria era igual a 570 kgm, com um erro de 25%, aproximadamente.

O trabalho de James Prescott Joule (1818-1889) em 1840 foi de fundamental importância no esclarecimento dos processos de conversão, além de fornecer a confirmação experimental dessa equivalência quantitativa entre calor e trabalho mecânico. No começo da década de 40 do século XIX as investigações de Joule se concentraram no melhoramento das máquinas elétricas e também em eletroquímica, campo de investigação já abraçado por Faraday conforme vimos<sup>28</sup>.

Davy e Faraday tinham buscado formular uma teoria elétrica das afinidades químicas e Joule tentou também elaborar esta teoria no sentido de unificar os fenômenos elétricos, químicos e térmicos, demonstrando sua interconversão na forma de uma equivalência quantitativa. Para chegar a uma relação desta natureza entre trabalho e calor, ele construiu uma máquina elétrica na qual trabalho mecânico gerava uma corrente elétrica a qual, por sua vez gerava calor; o mecanismo fornecia a relação numérica entre calor e trabalho mecânico a ser calculado. Joule logo concluiu que trabalho mecânico podia ser diretamente transformado em calor pelo atrito.

Em 1847, Joule ilustrou a relação direta entre trabalho mecânico e calor esboçando na forma de desenho onde cordas ligadas a um peso, de forma que o peso podia ser elevado ou abaixado correspondendo a um decréscimo ou acréscimo na temperatura. Ele não publicou estes esboços do movimento transformando-se em calor, mas simplesmente afirmou que o calor foi medido através da força viva e

---

<sup>28</sup> Os primeiros estudos de Joule se concentram no aperfeiçoamento de eletro-ímãs, na fabricação de galvanômetros e nas propriedades das correntes voltaicas. A partir de 1841 ele passa a se preocupar com o calor gerado pelos circuitos elétricos e pelas máquinas magneto-elétricas. É este trabalho que o conduz a sua famosa lei.

assim que partículas de corpos aquecidos estavam em movimento <sup>29</sup>.

Se Joule teve uma importância fundamental no estabelecimento do princípio da conservação da energia, entretanto muitos outros participaram deste processo também complexo e descrito em detalhes por Thomas Kuhn em seu *A Tensão Essencial*, que teve uma primeira impressão em inglês em 1977. Logo no início Kuhn afirma: *Entre 1842 e 1847, quatro cientistas dispersos por toda Europa, Mayer, Joule, Colding e Helmholtz, e, salvo este último, ignorando cada um deles o trabalho dos demais, tornaram pública a hipótese da conservação da energia. Sadi Carnot, antes de 1832, Marc Séguin em 1839, Karl Holtzmann em 1845 e G. Hirn em 1854, escreveram cada um por seu lado suas convicções de que o calor e o trabalho são equivalentes quantitativamente e calcularam um coeficiente de conversão ou um equivalente.*

O que o livro de Kuhn se propõe a mostrar é o caso típico de uma descoberta simultânea em ciência e seus antecedentes, conforme a citação anterior fornece os elementos introdutórios. Além do mais ele também se propõe a explicar porque entre 1830 e 1850, *chegaram tão a superfície da consciência científica tantos experimentos e conceitos necessários para enunciar integralmente a conservação da energia.* A análise que Kuhn vai fazer em seu famoso artigo, enumera três fatores como aqueles que mais influenciaram essa descoberta simultânea e que resultou no enunciado da conservação da energia. São eles:

- a) a disponibilidade dos processos de conversão;
- b) o interesse pelas máquinas;
- c) a filosofia da natureza.

---

<sup>29</sup> O procedimento experimental adotado por Joule consistia em repetir vinte vezes o processo de agitação do líquido pelo movimento dos pesos e medir a temperatura final do líquido agitado. As paredes do recipiente que continha o líquido eram herméticas e fabricadas de madeira muito grossa, adequadamente tratada para minimizar qualquer perda de calor por convecção ou radiação. Suas conclusões foram as seguintes: 1) a quantidade de calor gerada pelo atrito entre corpos, sejam líquidos ou sólidos, sempre é proporcional a quantidade de trabalho mecânico produzido. 2) a quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de 1 libra de água (pesada no vácuo e tomada a uma temperatura entre 55 e 60 F) de 1,8° C (1° F) requer a ação de uma força mecânica representada pela queda de 772 lb (350,18 kg) de 1 ft (30,48cm). Entre 1845 e 1847, Joule repetiu esses experimentos usando água, óleo de baleia e mercúrio, obtendo para cada libra desses compostos os equivalentes mecânicos iguais a 781,5 lb; 782,1lb e 786,6 lb, respectivamente. Ver [135], pg.31.

O primeiro fator apontado diz respeito ao desenvolvimento da ciência, o segundo ao próprio processo da Revolução Industrial e finalmente o terceiro as idéias e teorias físicas da época. Façamos um detalhamento melhor desses fatores.

A disponibilidade dos processos de conversão ocorreu devido a um conjunto de descobrimentos que se iniciou com a invenção da pilha elétrica por Alessandro Volta (1745-1827) em 1800. De acordo com a teoria de Luigi Galvani (1737-1798) que era dominante na França e Inglaterra, corrente elétrica poderia ser obtida a partir das forças dispendidas pela afinidade química e esta conversão mostrou ser somente o elo de uma cadeia bem mais complexa que iria se revelando com o tempo. Também como já mencionamos, os trabalhos de Faraday, a experiência de Oersted e as propriedades magnéticas que podiam produzir movimento, fato dos mais conhecidos desde a antiguidade, além de que por fricção era possível produzir eletricidade, tudo isto foi sendo reunido, sistematizado e aos poucos as diversas conexões entre estes fenômenos foram sendo conhecidas.

E novas experiências e fenômenos ainda estavam por serem revelados. Em 1822, Thomas Johann Seebeck (1770-1831) demonstrou que o calor aplicado a uma cinta bimetálica produzia diretamente corrente elétrica. Doze anos depois Peltier conseguiu mostrar o processo inverso, ou seja, que a corrente elétrica podia absorver calor e desta maneira produzir frio. Dentro deste quadro mais complexo mostrado por Kuhn, as descobertas de Faraday em 1831 foram apenas mais uma expansão do campo de fenômenos no qual os processos de conversão aconteciam.

Kuhn também chama a atenção para um fato que consideramos muito importante para este empreendimento que é o papel que o princípio da conservação da *vis viva* desempenhou para o estabelecimento do princípio da conservação da energia. Ele afirma:

*Na maioria das histórias ou pré-histórias da conservação da energia se supõe que o modelo para quantificar os processos de conversão foi, o teorema dinâmico, conhecido quase desde o princípio do século XIX como conservação da “vis viva”. Este teorema possui um papel destacado na história da dinâmica, e resulta ser um caso especial de conservação da energia. Por isso bem pode tornar-se um modelo. Contudo, creio que é errônea a impressão prevalecente de que tal foi o caso. A conservação da “vis viva” foi algo importante para que Helmholtz deduzisse a conservação da energia e um caso especial – a da queda livre – do mesmo teorema dinâmico foi de grande ajuda para Mayer. Porém estes personagens extraíram também elementos importantes de outra tradição distinta – a da engenharia da água, do vento e do vapor – e essa tradição é de todo importante para o trabalho dos outros*



cinco precursores que lograram uma versão quantitativa da conservação da energia [76].

Com esta citação, Kuhn reforça um dos pontos de vista por nós adotados neste estudo, que é a importância da expansão do maquinismo na sociedade e seus efeitos, sendo um dos mais notáveis o desenvolvimento de teorias gerais para o estudo das máquinas, não sendo por acaso que o segundo fator por ele considerado seja o *interesse pelas máquinas*. Kuhn também adianta alguns comentários sobre Lazare Carnot:

*Até 1782, no “Essai sur les machines en general”, de Lazare Carnot, o produto da força pela distancia não recebe um nome especial nem uma prioridade conceitual dentro da teoria dinâmica. Esta nova concepção dinâmica do conceito de trabalho tampouco foi realmente desenvolvida nem difundida antes dos anos 1819-39, quando foi expressa cabalmente nos trabalhos de Navier, Coriolis, Poncelet e outros. Todos estes trabalhos se ocupam da análise de máquinas em movimento. Em consequência, o trabalho – a integral da força com respeito a distancia – é seu parâmetro conceitual fundamental. Entre outros resultados, significativos e características desta reformulação, estiveram a introdução do termo “trabalho” e das unidades para medi-lo, a redefinição da “vis viva” como  $\frac{1}{2} mv^2$  ou  $mv^2 / 2$  para preservar a prioridade conceitual da medida de trabalho, e a formulação explícita da lei da conservação da igualdade do trabalho realizado e a energia cinética produzida. Só quando esteve assim reformulada, a conservação da “vis viva” constituiu um conveniente modelo conceitual para quantificar os processos de conversão, e logo quase nenhum dos pioneiros o usou [76].*

Não comentaremos esta longa citação de Kuhn, pois dedicaremos os capítulos cinco e seis exatamente a questão da importância do conceito de trabalho tanto na teoria geral das máquinas de Carnot quanto em seus desdobramentos feitos pelos personagens também mencionados por Kuhn na referida citação.

Ainda seguindo o artigo de Kuhn, vejamos em linhas gerais as idéias que norteavam a filosofia da natureza daqueles que descobriram o princípio da conservação da energia. A corrente filosófica denominada de *Naturphilosophie* tem importância central e influência primordial para muitos daqueles cientistas que contribuíram para que o princípio da conservação da energia se estabelecesse. A palavra *Naturphilosophie* é proveniente do romantismo alemão e expressa um conceito que não tem equivalente lingüístico nas línguas francesa e inglesa. Os historiadores preferem a utilização do termo original de forma que possa designar uma maneira específica de especulação no plano cultural onde ele conheceu um

desenvolvimento rápido e fecundo. O período de seu surgimento é o final do século XVIII e nas décadas de 30 e 40 do século XIX este tipo de pensamento era bastante forte nas universidades alemãs.

Kuhn descreve a influência da *Naturphilosophie* sobre os descobridores do princípio da conservação da energia ao afirmar: *Colocando o organismo como a metáfora fundamental de sua ciência universal, os Naturphilosophen buscaram constantemente um só princípio que unificasse todos os fenômenos naturais. Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (1775-1854), por exemplo, sustentou que os fenômenos magnéticos, elétricos, químicos e até orgânicos, deveriam estar entrelaçados formando uma grande associação englobando toda a natureza*<sup>30</sup>.

Schelling buscou insistentemente os processos de conversão e transformação na ciência de sua época. Muitos de seus seguidores dominaram o ensino nas universidades alemãs e em outras partes durante o primeiro terço do século XIX, colocando de maneira similar a sua os novos fenômenos de conversão.

É fato conhecido que Oersted era um *Naturphilosoph*, perseguiu com afinco a idéia da relação entre a eletricidade e o magnetismo principalmente por suas convicções filosóficas. Em suma, muitos dos cientistas que trabalhavam nos laboratórios os processos de conversão extraíram de suas respectivas experiências uma concepção dos processos físicos. Se quiséssemos estabelecer os vínculos de outros personagens com a *Naturphilosophie* poderíamos acrescentar que Colding se ligou estreitamente a Oersted. Liebig estudou dois anos com Schelling. Adolf Hirn (1815-1890) freqüentemente citava tanto Lorenz Oken (1779-1851) como Kant. Robert Mayer não estudou a *Naturphilosophie* porém teve amigos mais próximos ligados a esses estudos. O pai de Helmholtz, amigo de Johann Fichte (1762-1814), mais jovem que ele, era um adepto daquela filosofia e exortava seu filho a abandonar o mecanicismo estrito.

Como vemos, ao contrário do que os positivistas possam pensar, a metafísica é não só útil na formulação das teorias científicas, bem como, é até inevitável que idéias de origem puramente metafísica possam influenciar o pensamento científico. Os exemplos são incontáveis. Além deste caso, ou seja, do estabelecimento de um princípio fundamental da física, temos muitos outros como a própria lei da gravitação universal. Ficou famosa a citação que John Maynard Keynes (1883-1946) fez por ocasião das comemorações do terceiro centenário de Newton. Ele afirmou: *Newton não foi o primeiro da idade da razão. Ele foi o último dos magos, o último dos babilônios e sumérios, a última grande mente a olhar para o mundo visível e para o*

---

<sup>30</sup> É comum considerar-se a influência de Immanuel Kant (1724-1804) e até de Leibniz e seu dinamicismo sobre Schelling. Para os dois primeiros pensadores o conceito primeiro é o de força inerente à matéria.

*mundo intelectual com os mesmos olhos daqueles que começaram a construir nossa herança intelectual menos de 10.000 anos atrás. Por que o chamo de mago? Porque ele encarava o universo inteiro e tudo que ele contém como um enigma, como um segredo que poderia ser lido aplicando o pensamento puro a certas evidências, certas chaves místicas que Deus havia posto no mundo de modo a permitir uma espécie de caça ao tesouro pela irmandade esotérica.*

Esta citação é feita devido a uma série de estudos e documentos que foram encontrados mostrando uma influência muito maior do que então se imaginava da alquimia sobre o pensamento de Newton. Uma visão positivista predominava então no pensamento da história da ciência representado principalmente por George Sarton. Daí porque as palavras proferidas por Keynes naquele longínquo ano de 1946 ainda hoje causem tanta comoção nos meios científicos.

Finalizando essas considerações sobre o princípio da conservação da energia, devemos observar que se as idéias de unificação dos fenômenos naturais saídas da *Naturphilosophie*, por um lado, desempenharam um papel fundamental nesta nova síntese ocorrida na física unindo diversos fenômenos de campos diferentes em um princípio mais geral, por outro, esta descoberta também fertilizou novas concepções e fortaleceu uma visão dinamicista da natureza. Na realidade tratava-se da própria superação do paradigma newtoniano que foi se fazendo nos diversos campos da física muitas vezes com a utilização do ferramental desenvolvido pelo próprio Newton. É o caso, por exemplo, de André-Marie Ampère (1775-1836) que efetua a primeira síntese físico-matemática entre eletricidade e magnetismo em sua *Memoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodinamiques uniquement déduite de l'expérience*, publicada em 1827.

É importante também assinalar que a superação de um paradigma da abrangência e poder explicativo que tinha o paradigma newtoniano não se fez sem resistências. Em 1867, quase dois séculos após a primeira edição dos *Principia* de Newton, William Thomson e Guthrie Tait, publicaram o seu *Treatise on Natural Philosophy* com grande sucesso e repercussão nos meios científicos. Nele os autores tentam *atualizar* a mecânica newtoniana e passam a defender a idéia de que a terceira lei de Newton (lei da ação e reação) é uma lei bem mais geral de conservação sendo uma precursora da lei da conservação da energia.

## Capítulo 4: O Dilema da Mecânica Racional

*“Gostaria que pudéssemos deduzir o resto dos fenômenos da natureza dos princípios mecânicos pelo mesmo tipo de raciocínio, pois, por muitas razões, sou induzido a suspeitar de que todos eles possam depender de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por algumas causas até aqui desconhecidas, ou são mutuamente impelidas umas em direção às outras e se ligam em formas regulares, ou são repelidas e se afastam uma das outras”.*

(Isaac Newton – Prefácio à primeira edição dos *Principia* (1687), EDUSP, 2002).

### 4.1 RESUMO HISTÓRICO DA MECÂNICA NO CONTEXTO DA FÍSICA

O estudo da mecânica desde os seus primórdios sempre esteve associado aos da geometria e muitas vezes aos da astronomia. É desnecessário dizer que a construção de qualquer gênero de teoria mecânica sempre pressupõe um tipo de espaço. No caso da mecânica clássica e teoria da relatividade restrita, o espaço euclidiano é o lugar onde o movimento ocorre, sua métrica é dada pela distância entre dois pontos calculada pelo teorema de Pitágoras. Com relação à astronomia, que está no centro da Revolução Científica do século XVII ainda podemos dizer que ela historicamente deu origem a física-matemática conforme observou Poincaré: *A física-matemática, como sabemos, nasceu da mecânica celeste que a engendrou no fim do século XVIII, no momento onde ela veio a ter seu completo desenvolvimento. Em seus primeiros anos, sobretudo, a criança parecia com a mãe de uma maneira impressionante* [136].

Passemos então a percorrer o longo e por que não dizer exitoso trajeto da mecânica. Os pioneiros dos estudos da mecânica foram Aristóteles e Arquimedes, como vimos no capítulo anterior, muito embora se tenha notícia de alguns registros anteriores. Sabemos que eles viveram em épocas próximas, porém diferentes. Aristóteles viveu no período da história grega que vai culminar com o fim das cidades-estado e Arquimedes no período alexandrino <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Bertrand Russel [137], 1º. Vol., pg. 249 afirma: “A história do mundo de língua grega, na antiguidade, pode ser dividida em três períodos: o das Cidades-Estados livres, levado a seu fim por Felipe e Alexandre; o do domínio macedônico de que o último resíduo se extinguiu com a anexação romana do Egito, depois da morte de Cleópatra e, finalmente, o do Império Romano. Desses três períodos, o primeiro se caracteriza pela liberdade e pela desordem, o segundo pela sujeição e pela desordem, e o terceiro pela sujeição e pela ordem.

As diferenças fundamentais entre esses dois pensadores no que se refere à mecânica é que a mecânica aristotélica se inscreve em um quadro conceitual bem mais amplo de sua própria filosofia. Explicando melhor, quando Aristóteles tenta caracterizar o movimento ele o faz tentando compreendê-lo não só enquanto movimento mecânico, como também dentro de um quadro de entendimento mais geral de mudanças e transformações. A mecânica de Aristóteles é inteiramente qualitativa e se realiza em um contexto histórico especulativo e de amplo desenvolvimento da filosofia da qual ele foi um dos expoentes máximos. É devido a isso que dentro de um mundo hierarquizado como o dele o próprio movimento também o seria. Daí sua classificação entre dois tipos de movimento o *natural* e o *violento*, sendo o primeiro aquele que ocorre quando um corpo tende a retornar a sua posição natural (para os corpos pesados, o centro da terra) e o segundo quando ele é retirado daquela posição (o caso do lançamento de projéteis).

A mecânica de Arquimedes e de toda escola Alexandrina é uma mecânica bastante especializada, ataca problemas específicos e é marcada por um novo contexto histórico criado com a expansão do império de Alexandre. Nessa época o império alexandrino passou por profundas reformas econômicas, mudanças na moeda, desenvolvimento do comércio e amplo intercâmbio entre os países através do mediterrâneo, criando novas demandas sociais incluindo aí as atividades militares.

Não é por acaso que Arquimedes além de desenvolver princípios mecânicos, como o do empuxo de um corpo mergulhado em um fluido, foi um excelente engenheiro militar. A ele são atribuídos muitos inventos e até histórias que carecem de comprovação <sup>2</sup>.

Ainda no período alexandrino temos dois importantes personagens: Pappus e Heron de Alexandria <sup>3</sup>.

Após o declínio da escola de Alexandria, o desenvolvimento da mecânica iria passar por um longo período de letargia e, posteriormente, estaria ligado à expansão do domínio muçulmano. Durante esse domínio a mecânica muito pouco se desenvolveu, mas outras ciências correlatas como a matemática e a astronomia tiveram um enorme impulso. Somente a ótica no domínio da física foi bastante desenvolvida pelos árabes.

---

<sup>2</sup> Também no mesmo autor, mesmo volume e página podemos ler: “O segundo desses períodos é conhecido como a idade helênica. Nas ciências e matemáticas, a obra realizada durante este período é a melhor já produzida pelos gregos. Na filosofia, inclui a fundação das escolas epicuristas e estóica, bem como a do ceticismo como doutrina definitivamente formalizada; é, portanto, ainda filosoficamente importante, embora menos do que no período de Platão e Aristóteles”.

<sup>3</sup> A Heron já nos referimos no capítulo anterior. Pappus viveu no IV século de nossa era e segundo René Dugas [12], parece ter sido o único matemático antigo a estudar o equilíbrio e o movimento de um corpo no plano inclinado. Esses estudos inspiraram homens de ciência da Renascença a lhes dar continuidade como Guido Ubaldi e Galileu. A Pappus também é atribuído o estudo do centro de gravidade, traçando linhas de um corpo suspenso, girando-o a partir de diversos pontos de suspensão.

Esta situação só começa a mudar no século XIII. Por essa época percebe-se um florescimento dos estudos filosóficos, teológicos e até científicos. Isto em grande parte se deve aos próprios árabes que não só produziram como também traduziram uma grande quantidade de textos científicos dos gregos. Foi também nessa época que surgiram as Universidades com características completamente diferentes das instituições precedentes <sup>4</sup>.

No século XIV uma nova e fundamental mudança iria se operar na concepção estabelecida de movimento. Essa mudança significava a retirada dos espíritos do mundo físico, tudo se encaminhando no sentido de uma compreensão da moderna lei da inércia.

Um dos primeiros pensadores neste novo contexto intelectual foi Jean Buridan (1300-1360) em meados do século XIV. Um pouco mais tarde seu discípulo Nicole Oresme (1350? - 1382) foi um pouco mais longe que Buridan, afirmando que deus podia muito bem ter posto o universo a funcionar como uma espécie de relógio e depois tê-lo deixado trabalhar por si próprio. Eram os primeiros passos no sentido de se retirar a metafísica dos fenômenos físicos até que se conseguisse chegar às leis do movimento.

É assim que Buridan chega a um desenvolvimento importante que é a doutrina do *impetus* de certa maneira resolvendo a contradição existente na física aristotélica quando tratava o movimento dos projéteis. Explicando melhor, quando Aristóteles afirma que movimento pressupõe força se isto for aplicado ao movimento dos projéteis, fatalmente se chega a conclusão que o ar além de oferecer uma resistência ao movimento também é a fonte de sua força motriz, um paradoxo difícil de ser resolvido até a teoria do *impetus*. Além do mais Oresme desenvolveu uma forma diagramática de representação da variação de uma grandeza e que posteriormente possibilitou a visualização gráfica do movimento. Com isto ele também pode ser considerado como o precursor do sistema de coordenadas <sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Em [138], pg. 153, lemos: “A palavra “Universitas” não designava, na Idade Média, um conjunto de escolas estabelecidas na mesma cidade, mas a comunidade de alunos e mestres que participavam do ensino ministrado no mesmo lugar. O “studium generale” ou “universale”, era um centro para o qual convergiam estudantes das mais remotas procedências. Tais centros de estudos eram fundados por iniciativa e sob o patrocínio da Igreja, nas cidades consideradas importantes do ponto de vista das ordens religiosas”.

<sup>5</sup> Em [112], pg. 59, podemos ler: “Seguiremos o Tractatus de figuratione potenciarum et mensurarum differentiarum. Oresme parte do princípio que toda coisa mensurável pode ser pensada como uma quantidade contínua. Cada intensidade pode ser representada por meio de uma linha reta erguida verticalmente de cada ponto do “sujeito” que afeta a intensidade”. Em outras palavras, na linha horizontal ou extensão representava-se a grandeza que afetava a quantidade cujos valores eram representados verticalmente. Com isto Oresme construiu diagramas cinemáticos, representando o tempo como extensão, na linha horizontal, e dividindo-o em partes proporcionais formando uma progressão geométrica de razão  $\frac{1}{2}$ , sendo o primeiro termo  $\frac{1}{2}$ . Dessa forma ele podia determinar a velocidade em qualquer intervalo do movimento e a distancia total percorrida.

Devemos também mencionar por essa época, devido a sua importância para a história da mecânica os trabalhos da escola de Oxford. Eles fazem importantes estudos no terreno da lógica. Um de seus principais expoentes é William Heytesbury que por volta de 1371 foi chanceler da Universidade de Oxford. Sua maior contribuição foi o conceito de aceleração, fato inteiramente desconhecido pela escola de Paris de Buridan e Oresme <sup>6</sup>.

No início do século XIV, na Itália, começa a surgir um fértil desenvolvimento cultural. Era o início do renascimento italiano. Uma das características desse movimento é a sua corrente humanista. Quando nos referimos ao humanismo estamos falando da tendência surgida nesta época e que atribuía enorme importância aos estudos clássicos, bem como a considerar a antiguidade clássica como modelo e medida de todas as atividades culturais. Um personagem emblemático dessa época é naturalmente Francesco Petrarca (1304-1374).

No século XV surge uma importante escola italiana e a mecânica sofre um grande desenvolvimento. Seus expoentes principais são: Blasius de Parma (1327? - 1416), Nicolau de Cusa (1404-1464) e Leonardo da Vinci (1452-1519). Leonardo é uma das figuras mais interessantes desse período que precedeu a Revolução Científica. Ele é um misto de engenheiro, artista, cientista e inventor. Entre os problemas mecânicos por ele estudados estão: aplicação do conceito de momento de uma força, movimento de um corpo rígido sobre um plano inclinado, resolução de um sistema de forças, energia de um corpo em movimento, estudo da forma da terra, teoria do centro de gravidade, queda dos corpos, hidrostática, entre muitos outros estudos <sup>7</sup>.

No século XVI, na ante-sala da Revolução Científica, surge uma figura também interessante para a história da mecânica que é Domingos de Soto (1494-1560), de procedência espanhola. Essa importância se deve ao fato de seu trabalho fundamental versar sobre a queda dos corpos.

Outros vultos importantes desse período surgem na Itália. Os principais são: Nicolau Tartaglia (1500-1557) e Bernardino Baldi (1553-1617). O primeiro faz estudos de dinâmica, principalmente sobre o movimento dos projéteis e Baldi estuda problemas de equilíbrio como a estabilidade de uma balança.

---

<sup>6</sup> Na referência [112], pg. 66 e 67 lemos: "Heytesbury foi professor do Merton College em 1330, pertenceu ao Queen's College por volta de 1340 e foi chanceler da Universidade de Oxford em 1371"... "Em seu tratado *De Tribus Praedicamentis*, Heytesbury distinguiu entre a "latitudo motus" (velocidade) e a "velocitas intensionis vel remissionis motus" cujo valor era o acréscimo ou o decréscimo da última. Esta quantidade corresponde a aceleração. Como será visto ainda neste capítulo, quem vai introduzir o conceito de aceleração na França é Varignon.

<sup>7</sup> Leonardo da Vinci, Jerome Cardan (1501-1576) e Simon Stevin ao estudarem a possibilidade de uma máquina de movimento perpétuo e concluírem pela sua impossibilidade, deram uma importante contribuição no sentido da discussão do problema da conservação da energia.

Ainda na Itália temos Guido Ubaldi (1545-1606) e Benedetti (1530-1590). Ubaldi foi uma grande autoridade em mecânica e é considerado por muitos um dos mestres de Galileu. Lagrange cita-o varias vezes em sua *Mécanique Analytique*. Ele também foi um crítico severo dos escolásticos do século XIII. Benedetti estudou praticamente toda a mecânica da época e publicou um trabalho bastante abrangente em 1585.

Os desenvolvimentos seguintes vão desembocar diretamente na Revolução Científica. Embora esse movimento seja um processo social de amplitude bem maior do que uma reviravolta nos procedimentos científicos, significando profundas mudanças sociais e culturais, se observarmos principalmente o desenvolvimento científico, é possível distinguir em uma primeira fase uma revolução de natureza cosmológica ligada aos nomes de Copérnico (1472-1543), Ticho-Brahe (1546-1601) e Kepler (1571-1631)<sup>8</sup>.

Em uma segunda fase, temos evidentemente o estabelecimento da revolução no método científico através dos trabalhos de Galileu (1564-1642) sobre o movimento e posteriormente Newton (1642-1727), sistematizando, aprofundando e estendendo as leis do movimento para o sistema solar<sup>9</sup>.

É muito importante citar ainda o nome de Descartes (1596-1650) principalmente pelo desmonte de grande parte do velho e deteriorado edifício da escolástica que teimava em ficar de pé. Ao propor a dúvida como método Descartes desferia um golpe de morte na escolástica fundada no dogma e no princípio da autoridade. Do ponto de vista da mecânica propriamente dita ele é importante na

---

<sup>8</sup> Em [139], pg. 20, podemos ler: “A reforma astronômica, não é, no entanto, a única finalidade da Revolução. Outras alterações radicais no entendimento do homem sobre a natureza se seguiram à publicação do *De Revolutionibus* de Copérnico, em 1543. Muitas dessas inovações, que culminaram século e meio mais tarde com a concepção de Newton sobre o universo, eram resultados não previstos da teoria astronômica de Copérnico. Copérnico sugeriu o movimento da terra com a intenção de melhorar as técnicas usadas para prever as posições astronômicas dos corpos celestes. Para as outras ciências, a sua sugestão levantou simplesmente novos problemas e, até estarem resolvidos, o conceito dos astrônomos sobre o universo era incompatível com o dos outros cientistas. Durante o século XVII, a reconciliação destes outros cientistas com a astronomia de Copérnico foi um motivo importante para a fermentação intelectual agora conhecida como Revolução Científica. Ao longo da Revolução Científica, a ciência ganhou um novo papel importante que, desde então, tem desempenhado no desenvolvimento da sociedade e pensamento ocidental”.

<sup>9</sup> Ludovico Geymonat, [140], ao analisar a revolução no método científico propiciada por Galileu, afirma: “O franco apelo à experiência não consistia certamente algo radicalmente novo nos tempos de Galileu, nem ele tentou apresentá-lo como uma peculiaridade de sua metodologia” ... (pg. 322) “É universalmente reconhecido que a principal inovação trazida por Galileu à metodologia científica, consiste, justamente no largo uso da matemática como instrumento indispensável para o conhecimento da natureza”...(pg. 311) “O ponto que nos interessa ressaltar é, no entanto, um outro: é a sua clara intuição do quanto é essencial para a observação científica dos fenômenos proceder a sua mensuração. Esta, e somente esta, permite de fato, descrever com exatidão o decurso dos fenômenos diferenciando as experiências que parecem quase idênticas para um observador leigo. Ela permite, além disso – uma vez traduzidos os dados observados em números – enquadrar os resultados da experiência em um discurso matemático não somente mais rico, mas enormemente mais rigoroso que o discurso comum. Têm-se assim uma física não mais qualitativa, mas quantitativa, cuja superioridade sobre a velha ciência tradicional não tardou a impor-se em todos os campos”. (pg.329)



construção de sua base conceitual e como vimos no capítulo anterior sua idéia de conservação da quantidade de movimento foi bastante útil a Newton para que ele estabelecesse o conceito de força como responsável pela variação da quantidade de movimento. Além do mais, Descartes contribuiu de forma fundamental para a matematização do espaço um passo indispensável para a Revolução Científica.

Os problemas com a mecânica clássica começaram quando se tentou aplicar o princípio da relatividade galileana a outros campos da física como foi o caso da eletrodinâmica [141]. Os experimentos de Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923) tinham mostrado que a velocidade da luz era a mesma independente do movimento relativo do observador e da fonte, isto em todas as direções. Assim, a transformação galileana não pode estar correta e deve ser substituída por uma transformação que preserve a constância da velocidade da luz em todos os sistemas. Tal transformação é conhecida como transformação de Lorenz, aplicável a fenômenos físicos (mecânicos) e eletromagnéticos. Com isto Einstein em 1905 fez uma série de postulações formando a base da teoria da relatividade especial [142]. Em uma dessas postulações o tempo absoluto é descartado e o tempo agora é considerado como uma quarta coordenada no espaço euclidiano tridimensional.

A teoria da relatividade geral surge quando se tenta eliminar as forças inerciais que aparecem quando o observador está associado a um referencial em rotação. Como elas são de natureza cinemática podem ser eliminadas tomando-se como referência um referencial galileano. No entanto as forças gravitacionais não podem ser eliminadas através dessas transformações, dando origem a uma nova teoria, chamada de teoria gravitacional de Einstein ou relatividade geral [143].

Em um outro domínio da física, as explicações provenientes da mecânica clássica se mostraram inteiramente insuficientes para explicar os fenômenos. Tratava-se de fatos ligados a radiação ou mais precisamente a relação entre aquecimento e radiação. A solução desse problema por Max Planck (1858-1947) no início do século XX iria abrir um outro enorme campo de desenvolvimento chamado de mecânica quântica [144].

Este é um resumo muito breve e destituído de detalhes das teorias dos fenômenos da mecânica, no contexto da física e das idéias científicas e filosóficas em geral.

## 4.2 A FORMALIZAÇÃO DA MECÂNICA NO SÉCULO XVIII

É durante o século XVIII que a mecânica newtoniana sofre uma profunda mudança na sua formalização. Podemos mesmo dizer que com esta formalização realizada por Lagrange, ela é significativamente renovada, enriquecida e transformada, passando a ter a denominação pela qual é hoje conhecida: mecânica clássica. Tentaremos descrever este processo em suas linhas gerais naquilo que ele tem de mais significativo.

### ANTECEDENTES

A formalização realizada na mecânica por Lagrange se deve ao pleno desenvolvimento do cálculo diferencial e integral e que tiveram como seus pioneiros Newton e Leibniz. É conveniente também neste momento tentar estabelecer algumas relações entre o desenvolvimento mencionado e outros avanços ocorridos em áreas correlatas, para que possamos melhor entender o próprio progresso que se deu na mecânica como fazendo parte de um processo mais amplo, descrito em linhas gerais no item anterior. Do ponto de vista do que foi realizado por Lagrange com a mecânica, um mesmo movimento de pensamento anima-o em diferentes domínios: em álgebra, em análise ou em mecânica, ou seja, ele está na busca de uma base comum na qual possa realizar várias sínteses e obter *a priori* métodos, demonstrações e procedimentos os mais uniformes possíveis e válidos nos casos os mais gerais. Lagrange deseja realizar um duplo movimento de redução: da mecânica à análise e da análise à álgebra <sup>10</sup>.

Uma primeira observação e que poucos se dão conta é a quase que completa separação entre o desenvolvimento do cálculo diferencial e do cálculo integral, a despeito dos manuais os apresentarem como um único desenvolvimento.

Em primeiro lugar surgiu o cálculo integral e somente muito tempo depois o cálculo diferencial. A idéia da integração aparece dos vários processos de somatórios ligados ao cálculo de áreas, volumes e comprimentos. A diferenciação foi criada bem mais tarde surgindo de problemas envolvendo as tangentes de curvas, bem como das questões relacionadas com a procura de máximos e mínimos de uma função. Só depois é que se verificou que integração e diferenciação estavam relacionadas entre si sendo uma operação inversa da outra. Isto se passa principalmente no século XVII,

---

<sup>10</sup> Ver o capítulo II de [145], pg. 29, intitulado "O ideal analítico de Lagrange".

mas tem algumas relações com a matemática grega. Os nomes de Eudoxo e Arquimedes <sup>11</sup> estão associados á história do cálculo por alguns métodos e técnicas de subdividir figuras estando esses raciocínios na base da idéia dos infinitésimos ou do cálculo aproximado das áreas e volumes de figuras e até da questão do limite.

Nos tempos mais recentes vamos encontrar em Bonaventura Cavalieri (1598-1647), discípulo de Galileu um primeiro precursor do cálculo. Em seu tratado, *Geometria indivisibilibus*, publicado em 1635 ele apresenta o seu *método dos indivisíveis*. É um tratado muito prolixo e não muito claro, sendo de difícil entendimento o que ele quer dizer com *indivisível*. Pelo que pode se depreender do seu tratado, o indivisível de uma área seria uma corda dessa mesma área e um indivisível de um sólido uma seção do mesmo. Os resultados desses estudos levaram ao que se conhece hoje como os princípios de Cavalieri:

- 1º) Se duas porções planas são tais que toda reta secante a elas e paralela a uma reta dada determina nas porções segmentos de reta cuja razão é constante, então a razão entre as áreas dessas porções é a mesma constante.
- 2º) Se dois sólidos são tais que todo plano secante a eles e paralelo a um plano dado determina nos sólidos, seções cuja razão é constante, então a razão entre os volumes desses sólidos é a mesma constante.

Com essa contribuição dava-se um passo importante no sentido da subdivisão de figuras planas ou sólidas e que ao longo do tempo, na medida que outros conhecimentos fossem sendo agregadas, daria origem ao método de integração.

Com relação ao processo de diferenciação, podemos dizer que ele se originou nos procedimentos para a determinação dos máximos e mínimos de funções, traçando-se tangentes a essas curvas.

Embora os gregos antigos de alguma forma tivessem abordado problemas parecidos, a primeira manifestação clara do método diferencial aparece com Pierre Fermat (1601- 1665) que expressou essas idéias em 1629 <sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> Em [146], pg. 171, podemos ler: “A teoria das proporções de Eudoxo (nascido por volta de 408 a C.), exposta no livro V dos “Elementos” de Euclides é uma tentativa de dar um estatuto às grandezas incomensuráveis e testemunha de uma certa maneira a admissão dos números irracionais no campo da matemática grega. Ela está na base do método da exaustão, que permitirá aos gregos resolver problemas que se resolverão mais tarde como pertencendo ao cálculo infinitesimal: cálculo do comprimento de curvas, cálculo de áreas ou volumes determinados por curvas ou de superfícies curvas, determinação de centros de gravidade, construção de tangentes, etc.

<sup>12</sup> Em [147], pg. 429, podemos ler: “Embora a lógica do processo de Fermat deixe muito a desejar, vê-se que o método equivale a impor:  $\lim f(x+h) - f(h) = 0$ ”

Também Kepler já tinha observado que os incrementos de uma função tornavam-se infinitesimais nas vizinhanças de um ponto de máximo ou de mínimo comum. Fermat usou este fato como método para determinar esses pontos de máximo e de mínimo [147].

Antes de chegarmos novamente ao cálculo de Newton e Leibniz, temos dois predecessores imediatos de Newton na Inglaterra: John Wallis (1616-1703) e Isaac Barrow (1630-1677).

Wallis foi o primeiro a discutir as cônicas como curvas do segundo grau ao invés de considerá-las como seções de um cone. Em 1655 ele publica *Arithmetica infinitorum*. Neste livro são sistematizados e estendidos os métodos de Descartes e Cavalieri.

Barrow nasceu em Londres em 1630. Completou seus estudos em Cambridge e era considerado um especialista em grego. Foi substituído em sua cátedra por Newton por indicação sua. A obra mais importante de Barrow é *Lectiones opticae et geometricae*. Nesse livro já podemos encontrar uma abordagem muito próxima do processo moderno de diferenciação mediante o uso do chamado *triângulo diferencial* que ainda hoje podemos encontrar em alguns textos de cálculo.

Ainda é atribuído a Barrow o fato que diferenciação e integração são operações inversas uma da outra. Essa importante descoberta que é conhecida como teorema fundamental do cálculo, aparece enunciada e demonstrada nas já citadas *Lectiones*.

## **AS FERRAMENTAS**

Após os desenvolvimentos conseguidos no século XVII, os métodos infinitesimais se multiplicaram surgindo a necessidade de os reunir, dar-lhes um ordenamento. Este esforço de sistematização foi realizado por Newton e Leibniz. Este último um jesuíta, filósofo e homem político alemão. Independentemente, eles inventaram o procedimento algorítmico e estabeleceram as conexões entre vários problemas aparentemente isolados. Dessa forma eles construíram um ramo autônomo da matemática e são considerados os fundadores do cálculo diferencial e integral.

Os escritos de Newton sobre o cálculo infinitesimal são três. Eles foram publicados no início do século XVIII e tiveram uma influência bastante restrita. Isto porque Newton hesitou durante toda sua vida em publicar seus resultados. Uma primeira menção rápida de sua teoria das fluxões apareceu em 1687 em sua obra máxima de mecânica, precisamente nos *Principia*. As proposições sobre velocidades, acelerações, as tangentes às curvas, tudo isso estabelecido de forma geométrica nos

*Principia*, foram um forte estímulo no sentido das pesquisas sobre o cálculo infinitesimal.

Podemos encontrar três concepções diferentes na obra de Newton sobre o cálculo infinitesimal: - A concepção infinitesimal, influenciada por Barrow e Wallis. Nela, Newton opera com quantidades infinitamente pequenas que chama de *momentos* e que são equivalentes aos incrementos de Fermat; - No método das fluxões, que é a mais famosa, ele considera as quantidades matemáticas como engendradas por um aumento contínuo, de forma semelhante ao espaço que descreve um corpo em movimento. Dessa forma, as variações daquelas quantidades são equivalentes às velocidades dos movimentos que as engendra. Essas velocidades são chamadas de *fluxões* [80]; - A terceira e última concepção é conhecida como método das primeiras e últimas razões. Ela aparece em sua *Quadratura curvarum*, escrito em 1676 e publicado em 1704. Nela, Newton tenta eliminar todo traço do infinitamente pequeno, inicialmente não considerando senão suas relações.

Embora de maneira muito diferente, a contribuição de Leibniz à criação do cálculo infinitesimal não é menos importante. Depois de seus estudos de direito e filosofia, Leibniz se engaja na política e parte em missão diplomática na corte de Luis XIV. Durante sua estada em Paris, ele conhece Huygens (1629-1695) que é membro da Academia de Ciências, recém criada. Ele inicia estudos das obras de Cavalieri, Roberval, Pascal, Descartes, Gregory e Wallis.

Em 1676 Leibniz deixa Paris para seguir uma carreira política em Hanover. Em seguida publica seus trabalhos sobre o cálculo diferencial em uma série de artigos breves, que aparecem a partir de 1684 no *Acta Eruditorum*, jornal científico fundado com seu apoio neste mesmo ano em Leipzig. É importante observar que muitos dos seus resultados jamais serão publicados.

O que faz a força do método leibniziano é a simplicidade de seu algoritmo, sua notação elegante, seu formalismo operatório que permite efetuar quase que automaticamente os cálculos independentes da natureza dos objetos envolvidos. Seu método também se situa e contém elementos formais associados a uma base montada em analogias geométricas. Depois de eliminar a natureza metafísica dos infinitamente pequenos, ele os considera como simples auxiliares da mesma maneira que os números imaginários em análise matemática. Na ausência de definições rigorosas, ele interpreta às vezes os infinitamente pequenos em termos de variações instantâneas, como o fez Newton <sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Para uma consulta a maioria dos artigos de Leibniz concernentes ao cálculo infinitesimal, ver [148]. "Analyse des infiniment petits, pour l'intelligence des lignes courbes" (1696).

Apesar de tudo, ou seja, da generalidade dos métodos, da algebrização dos cálculos, o cálculo infinitesimal ainda não repousava em bases sólidas do ponto de vista conceitual. Seus conceitos fundamentais como limite, derivada e integral não estavam muito bem definidos. Era uma questão de tempo, faltando chegar outras contribuições que seriam agregadas aos poucos.

Quem primeiro passou a utilizar e ao mesmo tempo desenvolver esse novo ramo da matemática foi Jacques Bernoulli (1654-1705). Pouco após sua nomeação em 1687 para a Universidade de Basiléia, ele pede a Leibniz através de carta datada de 15 de Dezembro de 1687, esclarecimentos sobre certos aspectos do novo cálculo. Leibniz em razão de viagem à Alemanha, Áustria e Itália, só respondeu três anos mais tarde em 24 de Dezembro de 1690. Nesse interregno Bernoulli não perde tempo. Ele foi estudando e assimilando o cálculo, até que no número de Maio de 1690 da *Acta Eruditorum*, aplica pela primeira vez o cálculo resolvendo o problema proposto por Leibniz em 1687 : o da curva isócrona.

Simultaneamente, Jean Bernoulli com a ajuda de seu irmão Jacques também se inicia no novo cálculo. A partir de 1690, os dois irmãos Bernoulli, trabalhando em estreita cooperação e ainda contando com a ajuda de Leibniz, vão aplicar os novos métodos nos assuntos mais variados.

Acontece então um fato curioso. Em sua estada parisiense durante o inverno de 1691-1692, Jean Bernoulli inicia o Marquês de L' Hôpital no cálculo de Leibniz. A partir dessas lições é que o Marquês vai redigir o primeiro tratado de cálculo diferencial, publicado em Paris no fim do mês de Junho de 1696 com o título: *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*. O Marquês em carta dirigida à Jean Bernoulli, datada de 15 de Junho de 1696, deixa a outros a tarefa de desenvolver e escrever sobre o cálculo integral.

O Marquês de l'Hôpital é uma das figuras mais importantes do grupo de matemáticos e cientistas pertencentes ao círculo de Malebranche (1638-1715). Podemos citar ainda vários outros como Reyneau, Jacquemet, Bernard Lamy, Varignon e Fontenelle. Os trabalhos de André Robinet e Pierre Costabel, citados por Michel Blay [83], atribuem a este grupo uma espécie de reforma da matemática cartesiana. Ela consistiria em uma rápida assimilação dos novos métodos leibnizianos e seria responsável pela introdução do cálculo infinitesimal na França.

Michel Blay também destaca o trabalho pioneiro de Pierre Varignon, que a partir dos algoritmos leibnizianos, constrói os conceitos de velocidade instantânea e força aceleratriz. Esses novos resultados são propostos em duas memórias à Academia Real. A primeira datada de 5 de Julho e a segunda de 6 de Setembro de 1698:

- a) Règles générales pour toute sorte de mouvements de vitesses quelconques variées à discrétion.
- b) Application de la règle generale des vitesses variées, comme on voudra, aux mouvements par toutes sortes de courbes, tant mécaniques que géométriques. D'où l'on déduit encore une nouvelle manière de démontrer les chutes isochrones dans la cycloïde renversée <sup>14</sup>.

## A MECÂNICA LAGRANGEANA

No começo do século XVIII a mecânica newtoniana estava perfeitamente estabelecida em termos de seus fundamentos e leis. Por outro lado, o cálculo diferencial e integral vinha sendo desenvolvido e havia se tornado uma ferramenta indispensável na solução de uma série de problemas tanto da física como da matemática. Estavam, portanto criadas as condições de possibilidade para a introdução desses novos procedimentos analítico e algorítmico na ciência do movimento que também já tinha alcançado enormes progressos na sua matematização (geometrização). E é precisamente neste período e neste contexto que a mecânica vai conhecer uma verdadeira refundação.

Em 1736, Euler elabora o primeiro tratado sobre a mecânica do ponto material<sup>15</sup> (*Analytice exposita*). Um pouco depois d'Alembert vai expor sua filosofia da mecânica em um discurso preliminar a seu célebre *Traité de Dynamique* em 1743.

D'Alembert vai trabalhar o conceito de força, questionando a concepção de Newton, considerando-a como uma noção derivada, e se não chega a aboli-la, a primazia está dada pela massa e todos os elementos puramente cinemáticos.

Intervindo no debate lançado por d'Alembert, em 1744 Maupertuis (1698-1759), inspirado em Fermat, procura um principio variacional que seja compatível com sua opinião sobre a proporcionalidade das velocidades de propagação com os índices de refração. É nesse momento que Euler dá ao principio de Maupertuis uma forma

---

<sup>14</sup> A primeira memória, segundo [83] tinha por objetivo: "Fornecer uma expressão geral para a velocidade, suscetível de permitir o tratamento de todos os movimentos no caso das trajetórias retilíneas, qualquer que seja o modo de variação da velocidade". Segundo ainda o mesmo autor: "A construção do conceito de velocidade em cada instante constitui uma etapa capital. Ela não toma, entretanto todo o seu sentido senão após a construção do conceito de "força aceleratriz" em cada instante; pois, então, as expressões desses conceitos podem ser deduzidas um do outro por um simples cálculo manuseando os algoritmos leibnizianos".

<sup>15</sup> O título completo do trabalho de Euler é: "Mechanica sive motus scientia analytice exposita". Trata-se de uma espécie de programa de investigação. Euler após ler os fundadores da mecânica, principalmente Huygens e Newton, dedicou-se a transformar a mecânica em uma ciência racional começando desde as definições e tentando ordenar suas proposições.

integral em um anexo de seu tratado sobre o cálculo das variações, em 1744, fundamentando-o matematicamente <sup>16</sup>. Em 1760 Euler publica sua *Theoria motus corporum solidorum rigidorum*, obra que foi revista e aumentada por seu filho Johann Albrecht Euler (1734-1800) e publicada em segunda edição em 1790 <sup>17</sup>.

Nos seus estudos sobre o corpo rígido, Euler define em cada sólido um centro de massa ou *centro de inércia*, noção fixada pela consideração do conceito de inércia. Ele também define os momentos de inércia e decompõe o movimento de um sólido livre, em movimento de seu centro de inércia e rotação em torno de um eixo passando por este centro.

É também neste tratado que Euler propõe pela primeira vez as equações diferenciais clássicas que governam o movimento de um corpo rígido em torno de um ponto fixo e onde aparece o momento das forças aplicadas ao corpo, as componentes de rotação instantânea do corpo e suas derivadas, juntamente com os momentos de inércia do corpo em torno do ponto fixo.

Esses são alguns dos antecedentes importantes à formalização da mecânica por Lagrange, os quais devem ser mencionados para que possamos identificar com mais precisão a sua contribuição <sup>18</sup>.

A *Mecanique Analytique* de Lagrange apareceu em 1788, vindo coroar uma série de estudos aos quais já nos referimos parcialmente e de forma concisa no começo deste item. É o próprio Lagrange quem define os seus objetivos com a publicação de seu tratado. Vejamos o que ele diz:

*Nós já temos vários tratados de mecânica, mas o plano deste é inteiramente novo. Eu me proponho reduzir a teoria desta ciência, e a arte de resolver problemas que se relacionam através de fórmulas, por meio de fórmulas gerais, e dessa forma o simples desenvolvimento dá todas as equações necessárias para a solução de cada problema. Espero que a maneira que acabo de desenvolver, preencha este objetivo, não deixando nada a desejar.*

---

<sup>16</sup> Ao “Tratado de Dinâmica” de d’Alembert já nos referimos anteriormente em [106]. Ainda com relação a Euler, em 1744, ele escreve “Methodus inveniendi lines curvas maximi minimi proprietate gaudentes”, em cujo apêndice n<sup>o</sup>. II com o título “De moto projectorum in medio non resistente per methodum maximorum ac minimorum determinande”, onde ele afirma: “nas trajetórias que os corpos descrevem sob a ação de forças centrais, a integral da velocidade multiplicada pelo elemento de curva, passa sempre por um máximo ou por um mínimo”. Este trabalho é de suma importância para o cálculo variacional que Lagrange iria desenvolver mais tarde, sendo um de seus pontos de partida.

<sup>17</sup> Em 1752, Euler publica uma “Descoberta de um novo princípio da mecânica”, que é precisamente a segunda lei de Newton escrita na forma matemática que conhecemos atualmente.

<sup>18</sup> Do ponto de vista do próprio Lagrange, a conexão de seus trabalhos com os de Euler pode ser encontrada em uma carta de 1755 do jovem Lagrange, nesta época com 19 anos, e dirigida a Euler, na qual ele explica que tinha deduzido um método geral para tratar os problemas propostos por Euler em seu clássico tratado de 1744, ou seja o “Methodus inveniendi”, ao qual já nos referimos na nota (16). São também importantes para o desenvolvimento do trabalho posterior de Lagrange, duas memórias que são conhecidas como memórias de Turim e que foram publicadas em 1760-61: “Essai d’une nouvelle méthode pour déterminer les máxima et les mínima des formules indefinies” e “Application de la méthode exposée dans le mémoire précédent à la solution de différents problèmes de dynamique”. Ver [149], pg. 198.



*Esta obra terá, por conseguinte uma outra utilidade; ela reunirá e apresentará sob o mesmo ponto de vista, os diferentes princípios encontrados até aqui para facilitar a solução das equações da mecânica, e mostrará a ligação e a dependência mútua e submeterá a julgamento sua justeza e seu entendimento.*

*Eu dividi o estudo em duas partes: a estática ou a teoria do equilíbrio, e a dinâmica ou a teoria do movimento; e cada uma dessas partes tratará separadamente dos corpos sólidos e dos corpos fluidos.*

*Não se encontrará em parte alguma figura nesta obra. Os métodos que são expostos não necessitam nem construções, nem raciocínios geométricos ou mecânicos, mas somente operações algébricas, sujeitas a uma marcha regular e uniforme. Aqueles que amam a análise, verão com prazer a mecânica como um novo ramo, e me serão gratos de ter estendido assim o seu domínio.*

## **O PROJETO DA MECÂNICA RACIONAL**

Por volta de 1800, Laplace era, depois de Lagrange, o sábio mais famoso da França. Sua obra é essencialmente constituída pela aplicação da análise matemática em duas direções principais: a mecânica celeste e a teoria das probabilidades. Em 1796, ele publicou *L'Éxposition du système du monde*, uma espécie de livro de divulgação científica, sem fórmulas matemáticas, onde se encontram explicados simplesmente todos os conhecimentos astronômicos de seu tempo além de também conter a teoria sobre a formação do sistema solar a partir de uma nebulosa em rotação. No domínio da mecânica celeste, Laplace reuniu o fundamental de sua contribuição em uma obra monumental o *Traité de la mécanique céleste*. Sendo uma obra extensa, ela começa a aparecer em 1799 [145].

A importância do trabalho acima referido é que Laplace ataca o problema dos três corpos, a estabilidade do sistema solar, o movimento dos cometas, a teoria da lua, os satélites de Júpiter, etc. Além disso, ele desenvolve muitas ferramentas matemáticas para esses estudos a ponto de ter ficado conhecido como o Newton da França.

Em uma comparação um pouco superficial entre Laplace e Lagrange, poderíamos dizer que o primeiro estava interessado na matemática sobretudo na sua utilidade de resolver problemas e na possibilidade de colocar o método geral da análise na base de cada problema. Já Lagrange estava inteiramente voltado para a pureza e elegância das soluções analíticas, bem como para encontrar novas sínteses do conhecimento.

Na virada do século XVIII e começo do século XIX, conforme vimos no capítulo anterior, acontece uma nova revolução na física e a revolução na química. Laplace se interessa juntamente com Lavoisier pelo fenômeno do calor e publicam uma pesquisa chamada *Memoire sur la chaleur*, em 1783. Nesta época também passam a conviver duas hipóteses sobre o calor. O calor como fluido, o calórico, e o calor como o resultado de movimentos insensíveis de partículas de matéria. Na busca de uma nova síntese que pudesse explicar esse novo quadro científico em um ambiente profundamente influenciado pelas idéias newtonianas é que surge o chamado projeto laplaciano.

Assim, nas primeiras duas décadas do século XIX Laplace e alguns de seus seguidores passaram a defender pontos de vista segundo os quais a refração ótica, a coesão dos sólidos, o efeito de capilaridade e as reações químicas eram o resultado das forças atrativas exercidas pelas partículas da matéria da mesma forma que a lei da gravitação universal de Newton. Embora essas proposições não fossem de todo originais, pois Clairaut (1713-1765) tinha tentado desenvolver uma teoria matemática baseada em forças moleculares em seu estudo de refração ótica e ação de capilaridade, entre 1730 -1740, Laplace estuda também esses dois fenômenos em seu *Tratado de mecânica celeste*, publicado em 1808. Ele enfatiza a universalidade deste programa explanatório e tenta estendê-lo a outros fenômenos físicos, lançando dessa forma o programa laplaciano.

Laplace rejeitou a tradição da mecânica racional em favor de uma nova física universal baseada na hipótese de movimentos moleculares e forças a eles associados e que fossem aplicados à ótica, fenômenos térmicos e elétricos.

O chamado programa laplaciano foi apresentado de forma mais desenvolvida por Denis Poisson (1781-1840) como uma teoria da *mecânica física* com o objetivo de substituir a *mecânica analítica* de Lagrange. Poisson passou a defender essa nova mecânica argumentando que a teoria que lhe dava sustentação, ou seja, a das forças moleculares poderia ser aplicada à problemas semelhantes aos resolvidos pela mecânica lagrangeana, isto é cordas vibrantes, superfícies elásticas e mecânica dos fluidos<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> Na realidade o chamado programa laplaciano estava ligado a uma quantidade significativa de jovens pesquisadores. Eles chegaram a formar uma espécie de centro de investigações conhecido como "Societé d'Arcueil". Muito resumidamente a história desse grupo começa com o retorno de Claude-Louis Bertholet da campanha do Egito em 1799 e adquire uma propriedade em Arcueil, uma vila situada a uns cinco quilômetros ao sul de Paris. Laplace e Bertholet já eram amigos desde a última eleição para a Academia de Ciências em 1780. Ambos eram próximos de Lavoisier e ativos participantes da ciência francesa. A eles vieram unir-se vários jovens pesquisadores como Jean-Baptiste Biot, Louis-Jacques Thénard, Joseph Gay-Lussac, etc. Após 1807, vieram juntar-se ao grupo Étienne Louis Malus, Dominique François Jean Arago e Simeon Denis Poisson. Ver [149].

Apesar do fracasso do projeto laplaciano em tentar unificar uma série de fenômenos do mundo físico sob a égide da mecânica, ele teve uma importância considerável para o desenvolvimento da física do século XIX. Ele incentivou uma série de trabalhos experimentais e passou a privilegiar as medições e os métodos experimentais como o paradigma das ciências do mundo físico.

Ainda no campo de influência das idéias de Laplace, um seu seguidor e associado o químico Louis Berthollet (1748-1822) postulava que a afinidade química era também o resultado das forças atrativas entre as partículas da matéria acrescentando ainda que este fenômeno e o da atração gravitacional eram semelhantes. Ele também enfatizava para o caso das afinidades químicas a importância da massa. Apesar das dificuldades e até mesmo do fracasso em se estabelecer para a química um quadro explanatório e uma teoria coerente com uma base experimental essas idéias tiveram a sua importância para o desenvolvimento posterior desta ciência.

O projeto laplaciano falhou em sua tentativa de montar um quadro explicativo e unificador para as ciências particulares do mundo físico nas primeiras décadas do século XIX. Seu desmoronamento, no entanto, foi acelerado por motivos políticos. Na França napoleônica ele contou com o apoio oficial que desapareceu com a queda de Napoleão em 1815. Assim, a teoria das afinidades foi substituída, seja pela química atomística de Dalton ou pela química dos equivalentes, a teoria do calórico pelos estudos de Fourier e posteriormente pela termodinâmica e a menina dos olhos da teoria laplaciana, ou seja, a ótica corpuscular pela teoria ondulatória da luz. Contudo, o ideal de matematização do mundo físico, os métodos experimentais e a quantificação, ao lado da postulação de modelos representando a realidade do mundo físico acompanharam a física e seus desenvolvimentos posteriores.

Com o declínio do projeto laplaciano a mecânica agora hegemonicamente representada pela mecânica lagrangeana passou a ser o paradigma das ciências do mundo físico influenciando até as ciências sociais em especial a economia. Dessa maneira, as idéias e o projeto dos cartesianos para a mecânica, qual seja, a de uma teoria bastante formalizada, que dispensasse o concurso da experimentação e que fosse extraída exclusivamente da razão passaram a ser dominantes. Se isto por um lado satisfazia toda uma corrente de pensamento, por outro criava um problema razoavelmente sério que era a incapacidade da mecânica racional criar uma teoria explicativa para as máquinas no quadro de uma explosiva expansão capitalista, principalmente na Inglaterra, caracterizada exatamente pelo predomínio e utilização do maquinismo em larga escala industrial. Este é o dilema ao qual nos referimos e cuja solução começará a se delinear com Lazare Carnot e terá prosseguimento com a

geração de engenheiros politécnicos das três primeiras décadas do século XIX. Este será o objeto de todo o Capítulo 5 e 6. Antes disso, vejamos de forma bastante breve o quadro geral do desenvolvimento da mecânica dos práticos e construtores de máquinas, mecanismos e dispositivos.

### 4.3 O SABER DOS PRÁTICOS E CONSTRUTORES DE MÁQUINAS

No prefácio dos *Principia* de Newton podemos ler: *Os antigos dividiam a mecânica em duas classes, uma teórica, que procede por demonstrações exatas, a outra prática. Desta última resultaram todas as artes que nós denominamos mecânicas, donde esta ciência tirou sua denominação: mas como os artesãos têm o costume de operar com pouca exatidão, então realmente distinguimos a mecânica da geometria, onde tudo que é exato se refere a esta e tudo que é menos exato a primeira* [81].

Tendo percorrido o longo caminho da mecânica teórica, mesmo que de forma extremamente concisa, vejamos também, muito brevemente, o talvez até mais longo trajeto da outra mecânica à prática. Antes é necessário acrescentar que esses dois ramos do saber, ou como dizia Newton, essas duas classes de mecânica caminharam muitas vezes em paralelo, de tempos em tempos se cruzavam e mutuamente se influenciavam apesar de que muitos dos mais eminentes expoentes da mecânica teórica terem dedicado parte de seus trabalhos à construção de máquinas e mecanismos variados<sup>20</sup>.

Começemos a trilhar os caminhos da mecânica prática pela Escola de Alexandria. A rigor o saber prático da mecânica nasce quando o homem constrói a primeira ferramenta para atuar sobre a natureza e se quiséssemos retroceder a este período faríamos uma viagem fascinante no tempo, mas perderíamos em objetividade e nos desviaríamos do curso principal.

Alexandria foi fundada por Alexandre, o grande, em Novembro de 332 a.C., quando ele chegou ao Egito. O local exato da cidade era perto do braço ocidental do rio Nilo, em um lugar entre o mar e o lago Mareotis, protegida pela ilha de Faros. Ela chegou a ser a segunda maior cidade do Egito e importante porto marítimo.

---

<sup>20</sup> Os casos mais conhecidos são de Galileu, que era um exímio construtor de aparelhos, dos quais o mais famoso é o telescópio. O segundo exemplo é o de Huygens, que como vimos deu uma contribuição essencial ao aperfeiçoamento do relógio de precisão. O terceiro caso é o de Leibniz que além de ter construído uma máquina de calcular que efetuava as quatro operações, foi engenheiro de minas em Harz, uma localidade distante cerca de cem quilômetros de Hanover. Lá ele projetou moinhos de vento com pás movendo-se no plano horizontal ao invés do movimento no plano vertical como era usual na época.

Durante o período grego Alexandria tornou-se um centro de intenso comércio entre a Europa e o oriente e em menos de um século de existência ultrapassou Cartago em tamanho. Pela importância que a cidade teve não somente como centro do helenismo, mas como lugar privilegiado onde se desenvolveu a ciência grega, ela ocupa um lugar de destaque na história da ciência. A biblioteca de Alexandria chegou a ter 500 mil volumes e outras instituições foram criadas como o museu e o observatório, abrigando uma espécie de complexo centro de investigação científica <sup>21</sup>.

Alexandria declinou em importância e em população quando a paz no império foi rompida. Em 616 ela foi tomada dos bizantinos pelos persas e em 642 pelos árabes tendo tido seu período áureo entre 330 a 200 a.C..

Ligados a esta escola, como construtores de máquinas e mecanismos, estão Archytas, Ctesíbios e Philon de Bizâncio, entre os anos 400 e 200 a.C. Uma outra figura muito importante é Heron de Alexandria que viveu em época mais recente que os citados anteriormente, ou seja, na segunda metade do século II ou talvez no século I a.C., Heron, como veremos, foi um grande criador e construtor de autômatos.

A contribuição da Escola de Alexandria à ciência é inestimável. Além dos surpreendentes avanços científicos lá se desenvolveram os mais variados tipos de equipamentos e dispositivos para os mais diversos fins. Equipamentos militares, instrumentos de medição, brinquedos e dispositivos de utilidade doméstica e geral. Desde o fim do IV século a.C., já eram conhecidos a polia, a alavanca, a cunha e o parafuso com utilização generalizada. A partir daquele século o parafuso sofreu uma inovação interessante e passou a ser utilizado como máquina para bombear água. Este tipo de dispositivo ficou conhecido como parafuso de Arquimedes <sup>22</sup>. Nessa época o parafuso começou a ser usado como prensa, inicialmente com um e depois com dois parafusos com a finalidade de aumentar a pressão sobre a peça de trabalho.

Uma série de invenções no período considerado está associada à figura de Ctesíbios. Sua origem é desconhecida e dele só sabemos que era filho de um barbeiro, desconhecendo-se por completo quando e onde nasceu, como também a data de sua morte. Sabe-se apenas que trabalhou em Alexandria por volta de

---

<sup>21</sup> A contribuição da Escola de Alexandria às ciências é de suma importância. Na matemática temos Euclides, que dirigiu o Museu de Alexandria em um período situado entre 330 e 260 a. C. . Apolônio, que nasceu em Perga, cidade situada ao sul do que é hoje a Turquia, entre 246 e 221 a. C., e trabalhou em Alexandria durante um certo tempo. Ele é o autor do livro "Sobre as cônicas". Ainda na matemática e na mecânica, temos Arquimedes (287-212 a. C.), Heron e Pappus. Na astronomia, outro ramo científico que ocupa uma posição de destaque naquela escola, temos os nomes de Aristarco, que nasceu em Samos e viveu entre 310 e 230 a. C. Hiparco de Nicéia e Ptolomeu, que nasceu no Egito por volta do ano 100 de nossa era e ao que tudo indica passou toda sua vida em Alexandria onde morreu em cerca de 170.

<sup>22</sup> Os historiadores e especialistas no assunto acreditam que seja razoável admitir que Arquimedes inventou ambos, a hélice infinita e o parafuso-bomba. Arquimedes ao inventar este dispositivo estava interessado no problema da quadratura do círculo. Uma grande quantidade de textos da antiguidade também se refere a bomba de Arquimedes como sendo uma invenção sua. Ver [150].

270 a.C.. Um dos primeiros de seus inventos foi um espelho ajustável a qualquer posição ligado a um contrapeso que era movido por uma corda presa a uma bola de chumbo que por sua vez movia-se dentro de um tubo expelindo ar. Este mecanismo foi usado na barbearia de seu pai.

Os estudos com ar comprimido levaram-no a investigações sobre os princípios pneumáticos. Entre seus inventos estão ainda uma bomba de ar comprimido com válvulas e uma bomba hidráulica. Sabe-se ainda que ele desenhou catapultas operadas por molas de bronze e uma outra a ar comprimido. Apesar de suas habilidades com o ar comprimido seus inventos mais famosos são as clepsidras dotadas de fluxo constante de água e que operavam toda sorte de alavancas e peças automáticas como sinos, bonecos móveis e pássaros canoros. Podemos dizer que ele foi o precursor do relógio cuco.

Com relação a Heron como construtor de máquinas, a situação é bem mais conhecida. A maior parte de seus escritos chegou até nós graças principalmente a publicação por Thévenot, em 1693, de quatro de seus principais trabalhos: o *Tratado das máquinas de guerra*, os *Pneumáticos*, os *Autômatos* e a *Quirobalística*. Contudo, desde um século antes a publicação em latim do *Autômatos* já havia suscitado um grande interesse nos meios técnicos, meios esses já inteiramente abertos e receptivos a este tipo de pesquisa. Assim, muitos dos elementos apresentados por Heron passaram a ser reproduzidos agregando-se os avanços da época. Mas o maior eco desses trabalhos só iria ocorrer no século XIX e Heron de Alexandria passaria rapidamente a ser reconhecido como grande inventor inclusive de uma máquina a vapor e do sistema de engrenagens.

Como Vaucanson (1709-1782), que apareceria vinte séculos depois, Heron adquiriu uma grande reputação como criador de autômatos. E é neste domínio que ele aplica mais claramente suas preocupações científicas e seu grande senso mecânico. Um lugar de destaque ocupa os teatros de autômatos pela sua engenhosidade e criatividade. Ele lança mão de artifícios de muito bom gosto e inteligência e utiliza princípios surpreendentemente modernos para colocar esses mecanismos em movimento. Analisando os inventos de Heron, podemos destacar duas idéias fundamentais e que também pertencem a arte de representar dos gregos: a programação e a regulação por retroação. A primeira podia-se perceber claramente no projeto das carruagens. Elas se moviam em cena segundo um ciclo meticulosamente definido e preestabelecido. Geralmente o movimento era fornecido por um motor de areia, mecanismo bastante simples que através da descida de um contrapeso transmitia o movimento a duas rodas motrizes. Tudo era cuidadosamente programado. O peso do pistão, o volume da areia e a dimensão do furo permitiam regular a

potência, a distância percorrida e a velocidade da carruagem. Este teatro rolante podia mover-se em um sentido depois em outro, seguindo um programa.

Os mecanismos para a transmissão de movimento utilizavam polias e barbantes e também engrenagens. A contribuição de Heron para a fabricação e utilização de engrenagens é extremamente interessante e moderna. Em seu *Mecânicas* ele descreve os trens de engrenagens, com engrenagens retas (cremalheiras) e engrenagens circulares além de parafusos sem fim, tudo com a finalidade de deslocar pesadas cargas a partir de um esforço mínimo.

A diferença entre Ctesíbios e Heron não está na engenhosidade com que as máquinas são criadas, mas principalmente nos fenômenos físicos que são colocados em prática, isto é em seu espírito científico. A este respeito Heron se destaca na utilização da compressibilidade do ar e na incompressibilidade da água. Sem ter feito nenhuma formulação teórica sobre esses conceitos ele os aplica notadamente em seus dois autômatos mais célebres: o mecanismo de abertura de portas de um templo e a turbina térmica. Essa turbina, o mais famoso e popular de seus inventos e que aparece em todos os livros-texto de máquinas térmicas, funciona a base do princípio da ação e reação e é movida a vapor. A água contida em um reservatório na parte inferior do aparelho é aquecida, vaporizada e o vapor alimenta a esfera que entra em rotação devido a duas saídas do vapor. Na realidade este aparelho era um mero brinquedo e dessa maneira só muito remotamente pode ser considerado como um ancestral da turbina a vapor.

Por uma questão de espaço omitiremos as contribuições de Heron em outros domínios das máquinas como é o caso das máquinas e dispositivos com fins militares bem como sua contribuição no campo da mecânica teórica como diria Newton. Como é do nosso conhecimento, as motivações militares ocuparam muitos fabricantes e construtores de máquinas no período que estamos considerando, fato que tem se repetido até hoje. Este clima extraordinariamente propício à inovação só vai se repetir durante a Renascença

No período árabe, que se segue imediatamente ao fim da Escola de Alexandria, e no qual o espírito mecanicista grego é em grande parte preservado, vamos ter na figura de Al - Jazari um engenheiro com muitos pontos em comum com Heron. Dele sabemos que nasceu em meados do século XII ao norte da Mesopotâmia, entre o Tigre e o Eufrates com o nome de Ibn al - Razzaz al - Jazari e que passou vinte e cinco anos de sua vida a serviço do soberano Artuquides. Esses serviços faziam parte de uma longa tradição entre os califas e o meio científico e técnico da época. Esta também era uma das formas de financiamento das pesquisas e as outras se faziam através das academias, bibliotecas, hospitais e observatórios, tudo dentro

do espírito do Islã que tendia a colocar em evidência o conhecimento em suas diversas facetas.

Al - Jazari nos deixou um tratado intitulado *Tratado da teoria e da prática das artes mecânicas*, publicado em 1206. Este trabalho vai muito além das obras anteriores do gênero. O que faz a sua originalidade é que ele é um tratado técnico para ser usado por técnicos, engenheiros e artesãos na medida em que descreve as máquinas que realmente podem ser construídas com base nesses textos e desenhos fornecidos. É muito difícil avaliar corretamente o impacto desses escritos sobre as gerações seguintes, mas é possível constatar que muitas realizações posteriores trazem a marca ou lembram em grande medida as máquinas descritas por Al - Jazari.

Outro fator importante a considerar com relação a Al - Jazari, é que suas preocupações na arte da construção mecânica, ultrapassam em muito a construção de autômatos. Seguindo uma tradição que vem de Alexandria, ele se interessa por fontes e relógios de água, aplicações práticas da mecânica de uma maneira geral em especial os sistemas de transmissão de potência. Ele se dedica ainda às máquinas para o bombeamento e armazenamento de água, preocupações que são muito comuns no oriente-próximo. Nesta região a máquina é o verdadeiro campo da experimentação (não no sentido científico) da mecânica. Nas máquinas que são construídas neste período, aparece um elemento novo que é o sistema biela-manivela, o qual só será usado na Europa três séculos mais tarde <sup>23</sup>. É necessário que se diga tratar-se ainda de um sistema primitivo, mas nem por isso menos inovador. Isto porque é a primeira tentativa de transformar um movimento contínuo circular em movimento alternativo através do deslizamento de uma manivela passando por um furo oblongo como será feito mais tarde por seus sucessores.

Al - Jazari também deu contribuições importantes aos relógios de água, uma preocupação constante dos engenheiros árabes. Ele introduziu uma série de inovações nas clepsidras, entre as quais: calibração dos orifícios, utilização de modelos em papel para os desenhos complicados, elaboração de gabaritos em madeira, estudo do balanceamento estático das rodas, etc. Ele é ainda responsável por inovações importantes nos sistemas de regulação por retroação, em grande parte influenciado por Ctesíbios.

---

<sup>23</sup> Para uma exposição mais detalhada do surgimento do sistema biela-manivela, ver o artigo de Bertrand Gille em [151], pg. 173. Segundo ele a primeira imagem de um sistema biela-manivela aparece num manuscrito alemão conservado em Munique e datado no período de 1421 a 1434. Trata-se de um moinho movido a braço. Também Leonardo da Vinci chegou a reinventar o mecanismo, mas sua construção prática era problemática.



Com a queda de Bagdá em 1258, esta cultura técnica continuará esquecida por muito tempo <sup>24</sup>.

Seguindo nosso percurso pelo vasto território do saber prático da mecânica, vamos observar que a partir da Idade Média, as máquinas que tiveram uma importância mundial foram a roda hidráulica e o relógio. Ao relógio já nos referimos embora que brevemente no Capítulo 2. Vamos então descrever em linhas gerais alguns aspectos do desenvolvimento da roda hidráulica.

A roda hidráulica, precursora da turbina hidráulica, conhece um progresso acelerado a partir do século XI, devido a sua importância para o sistema econômico da Europa ocidental, onde vai se abrir uma longa era de prosperidade que dura três séculos. Do ponto de vista técnico, essas máquinas não diferem muito daquelas usadas pelos gregos e romanos alguns séculos antes. Sua importância se deve muito mais ao fato de funcionar como parte essencial de uma unidade produtiva, localizada no campo ou na cidade. Vendo sob outro ponto de vista essas máquinas fazem parte de um vasto sistema energético <sup>25</sup>.

Evidentemente, que a energia tradicional de origem animal ainda joga um papel considerável nessa época, e é usada paralelamente às rodas hidráulicas, como mais tarde os moinhos de vento seriam usados para suprir as necessidades energéticas da sociedade. Observando a roda hidráulica como um sistema mecânico, veremos que ela se compõe de elementos bem distintos. Temos uma construção civil, para abrigar a unidade como um todo, uma ou várias rodas, mecanismos de transmissão de movimento ou potência, equipamentos e dispositivos hidráulicos, seja para armazenamento ou escoamento da água. Existe ainda uma variabilidade muito grande dos dispositivos suplementares utilizados e uma dependência considerável dos fatores geográficos. A estrutura e disposição do moinho de água dependem do débito do rio, da altura de queda da água, das variações sazonais, etc.

A referência mais confiável sobre as origens da roda hidráulica é o tratado de Vitruvius denominado *De Architectura* publicado no primeiro século a.C. Este tipo de máquina já existia nas civilizações antigas gregas e romanas. Seu surgimento na

---

<sup>24</sup> Nesta época Bagdá era um grande centro de comércio e importante pólo cultural. A queda de Bagdá em 1258, se deve a invasão mongol à Mesopotâmia, comandada por Hulagu, que saqueou a cidade, matou o califa Al – Mustasim e segundo consta teria matado 800 mil pessoas. Bagdá nunca se recuperou totalmente senão com a emergência do Iraque como estado independente depois da primeira guerra mundial.

<sup>25</sup> Lynn White Jr., em seu artigo “Tecnologia e invenção na Idade Média”, pg. 88 de [151], afirma: “Mas, do século XII, e mesmo do século XI em diante ocorreu uma rápida substituição da energia humana por energia não-humana onde quer que grandes quantidades de força fossem necessárias ou onde o movimento requerido fosse tão simples ou monótono a ponto de permitir que um homem fosse substituído por um mecanismo. A maior glória da Idade Média tardia não foram as catedrais, seus épicos ou sua escolástica; foi a construção pela primeira vez na história de uma civilização complexa que se apoiava não nas costas de escravos ou cules esfalfados, mas basicamente em energia não-humana”.

região do mediterrâneo é praticamente simultâneo a sua aparição na China. Existem também registros dessas máquinas na Itália, Portugal, nos países escandinavos e na Gália (França) embora em pequeno número de unidades (algumas dezenas) antes do século IX. No século seguinte verifica-se uma grande expansão desses sistemas devido a uma série de fatores de natureza econômica, entre os quais podemos citar: mudanças na agricultura, como importação e cultura de novas categorias de trigo e que necessitavam de outro tipo de moinho, exploração de florestas com demandas de serras mecanizadas, progressos na metalurgia e demanda de ferro e forjas hidráulicas.

Apesar de sua origem antiga e sua larga utilização, a roda hidráulica só será objeto de estudos científicos mais sistemáticos no começo do século XIX. Um dos primeiros desses estudos é o de Bélidor no século XVIII. Nos séculos anteriores as principais inovações ocorreram por conta da experiência e dos esforços individuais dos construtores de máquinas, muitas vezes simples artesãos que asseguravam a substituição de peças e até das próprias rodas no que é conhecido hoje na engenharia como manutenção corretiva. As modificações e aperfeiçoamentos que essas máquinas vão sofrendo fazem parte de reflexões e processos de tentativa e erro e só muito recentemente a partir de formulações em termos teóricos.

Na transição da Idade Média para a Renascença duas figuras são muito importantes no progresso das rodas hidráulicas: Francesco di Giorgio Martini e Leonardo da Vinci. O primeiro nos deixou inúmeros desenhos dessas máquinas e que prefiguram de uma maneira impressionante a turbina hidráulica. Leonardo que se interessou por esses dispositivos, trabalhou essencialmente com o movimento da água e os vórtices, tendo também nos deixado desenhos de extraordinária qualidade.

Conforme havíamos mencionado no início deste item, a produção teórica e o movimento dos práticos nem sempre caminhavam em paralelo. Muitas vezes se influenciavam mutuamente e mais recentemente até se enfrentaram. É o que podemos depreender a partir de uma mudança importante ocorrida nos séculos XV e XVI. Uma espécie de movimento dos técnicos, práticos e construtores de máquinas reivindicando um maior reconhecimento social. Seus desdobramentos no plano sociocultural aparecem na forma de obras de literatura de um gênero diferente e muito particular. É o caso de Agrícola (1494 -1555). Sua obra principal *De re metalica*, surgida um ano após a sua morte, era destinada e buscava o reconhecimento daquelas profissões consideradas inferiores. Este livro foi escrito em latim, uma língua muito mais usada pelos sábios e letrados da época do que pelos práticos, diretamente interessados nela. Outras figuras também contribuíram para este movimento como Alberti, Piero della Francesca, Martini, Biringuccio, Tartaglia, etc.

No final do século XVI os práticos e construtores de máquinas tomaram consciência de sua força e passaram a questionar as teorias propostas pelos sábios oficiais. Isto fica claro se observarmos uma outra vertente deste movimento. Vesálio em seu *De humani corporis fabrica*, publicado em 1543, critica abertamente os médicos pelo seu desprezo pelo trabalho manual. Segundo ele, os médicos deixaram de dissecar cadáveres e estão a recitar de cor o que lêem.

Esta breve digressão é somente para ressaltar a importância do conhecimento prático, de seus aspectos sociais e culturais para a Revolução Científica em marcha. A introdução do método experimental que muito deve aos práticos e construtores de máquinas, significa também uma nova forma de ordenar o conhecimento já existente. E quem fala em experimentação também fala em generalização e abstração. Os progressos do conhecimento dos práticos criaram as condições propícias para o surgimento de um Galileu. Este tema será objeto de uma análise mais detalhada em nossas conclusões no último capítulo.

Voltando ao desenvolvimento histórico das máquinas, vejamos como se apresentava o teatro das máquinas na virada do século XVIII para o XIX. Só faltava entrar em cena a máquina à vapor. Sem dúvida ela surge com a experiência de Otto de Guericke realizada em 1654 diante da corte imperial da Alemanha. Ela é conhecida pelo nome de experiência com os *hemisférios de Magdeburgo* <sup>26</sup>. É importante acrescentar que no caso da máquina a vapor cedo ela vai propiciar uma aproximação entre ciência e técnica, como veremos a seguir, as duas caminhando juntas e se influenciando mutuamente. É desnecessário observar que a máquina a vapor vai desempenhar um papel relevante na primeira fase da Revolução Industrial <sup>27</sup>.

Cientistas e práticos do século XVII como Huygens, Papin, Leibniz e outros trabalharam sistematicamente com o problema da pressão atmosférica e a utilização do calor como forma de energia. Denis Papin (1647-1712) tentou construir em 1707 uma máquina atmosférica com a finalidade de bombear água para um reservatório. A máquina não funcionou e ficou em estado de maquete. Thomas Savery (1650-1715)

---

<sup>26</sup> Em [152], pg. 99, lemos: “Em 1650, Otto von Guericke, de Magdeburgo, inventou a bomba pneumática, por meio da qual se pode criar um vácuo a vontade e demonstrar com sua ajuda as enormes forças que a pressão atmosférica pode por a disposição do homem; em uma de suas experiências, o vácuo criado em um pequeno reservatório originou forças tais que oito cavalos não foram capazes de vencer”.

<sup>27</sup> De fato, esta questão do impacto social da máquina a vapor e da expansão do maquinismo é um pouco mais complexa. Michel Vadé, em uma recente biografia de Marx [153], discute esta questão nos seguintes termos: “O desenvolvimento da maquinaria moderna parece ter sido provocado e determinado pela máquina à vapor. Muitas máquinas não apareceram senão depois que ela surgiu, como sua consequência direta ou indireta. É verdadeiramente e principalmente dela que decorrerá o crescimento considerável das possibilidades de produção do sistema técnico da fábrica? Marx sustenta uma tese contrária a esta idéia corrente, uma tese paradoxal, segundo a qual a Revolução Industrial não se deve essencialmente ao brusco crescimento quantitativo da potência energética desenvolvida pela máquina à vapor e seus aperfeiçoamentos sucessivos, mas a uma revolução qualitativa dentro do maquinismo mesmo, mais profundo e mais radical que a invenção da máquina a vapor”.

construiu uma máquina em 1698, destinada a bombear água de minas. Ele a chamava de *amiga do mineiro*, não possuía nenhum pistão e utilizava o princípio do vácuo criado pela condensação do vapor, para aspirar água do fundo do poço levando-a à superfície. Essas primeiras máquinas tiveram uma existência muito efêmera, pois inúmeros problemas tanto técnicos como científicos continuavam sem solução.

Somente a terceira máquina à vapor obteve sucesso e foi um passo decisivo no seu estabelecimento definitivo no teatro das máquinas que foi a Revolução Industrial. Ela é conhecida como a máquina de Thomas Newcomen. Sobre ele sabemos que nasceu em Dartmouth, em 1663 e que morreu em Londres em 1729. Temos ainda conhecimento que exerceu sua profissão de ferreiro e comerciante de ferramentas em sua cidade natal desde 1703. Foi nessa época que ele começou os trabalhos no sentido de aplicar a potência expansiva do vapor em uma máquina constituída essencialmente por um cilindro vertical dentro do qual se deslocava um pistão. A refrigeração do vapor e sua condensação eram feitos à pressão atmosférica donde deriva o nome desta máquina.

O ofício de Newcomen como vendedor colocou-o em contato com empresas exploradoras de minério que nessa época enfrentavam elevadas despesas para o bombeamento da água das minas. Este trabalho vinha sendo feito por máquinas movidas à tração animal. Assim, a máquina à vapor nasceu para atender à esta necessidade. É importante assinalar que este novo tipo de máquina a rigor não se constituía em uma inovação inteiramente original na medida em que fez a montagem de dispositivos já bastante conhecidos com cilindros, pistões, eixos, balancins, etc.

Do ponto de vista técnico, esta primeira máquina era muito simples no seu funcionamento. Sua força motriz provinha da própria pressão atmosférica durante o tempo de descida do pistão. A primeira delas foi posta em funcionamento em Stafordshire no ano de 1712. Sabe-se que ela dava 12 golpes por minuto e cada um deles elevava 10 galões de água de uma profundidade de 51 jardas, ou seja, essa primeira máquina tinha uma potência aproximada de 5,5 cavalos vapor.

A chamada máquina atmosférica sofreu várias alterações e melhoramentos ao longo do tempo. A mais significativa, pelo que isto representa em termos da associação ciência e técnica foi proporcionada por James Watt (1736-1819), um prático e construtor de máquinas de origem escocesa. Ao voltar à Escócia devido a problemas de saúde, passou a trabalhar na Universidade de Glasgow onde conheceu Joseph Black (1728-1799), professor de química da Universidade desde 1756. No inverno de 1763-64, Watt foi convidado pelo professor de física de nome Anderson para consertar o modelo de máquina à vapor utilizado nas demonstrações pela Universidade. Como se tratava do tipo atmosférico isto propiciou uma extensa

cooperação entre Watt e Black e foi o ponto de partida para uma série de inovações na construção das máquinas a vapor.

Este exemplo de inovação técnica em estreita cooperação com os avanços científicos iria se tornar cada vez mais freqüente com a Revolução Industrial em marcha. Não dá para fazer generalizações de como saber prático e conhecimento científico se influenciam mutuamente. Este problema continua complexo até hoje.

Voltando ao tema central deste capítulo que é um balanço da mecânica teórica e prática na virada do século XVIII e sua incapacidade em produzir uma teoria geral para o funcionamento das máquinas até aquele momento, passamos ao capítulo seguinte. Nele veremos como a solução para este problema será encaminhada por Lazare Carnot.

## **PARTE II: A GÊNESE INSTRUMENTAL**

## Capítulo 5: Lazare Carnot e uma Teoria Geral das Máquinas

*“Se os princípios da força de inércia, do movimento composto, e do equilíbrio, são essencialmente diferentes um do outro, como não se pode impedir de acontecer; e se do outro lado esses três princípios são suficientes à mecânica, pode-se reduzir esta ciência ao menor número de princípios possíveis, e admitir que se tenha estabelecido sobre esses três princípios todas as leis do movimento dos corpos em circunstâncias quaisquer, como eu me encarreguei de fazer neste trabalho”.*

(Jean Le Rond d'Alembert – Discurso preliminar ao *Tratado de Dinâmica*, G. Villars et Cia, Editores, Paris, 1921)

### 5.1 LAZARE CARNOT, CIENTISTA E POLÍTICO

Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot nasceu em 13 de Maio de 1753 em uma família da burguesia da burgonha, e que ocupava uma posição importante na localidade. Claude Carnot, seu pai, era advogado e escrivão público em Nolay, pequena cidade situada perto de Côte-d'Or. A casa onde ele nasceu existe até hoje e ainda pertence à família Carnot.

O pai de Carnot assumiu para si a educação de seus três filhos mais velhos os quais por sua vez ajudaram a seus irmãos mais novos, fazendo o papel de tutores ou preceptores. Dos seis filhos, dois demonstraram uma aptidão precoce para a matemática e as questões técnicas. Lazare, que era o segundo filho e Claude-Marie (1754-1808), devido a essas inclinações seguiriam a carreira da engenharia militar.

Em pleno século XVIII o que era comum para se assegurar a educação de um filho, quando as famílias eram mais abastadas, era apelar-se para um eclesiástico ou um preceptor. Os caminhos a serem seguidos eram basicamente dois. Os estudos clássicos ou de humanidades e o outro eram as escolas militares. Nas universidades estavam reservados os estudos de direito, medicina ou teologia.

Carnot fez seu curso de humanidades no Colégio de Outono, que depois da saída dos jesuítas passou a ser dirigido pelos *oratorianos* e onde dez anos mais tarde Napoleão Bonaparte foi colocado pelo pai. Carnot concluiu esses estudos com a idade de dezesseis anos.

Com a finalidade de economizar os recursos de seus pais, Carnot preferiu se preparar sozinho para os exames de ingresso na Escola de Engenharia de Mézières. Em virtude do fracasso de Carnot na tentativa de ingressar naquela instituição no fim de 1769, seu pai decidiu enviá-lo à Paris. Além disso, Carnot obteve a proteção do

Duque de Aumont que o inscreveu no mais célebre dos três estabelecimentos parisienses, que era a escola dirigida por Louis-Siméon de Longpré, no Marais.

Desde o começo de seu novo período escolar, Carnot teve a ocasião de encontrar Charles Bossut (1730-1814) e d'Alembert, dois personagens que deveriam influenciar em muito sua maneira de abordar os problemas da mecânica. Bossut, que dirigia os exames de Mézières, tinha publicado em 1763, a primeira edição de um manual de mecânica muito popular, cujo título era *Tratado elementar de mecânica e de dinâmica aplicada principalmente aos movimentos das máquinas*. Ele também publicou outros trabalhos em álgebra, geometria, e aritmética <sup>1</sup>.

Nessa época d'Alembert já era idoso e mantinha um forte vínculo de amizade com Longpré. O grande matemático freqüentemente reunia os alunos em torno de si para colocar problemas de matemática. Muito mais tarde quando Carnot entrou na velhice, ele costumava contar com um certo regozijo de como d'Alembert lhe marcou a maneira de resolver questões difíceis e de como seu mestre tinha feito previsões acerca de uma carreira brilhante para ele.

Tendo sido aprovado no concurso, Carnot entrou para a Escola de Engenharia de Mézières, em janeiro de 1771, para seguir os dois anos de formação básica e que precediam a educação regulamentar dos futuros engenheiros. Pode parecer estranho, mas a Escola exigia dos candidatos uma prova de que pertenciam à nobreza ou, a uma família que vivesse *nobremente*, ou seja, que não ocupasse nenhuma posição degradante. A grande maioria dos alunos de engenharia era de origem burguesa, e a família de Carnot não teve nenhuma dificuldade de obter o certificado.

Diferentemente de Carnot, Gaspar Monge (1746-1818), um dos maiores talentos entre os muitos que passaram por aquela Escola, sofreu muitos constrangimentos devido a essas exigências. Monge descendia de uma família com condições bastante modestas e que até o impediam de ser aluno. Somente com as qualidades intelectuais das quais era dotado, Monge conseguiu não só superar esses obstáculos como até ser nomeado professor, tendo inicialmente ensinado matemática e depois física.

Sobre as influências de Monge sobre Carnot, existem algumas divergências entre os biógrafos. O que se tem de concreto é que nenhum dos dois faz referência ao outro. Nada indica que Monge tenha se interessado pela obra de Carnot em mecânica ou matemática. Além de tudo havia diferenças enormes de temperamento. Monge era matemático e pedagogo sendo destituído de qualquer vocação para a política. Sempre que com ela se envolvia revelava um espírito teórico, emotivo e incapaz de tomar

---

<sup>1</sup> É também muito popular o seu "Essais sur l'histoire générale des mathématiques", em dois volumes.



decisões, além de ser inseguro nos julgamentos e desatento nos detalhes. Já Carnot procedia de maneira praticamente inversa, era um engenheiro com idéias extremamente objetivas, hábil na concepção e execução de suas tarefas e dotado de uniformidade de caráter e que prefere julgar dentro de um espírito prático e adaptado às circunstâncias.

Carnot saiu de Mézières em primeiro de janeiro de 1773, foi nomeado aspirante e serviu em diversas guarnições militares. De início em Calais, depois no Havre, Béthune, em Arras e em Aire. Em Calais encarregou-se da fortificação do porto. Mais tarde foi destacado para o Havre por três anos a fim de participar da construção do porto de Cherbourg, projeto técnico bastante avançado e considerado dos mais bem elaborados e modernos da engenharia militar francesa. Com sua participação nesses projetos conseguiu construir uma enorme reputação entre seus pares e recebeu muitos elogios de seus superiores.

Para que possamos melhor entender o trabalho científico de Carnot talvez devêssemos recorrer a uma citação que Coulomb fez em 1776, sobre a situação dos que saíam da Escola. Ele dizia: *um jovem estudioso que sai da Escola não tem outra coisa a fazer, para suportar o tédio e a monotonia de suas corporações, do que se entregar a qualquer ramo da ciência ou da literatura absolutamente estranhos a seu estudo.*

Certamente foi o que aconteceu com Carnot, após sua saída da Escola de Mézières. Ele passou a dedicar parte de seu tempo aos estudos de mecânica e matemática e isto o conduziu a um nível bem superior ao dos alunos recém saídos de Mézières. O que os cursos de sua escola forneciam era basicamente o seguinte: de uma parte estudava-se os quatro tomos de Charles-Etienne-Louis Camus <sup>2</sup> sobre aritmética, geometria e estática; do outro se seguia os tratados de Bossut sobre dinâmica e hidrodinâmica; além disso, havia os cursos anuais de desenho industrial, de perspectiva ou de geometria descritiva, bem como o curso de física experimental.

É muito provável, que Carnot ao sair da Escola de Mézières, ao ter que enfrentar o isolamento de uma vida na guarnição militar tenha passado a ler e reler d'Alembert, Bossut, Bélidor, a mecânica de Euler e a hidrodinâmica de Daniel Bernoulli. É o que se depreende de seus primeiros trabalhos, nos quais ele demonstra um bom conhecimento desses assuntos e que só poderia ser obtido de forma autodidática. Um outro fato que corrobora esta suposição é que Carnot, ao contrário do que ocorreu com Coulomb e Meusnier, dois de seus condiscípulos em Mézières, os quais adquiriram uma brilhante reputação científica ligada aos círculos científicos de

---

<sup>2</sup> Os trabalhos mais conhecidos de Camus são: "Eléments de géométrie théorique et pratique" (1750), "Elements de mécanique statique" (1751) e "Elements d'arithmétique" (1753).

Paris, afastou-se da capital. Muitas vezes ele passava suas férias em Nolay ou Dijon. Esta hipótese é muito mais do que plausível, pois também é reforçada com documentos saídos dos arquivos, tanto da Academia de Ciências de Paris, como da Academia Alemã de Ciências de Berlim. Além disso, alguns manuscritos em poder de sua família confirmam que isto de fato ocorreu. Dessa forma, foi possível recuperar pelo menos em parte as circunstâncias nas quais Carnot escreveu seus primeiros trabalhos em mecânica e matemática.

Os primeiros estudos que Carnot escreveu destinavam-se a participar de concursos propostos pelas sociedades científicas da época. Em 1777, a Academia de Paris lançou um concurso para o ano de 1779, o qual somente veio a se realizar no ano de 1781, pois os julgadores não estavam satisfeitos com nenhum dos trabalhos submetidos da primeira vez. Foi assim que Carnot redigiu dois de seus estudos iniciais sobre a teoria das máquinas. Ambos intitulavam-se *Ensaio sobre as máquinas*; ele concluiu o primeiro em Cherbourg em março de 1778 e o segundo em julho de 1780 em Béthune. Nesta ocasião uma memória de Coulomb é a vencedora e Carnot recebe menção honrosa <sup>3</sup>.

Com relação a seu interesse pelos fundamentos da matemática a motivação é em tudo semelhante. Seu texto conhecido por *Reflexões sobre a metafísica do cálculo infinitesimal* <sup>4</sup> consistiu no desenvolvimento de uma memória que ele submeteu à Academia Real da Prússia em 1785. Seguindo ainda as motivações dos concursos das academias, a Academia de Paris pediu a todos os interessados que escrevessem para ela sobre o que tinha motivado o primeiro vôo humano. Carnot endereçou a ela em 17 de janeiro de 1784 sua *Carta sobre os aeróstatos*. Deve ser lembrado que em 5 de junho de 1783 os irmãos Montgolfier tinham feito sensação ao enviar um balão inflado de ar quente à altitude de 1800 metros. Este novo acontecimento colocava problemas técnicos interessantes sobre a locomoção e a estabilidade no vôo.

Carnot atacou antes o problema do dirigível e propôs um projeto mais ou menos fantástico de um propulsor que se deslocava a maneira de uma medusa, devendo funcionar segundo um movimento de sístole e diástole criado dentro do balão pela dissipação de calor.

Estes são alguns dos fatos mais marcantes do início da carreira científica de Carnot. Passemos então para o seu envolvimento com a política e que se dá em períodos cruciais logo no início da Revolução Francesa.

---

<sup>3</sup> Trata-se da memória de Coulomb intitulada: "Théorie de machines simples", a qual analisaremos em profundidade no próximo capítulo.

<sup>4</sup> Este trabalho de Carnot segue a linha estabelecida por Leibniz para o cálculo diferencial e tenta através da teoria dos limites eliminar certas inconsistências conceituais e melhorar seus aspectos algorítmicos o que já era uma característica leibniziana.

Se quiséssemos traçar um perfil político de Lazare Carnot talvez o mais adequado fosse classificá-lo como um republicano autêntico. Ele esteve envolvido com fatos importantes do período revolucionário francês, como por exemplo, o de ter votado a favor da morte de Luis XVI, o que confirma suas convicções republicanas. Em contrapartida ele como militar via na esquerda a maior ameaça a república recém instalada. Assim é que ele também esteve a serviço das forças mais conservadoras do movimento revolucionário ao combater os esquerdistas da *rebelião dos iguais* comandada por Babeuf. Este episódio é importante e emblemático para os movimentos esquerdistas que surgiram desde a Revolução Francesa, pois muitos chegam a vislumbrar essa rebelião como o embrião de uma revolução proletária nascida da falência da revolução burguesa <sup>5</sup>.

Carnot como militar participou do reagrupamento do exército francês após a desorganização produzida pelo movimento termidoriano, conseguindo manter a administração militar sob controle. No entanto a Revolução Francesa era uma caixa de surpresas, de vitórias e derrotas das forças republicanas e movimentos pelo restabelecimento da monarquia.

Na primavera de 1797, as eleições legislativas apontaram uma possibilidade de ressurreição da monarquia. Não podendo aceitar a derrota da Revolução, a esquerda se prepara para rejeitar o veredicto das eleições e para eliminar os membros reacionários das assembleias. No golpe de estado que teve lugar em 18 de Frutidor (4 de setembro) Carnot estava convencido que não era possível preservar a Constituição, tendo se recusado a participar deste movimento. Advertido da intenção de seus colegas de Diretório ele suspendeu uma estada em Luxemburgo, escondeu-se em Paris durante algumas semanas e fugiu para a Suíça.

Nesses momentos de dificuldades, Carnot retomava sempre suas pesquisas em mecânica e matemática, segundo atesta seu filho Hippolyte: isto era uma espécie de *consolação no asilo interior onde ele se refugiou para respirar ar puro*. Foi assim que durante sua participação como membro do Diretório, que apareceu em 1797 seu livro *Reflexões sobre a metafísica do cálculo infinitesimal*, embora sua redação já viesse sendo feita há alguns anos.

Com a tomada do poder por Napoleão Bonaparte em 1799 (18 brumário), Carnot retorna à França beneficiado por uma anistia geral em favor das vítimas do

---

<sup>5</sup> Carlos Guilherme Mota ao analisar este movimento afirma: “É a proposta radical de uma nova sociedade que brota das entranhas da Revolução.” E mais adiante: “Tomado o poder, não se trataria de propor uma Assembleia democrática liberal, mas de organizar uma ditadura revolucionária por um tempo necessário para implantar a nova sociedade”. Sabe-se que o movimento foi debelado após ter sido delatado pelo militante de nome Grisel a Carnot. Ele como homem forte do regime nomeia Cochon de Lapparent em 3 de Abril de 1796 para o ministério da polícia, um notório inimigo dos jacobinos e inicia-se o combate aos “comunistas”. Ver [154], pg.183.

Termidor. Ele é então nomeado ministro da guerra em 2 de abril de 1800. Após cinco meses ele abandonou o posto ao perceber que este regime lhe impedia de dirigir seus próprios serviços e era hostil à República. Ao deixar o governo algumas obras de sua autoria foram publicadas. Em 1800, próximo ao fim do ano foi publicada sua *Carta ao cidadão Bossut contendo visões novas sobre a trigonometria*; em 1801 ele publicou *Da correlação das figuras de geometria*; em 1803 sai o estudo que mais nos interessa e sobre o qual dedicaremos todo o próximo capítulo que é o *Ensaio sobre as máquinas* com o novo título de *Princípios fundamentais do equilíbrio e do movimento*. Ainda neste mesmo ano ele também publica a *Geometria da posição*, que ele considerava sua obra prima; em 1806 aparece sua *Memória sobre a relação que existe entre as distâncias respectivas de cinco pontos quaisquer tomados no espaço, seguido de um ensaio sobre a teoria das transversais*.

Os dois filhos de Lazare Carnot, Sadi e Hippolyte nasceram em 1796 e 1801, respectivamente. Sobre Sadi já nos referimos anteriormente como o fundador da termodinâmica e a ele retornaremos para analisar as influências que recebeu de seu pai <sup>6</sup>.

Uma outra atividade científica de Carnot é importante de ser ressaltada. Mas para isto é necessário que retrocedamos um pouco aos tempos conturbados da Revolução. Como sabemos, em 8 de agosto de 1793, no começo do Terror, a Academia de Ciências, ao mesmo tempo em que outras academias ligadas ao *ancien régime* tinham sido abolidas e fechadas, pois eram consideradas organismos fundados sobre privilégios e inadaptados ao espírito de uma República. Somente em 7 de agosto é que Carnot tornou-se membro do Comitê de Salvação Pública, de forma que não podemos imputar-lhe a decisão de fechar a Academia de Ciências. Como também sabemos, com o fim da Academia foi criado o Instituto de França e Carnot foi rapidamente nomeado membro desta instituição, cujas funções era dar continuidade aos trabalhos da antiga Academia. Em linhas gerais a nova instituição deveria unificar as artes, as letras e a ciência, ramos de uma mesma cultura, considerados como o melhor ornamento da República.

Em 1805 Carnot tornou-se presidente do Instituto de França. Sua atividade consistia de um lado em velar pelo progresso da ciência, do outro publicar suas memórias e recomendar a edição de outros estudos que lhe eram submetidos os quais ele julgava a altura de serem difundidos. Além disso, ele também atuava como uma espécie de consultor público, manifestando-se sobre questões tecnológicas,

---

<sup>6</sup> Do casamento de Lazare Carnot com Sophie Dupont, nasceram três filhos: Sadi, nascido em 1794 e morto nos primeiros anos de vida em 1796. Sadi Carnot, nascido em 1º de Junho de 1796, o físico e fundador da termodinâmica e Hippolyte, nascido em 6 de Abril de 1801, morto em 13 de Março de 1888. Foi deputado, senador e ministro da instrução pública e membro do Instituto de França.

estudando a concepção e os méritos de novas máquinas, de processos industriais que inventores e construtores de máquinas submetessem aos órgãos de governo no sentido de obter financiamento.

Carnot também participava de comissões científicas do Instituto para examinar projetos de natureza mais prática. Um exemplo importante pelo significado que ele vai ter em sua obra é o chamado motor de Niepce. Em um relatório entusiasta ele enfatizava que esta máquina era o primeiro meio jamais imaginado para produzir a força motriz a partir da expansão do ar aquecido, ou nos termos em que ele colocava, do ar combinado com o calórico. Contrariamente a máquina à vapor, que consumia uma grande quantidade de calórico para aquecer e vaporizar a água antes de utilizar a expansibilidade do vapor, um motor a ar apresentava em princípio a vantagem de não utilizar combustível senão para produzir a expansão de onde resultaria a força motriz.

Em 1809, Carnot fez ao Instituto um relatório sobre um outro modelo de motor térmico, imaginado e concebido por um inventor de nome Cagniard de Latour. Este motor chamou bastante a atenção de Sadi Carnot conforme podemos ver em Kuhn [76]. Como na máquina de Niepce, o fluido expansível era ainda o ar, mas seu emprego era bem mais sutil. Algumas características deste motor são citadas nas *Reflexões* de Sadi Carnot. Kuhn ainda faz referência a um outro aspecto importante do motor de Cagniard que era a reversibilidade. Esta noção aparece na obra de Sadi Carnot e os historiadores estabelecem um vínculo direto da reversibilidade com os movimentos geométricos, um conceito chave na obra de Lazare Carnot e ao qual voltaremos mais tarde.

Caminhando para o encerramento desta biografia de Carnot, vejamos resumidamente os anos finais de sua existência. Após o retorno de Napoleão da ilha de Elba, Carnot aliou-se a ele e foi ministro do interior no governo dos cem dias. Mas o fato de ter votado a morte de Luis XVI, confirmando os seus ideais republicanos, nunca foi perdoado pela monarquia restaurada. Carnot exilou-se novamente e desta vez com seu filho Hippolyte. Tendo passado por Bruxelas, Munique, Viena e a Cracóvia, chegaram à Varsóvia onde ele tentou permanecer e aí fixar residência. Alguns problemas o impediram de ficar. Também foi praticamente proibido de residir na Renânia pela proximidade da França. Finalmente ele e seu filho instalaram-se

em Magdeburgo onde ele morreu em 2 de agosto de 1823 <sup>7</sup>.

## 5.2 CIÊNCIA E REVOLUÇÃO FRANCESA

O grande historiador da Revolução Russa, Isaac Deutscher (1907-1967), comentando o significado de uma revolução burguesa, afirmou:

*O seu resultado mais substancial e duradouro era a eliminação das instituições sociais e políticas que tinham dificultado o crescimento da propriedade burguesa e das relações sociais que a acompanham. Quando os puritanos negaram à Coroa o poder de tributação arbitrária, quando Cromwell garantiu para os armadores ingleses uma posição monopolística no comércio marítimo da Inglaterra com países estrangeiros e quando os jacobinos aboliram as prerrogativas e privilégios feudais, criaram, muitas vezes irrefletidamente, as condições em que os fabricantes, mercadores e banqueiros iriam fatalmente conquistar a hegemonia econômica e, a longo prazo, a supremacia social e até política. A revolução burguesa cria as condições em que a propriedade burguesa pode florescer. É nisso e não nos alinhamentos particulares que se estabelecem durante a luta, que reside sua diferença específica.*

Não sendo nosso objetivo aqui analisar a Revolução Francesa, nem mesmo de forma superficial, julgamos, no entanto pertinente à citação acima, para ressaltar a importância que este acontecimento fundamental teve, para o desenvolvimento social, político e científico do século XVIII em especial na França e de uma forma geral na Europa.

Além do amplo movimento intelectual que precedeu a tomada do poder pela burguesia na França com influência direta na produção científica de um longo período da história européia, temos que considerar outros fatores e acontecimentos que são prolongamentos e decorrências naturais do grande caudal desencadeado pela revolução. Como era esperado, o questionamento das idéias do regime anterior, para ter conseqüências, ser duradouro, teria que criar novas instituições, como observa Isaac Deutscher, no sentido de eliminar as amarras que o sistema de propriedade feudal teimava em manter. Dessa forma a criação de novas instituições em breve chegaria ao sistema educacional. Era necessário mudar as mentalidades e preparar

---

<sup>7</sup> Assim André Fridberg descreve a morte de Carnot: “O fim de Carnot parece ter sido relativamente breve. Sofrendo de perturbações digestivas, ele não se preocupava minimamente aos olhos de seu filho, com sua saúde apesar dos conselhos recebidos dos que lhe eram próximos. Quando enfim ele consentiu em receber a visita de um médico, a consulta se passou como uma longa entrevista sobre assuntos científicos, políticos e outros, sem que fosse abordado aquilo que tinha motivado a visita. Alguns dias mais tarde, Lazare tendo se levantado pela manhã, como de costume, fez sua toailete e mesmo se barbeou. Mas se sentindo fatigado, se recolheu e, durante o dia, expirou sem sofrimento aparente”, Ver [155], pg. 221.

novos quadros técnicos e políticos que dessem continuidade ao projeto de uma nova sociedade, já anunciada pela revolução.

As mudanças no sistema educacional francês atingiram em cheio a formação técnica e profissional, pois as novas crenças, conhecimentos e as novas tecnologias progrediam a olhos vistos e era necessário difundi-los. Mesmo antes da vitória da Revolução algumas escolas já existiam como a *Escola de Pontes e Estradas*, fundada em 1747, a *Escola de Minas*, criada em 1783. No período revolucionário propriamente dito foram criadas a *Escola Politécnica*, em 1795, embora inicialmente tivesse o nome de *Escola Central de Trabalhos Públicos*, fundada por um decreto da Convenção de 28 de Setembro de 1794 e o *Conservatório Nacional de Artes e Ofícios*, fundado em 1794. Essas duas instituições iriam desempenhar um papel fundamental no panorama científico da França.

Ao lado do novo quadro institucional, a pesquisa científica era um domínio por excelência do pensamento racionalista. Era natural, portanto, que no século XVIII vários desenvolvimentos científicos ganhassem enorme impulso. Assim, uma quantidade bastante significativa de obras fundamentais para o pensamento científico, foi publicada. Entre elas podemos destacar: em 1789 o *Tratado de Química*, de Lavoisier (1743-1794), em 1796 a *Exposição do Sistema do Mundo*, de Laplace (1749-1827), em 1799 o *Tratado de Geometria Descritiva*, de Monge (1746-1818) e que criou um novo ramo da matemática. Jean Baptiste Lamarck (1744-1829), no período de 1794 à 1800, concebe a evolução das espécies e publica em 1809 sua *Filosofia Zoológica*. É evidente que somente essas obras que foram citadas já causariam um impacto irreversível no pensamento posterior, e como sabemos muitas outras podem ser acrescentadas<sup>8</sup>.

A importância do século XVIII para a história do pensamento científico deve ser buscada não tanto em um único descobrimento ou teoria espetacular, como ocorreu no século XVII com a publicação dos *Principia* mas no progresso conjunto abrangendo uma grande quantidade de investigações científicas realizadas neste período. O que também é marcante no século da Revolução é a consolidação de alguns ramos das ciências naturais como a eletrologia, a química e a biologia.

É importante observar que os resultados alcançados no campo científico durante o *século das luzes* aumentaram sobremaneira a confiança nos poderes da razão e levaram o homem a acreditar que poderia resolver todos os problemas, inclusive os econômicos e outros pertencentes ao plano moral, com o mesmo êxito com que estavam sendo resolvidos os problemas científicos. Isto é importante para

---

<sup>8</sup> No campo da mecânica, conforme já mencionamos os trabalhos que mais nos interessam destacar são os de d'Alembert, Euler, Coulomb, Carnot e Lagrange.

que se possa entender a multiplicidade de idéias, de escolas filosóficas ou mesmo algumas influências que o clima intelectual da época propiciou até muito recentemente.

De uma forma geral e adotando uma visão panorâmica para aqueles ramos que se consolidaram e aos quais já nos referimos, podemos dizer que a eletrologia recebeu uma grande contribuição de Benjamim Franklin (1706-1790), que demonstrou a identidade entre os fenômenos das faíscas elétricas e os raios. Os físicos mais eminentes e que se dedicaram a este campo de investigação foram Charles Coulomb (1736-1806) e os italianos Luigi Galvani (1737-1798) e Alessandro Volta (1745-1827), descobridor da pilha elétrica em 1800. O descobrimento da pilha foi de fundamental importância para os desenvolvimentos futuros da eletrodinâmica e até para a descoberta do princípio da conservação da energia.

Na química temos a revolução feita por Lavoisier. Com ele efetivamente começa a química moderna, é desferido o golpe de morte contra a teoria do flogístico e este período representa o marco fundamental na história desta disciplina. Infelizmente, como é do conhecimento de todos, Lavoisier foi executado pela Revolução, fato que pode ser atribuído, entre outros motivos, a um cargo que ele ocupava no antigo regime, uma espécie de fiscal de rendas, identificando-o falsamente com o regime que acabava de ser derrubado, apesar de sua obra revolucionária no campo da ciência <sup>9</sup>.

Na biologia podemos citar os estudos do cientista sueco Charles de Lineu (1707-1778), do francês George Louis Buffon (1707-1787) e do italiano Lazzaro Spallazani (1729-1799). Os dois primeiros apresentaram um grande interesse pela observação e um acentuado gosto pela unificação da ciência, além de terem sofrido uma forte influência de Newton. Buffon considerava que a essência da vida era uma propriedade física da matéria <sup>10</sup>.

Para o desenvolvimento da mecânica, já vimos com algum detalhe o processo de sua formalização, que é o acontecimento mais importante ocorrido com essa disciplina no século XVIII. Vimos também que este empreendimento é uma obra coletiva de uma série de matemáticos e físicos da época como d'Alembert, Laplace, Euler, Lagrange e outros.

---

<sup>9</sup> É evidente que o processo político que leva o grande cientista à morte, envolve uma complexidade bem maior do que simplesmente uma identificação pura e simples com o "ancien regime" devido ao cargo que ocupava. Kahane, em [109], faz uma análise mais voltada aos alinhamentos de classe e as contradições daí advindas e que resultaram na condenação a morte de Lavoisier. Ele afirma: "Lavoisier, grande burguês de origem, quis tornar-se financista e dessa forma solidarizou-se com o Ancien Regime; ele quis tornar-se grande proprietário, e foi assimilado por este fato com os detentores da riqueza agrária, a aristocracia rural. Ele pertencia então duplamente às frações marginais da burguesia, aquelas que deveriam ser amputadas ao chegar ao poder, e tal aconteceu ao lado dos incidentes e dos dramas do processo".

<sup>10</sup> Como sabemos, Buffon traduziu o "Cálculo das fluxões", de Newton ao qual já nos referimos em [80].



Para completar o quadro geral do progresso científico no século XVIII, vejamos alguns desenvolvimentos específicos daquele período, principalmente no campo da matemática e da física. O nome de Jean-Antoine-Nicolas, Marquês de Condorcet (1743-1794) aparece ligado a dois campos da matemática: o cálculo integral e o cálculo das probabilidades. No primeiro, ele desenvolve uma teoria de integração em termos finitos. Estas integrais podem ser expressas em termos de funções algébricas, logarítmicas e exponenciais. Para o caso do cálculo das probabilidades, seu nome surge como pioneiro da aplicação deste ramo da matemática ao campo das ciências sociais.

Partindo dos estudos de d'Alembert, Condorcet conseguiu uma significação nova para as probabilidades, ampliou seus fundamentos o que lhe permitiu fazer aplicações também inovadoras. Estes resultados fazem parte do crescimento acentuado no último terço do século XVIII do interesse em cálculos econômicos voltados para os problemas prementes do momento como o da construção de vias, da comunicação e outros problemas colocados pela indústria e pelo comércio. Um outro ramo para onde os estudos aplicados da matemática iriam se direcionar era o dos seguros, um ramo ainda incipiente, mas que prometia se expandir enormemente. Surgiram os seguros marítimos, contra incêndios, seguros de vida, e todo este comércio que começava a se estabelecer só atingiria um pleno desenvolvimento no século seguinte. Este resumo de uma abertura maior do campo de aplicação da matemática, atingindo a área das ciências sociais, como a economia e o comércio, também nos dá uma idéia das novas possibilidades que se abriam com o advento da moderna sociedade industrial já anunciada pela revolução <sup>11</sup>.

### **5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A MECÂNICA DE LAZARE CARNOT**

Lazare Carnot pode ser considerado como um elo de ligação importante entre d'Alembert e Lagrange. Assim, nas considerações que estamos fazendo sobre ele neste item, tentaremos estabelecer tanto a herança e influências por ele recebidas, que como veremos, derivam em grande parte à d'Alembert, mas também será nosso objetivo diferenciá-lo de aspectos importantes sobre questões fundamentais defendidas por Lagrange.

---

<sup>11</sup> Esta é uma visão panorâmica dos principais desenvolvimentos científicos no século da Revolução. Para um estudo mais detalhado e minucioso, deve ser consultado o trabalho da equipe REHSEIS editado por R. Rashed [157].

A influência de d'Alembert sobre Carnot é incontestável. Isto fica particularmente claro ao compararmos o posicionamento de ambos sobre questões de natureza conceitual da mecânica. Em seu *Tratado de Dinâmica* [106], d'Alembert indaga: *Quais são as causas capazes de produzir ou de modificar o movimento dos corpos?* E ele continua: *Nós não conhecemos até o momento senão dois tipos: umas se manifestam a nós ao mesmo tempo em que o efeito que elas produzem, ou antes, na medida em que elas se apresentam; elas são as que têm sua fonte na ação sensível e mútua entre os corpos, resultante de sua impenetrabilidade: elas se reduzem a impulsão e outras ações derivadas daquelas; todas as outras causas não se fazem conhecer senão pelos seus efeitos, e ignoramos inteiramente sua natureza; tal é a causa que faz cair os corpos pesados em direção ao centro da terra, a mesma que mantém os planetas em suas órbitas, etc.*

Carnot adota em sua mecânica uma concepção de força muito semelhante à de d'Alembert, engendrada por impulsos elementares. Isto significa que ele toma o choque como o fenômeno fundamental na interação entre os corpos. Mesmo com relação ao peso ele tem uma visão de impulsos elementares quando afirma: *O peso e todas as forças deste gênero operam por graus insensíveis e não produzem nenhuma mudança brusca. Contudo parece muito natural que os consideremos como imprimindo, em intervalos infinitamente pequenos, golpes eles mesmos infinitamente pequenos aos móveis que eles animam.* Vale a pena também registrar uma herança de Leibniz na citação acima. Quando Leibniz define força viva é muito semelhante ao que está expresso na citação acima <sup>12</sup>.

Com relação ao conceito de força a posição de Lagrange é diametralmente oposta. Isto fica claro quando ele afirma: *Nós consideramos principalmente as forças aceleratrizes e retardatrizes, cuja ação é contínua, como a da gravidade e que tende a imprimir a cada instante uma velocidade infinitamente pequena e igual a todas as partículas da matéria.* [122]

Deve ser observado que d'Alembert e Carnot visualizam as ações entre os corpos através de choques e não de interações contínuas porque é por meio deles que essas ações ficam mais evidentes. E como que justificando sua posição d'Alembert ressalta: *Tudo o que vemos bem distintamente no movimento de um corpo, é que ele percorre um certo espaço e que ele emprega um certo tempo a percorrê-lo. eu por assim dizer, fiz foi observar o que há por trás das causas, para visualizar unicamente o movimento que eles produzem.* Ele ainda ressalta, em citação bastante

---

<sup>12</sup> Isto já foi analisado em detalhes quando discutimos as várias concepções de força no capítulo 2.

conhecida o caráter obscuro e metafísico das forças, o que não deixa de ser uma crítica ao conceito de força newtoniano.

Carnot, nos *Princípios fundamentais do equilíbrio e do movimento* faz a seguinte afirmação, que no fundo é um posicionamento bem mais geral sobre a mecânica:

*Existem duas maneiras de ver a mecânica em seus princípios. A primeira é a de considerá-la como teoria das forças, isto é das causas que imprimem os movimentos. A segunda é a de considerá-la como a teoria dos movimentos eles mesmos. No primeiro caso, estabelecemos a racionalidade sobre as causas quaisquer que elas sejam, que imprimem ou tendem a imprimir movimentos aos corpos. No segundo caso, observamos o movimento como já impresso, adquiridos ou pertencentes aos corpos; e procuramos somente quais são as leis segundo as quais esses movimentos aparecem e se propagam, se modificam ou se destroem em cada circunstância. Cada uma dessas duas maneiras de estudar a mecânica tem suas vantagens e desvantagens. A primeira é quase, geralmente considerada como a mais simples; mas ela tem a desvantagem de estar fundada sobre a noção metafísica e obscura do que é a força. Pois qual idéia nítida pode apresentar ao espírito nessa matéria o nome de causa? Existem tantas espécies de causa! E que podemos entender na linguagem precisa dos matemáticos por uma força, isto é, por uma causa dupla ou tripla de uma outra? ...Essas causas são elas a vontade ou a constituição física do homem ou do animal que por sua ação faz nascer o movimento? Mas que é uma vontade dupla ou tripla de uma outra vontade?*

*Se tomarmos o partido de não distinguir a causa do efeito, isto é, se entendemos pela palavra força a quantidade de movimento mesmo que ela fez nascer no móvel ao qual ela é aplicada, torna-se inteligível, mas então voltamos a segunda maneira de abordar a questão, isto é, que então a mecânica não é outra coisa senão a teoria das leis da comunicação dos movimentos.*

Como vemos, o conceito de força ocupa uma posição central na mecânica de Carnot, também na forma de uma herança dalambertiana. Duas observações sobre esta longa citação de Carnot são pertinentes e se fazem necessárias. A primeira é que a abordagem newtoniana não é a adotada por ele, aquela que isola o corpo e considera o sistema de forças externas atuando sobre ele, exatamente pelo questionamento, diríamos até ontológico que Carnot faz desse conceito de força. A segunda observação, é que Carnot ao adotar o segundo caminho, no sentido de contornar essa dificuldade, ele se engaja na via lagrangeana, seguindo uma tradição analítica de focar a mecânica, que tem também d'Alembert como precursor. É por isso que Carnot pode ser considerado como um elo de ligação de uma cadeia que

também conduz à mecânica lagrangeana, muito embora para tornar esta afirmação mais complexa, devemos observar a prevalência da geometria e trigonometria como instrumentos de análise. Além de tudo, o segundo caminho do qual falamos, leva necessariamente Carnot a ver nas leis da mecânica as leis da comunicação do movimento, do qual também decorre a visão que ele tem de uma máquina, ou seja, de um sistema que comunica movimento a seus componentes. Sua teoria das máquinas, como veremos, é o estudo dessas formas de comunicação de movimento.

As semelhanças e pontos em comum entre d'Alembert e Carnot não ficam somente restritas a base conceitual, onde o conceito de força joga um papel central. Eles também estruturam suas mecânicas em termos de princípios muito semelhantes. Em seu *Tratado de Dinâmica*, d'Alembert faz repousar toda sua mecânica em três princípios: o da força de inércia, o do movimento composto e o do equilíbrio. A compreensão correta deste segundo princípio é fundamental para um aprofundamento na mecânica de Carnot. Isto leva também, necessariamente, a uma releitura do famoso princípio que tem o seu nome e que é objeto de muitas distorções e falsas interpretações [116].

Se examinarmos os *Ensaio*s de Carnot, o que faremos em detalhes ainda neste capítulo, veremos que ele escolhe somente dois princípios para fundamentar sua mecânica: o da igualdade entre ação e reação e o da nulidade do movimento relativo consecutivo a um choque (entre corpos duros). É evidente que o primeiro princípio é diferente do de Newton devido às diferentes concepções de força defendidas por ambos <sup>13</sup>. Este princípio para Carnot é muito mais uma lei de igualdade entre duas quantidades de movimento. No segundo princípio enunciado, ele utiliza a decomposição de movimento praticada por d'Alembert em seu famoso princípio. Os dois movimentos considerados são o movimento impresso e o movimento adquirido, pois a diferença entre eles é precisamente a *força* que o corpo teria se não tivesse recebido o movimento impresso.

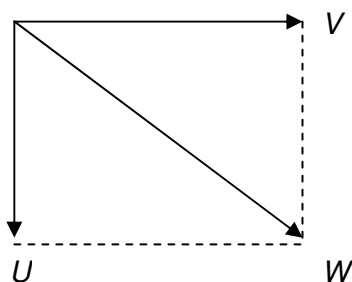
Para compreender a decomposição utilizada por Carnot usaremos o seguinte diagrama:

$$\tilde{W} = \tilde{V} + \tilde{U}, \text{ onde:}$$

$\tilde{W}$  = VELOCIDADE INICIAL ANTES DO CHOQUE

$\tilde{V}$  = VELOCIDADE DEPOIS DO CHOQUE

$\tilde{U}$  = VELOCIDADE PERDIDA DURANTE O CHOQUE



<sup>13</sup> Na realidade o princípio da ação e reação que aparece como a terceira lei de Newton, representa um princípio de conservação se considerarmos os corpos que interagem entre si como formando um sistema. Esta forma de visualizar a terceira lei é muito mais adequada e conveniente para analisar a mecânica de Carnot.

A contribuição original de Carnot é que ele associa à decomposição de d'Alembert com o conceito por ele criado de movimento geométrico. Ele o define como todo aquele que é reversível e compatível com os vínculos dos corpos. O diagrama mostrado pode servir como exemplo, desde que o consideremos como um choque de um corpo com um plano. Se  $W$  é a velocidade do corpo antes do choque com um plano que coincide com a direção de  $V$ , somente ela é reversível, pois não viola os vínculos do problema.  $U$  não é permitida, pois teria que penetrar no plano o que por definição não é possível, conseqüentemente este tipo de movimento não é reversível (geométrico) <sup>14</sup>.

Finalmente, uma outra característica fundamental da visão que Carnot tinha da mecânica é a forma como ele concebe que a experiência entra na nossa concepção de mundo físico. Ele afirma: *É então na experiência que os homens tiraram as primeiras noções da mecânica. Contudo as leis fundamentais do equilíbrio e do movimento que lhe servem de base se apresentam de uma parte tão naturalmente à razão e de outra, elas se manifestam tão claramente pelos fatos os mais comuns, que parece difícil de dizer se é a um antes que ao outro que devemos a perfeita convicção dessas leis, e se esta convicção terá lugar sem o concurso desses com a primeira. Estes fatos nos parecem muito familiares para que nós saibamos até que ponto, sem eles, a razão somente poderá estabelecer essas definições; e de um lado, se a razão não serve a ligar os fatos por analogia, eles nos parecem muito isolados para que possamos os erigir em princípios* <sup>15</sup>.

Em se tratando de uma concepção geral da mecânica, Carnot se aproxima mais de Newton do que de d'Alembert e dos Cartesianos embora continue a existir um abismo entre eles no que diz respeito à força.

#### 5.4 O CONCEITO DE TRABALHO NA MECÂNICA DE CARNOT

Neste item voltamos a acompanhar o conceito de trabalho na forma como ele se desenvolveu no contexto das máquinas, agora como parte integrante da mecânica de Carnot.

---

<sup>14</sup> O conceito de movimento geométrico será estudado em detalhes no capítulo 6.

<sup>15</sup> É interessante observar que Carnot rompe com a tradição puramente racionalista que vem de d'Alembert e leva até Lagrange e que tendia a ver a mecânica como um ramo da matemática pura e a experiência como uma espécie de instância homologadora daqueles princípios puramente racionais. Uma certa dosagem de empirismo que vem do empirismo inglês e de Newton vai ser adotada por Carnot muito embora ele continue a atribuir a razão um papel fundamental no conhecimento que é o de estabelecer os nexos causais na forma de leis.

Como já havíamos mostrado, uma das influências marcantes na obra de Carnot foi Bossut. Em 1775 apareceu o seu *Tratado elementar de mecânica*. Esta publicação é um excelente manual de mecânica, fornecendo uma visão geral do assunto na época em que Carnot era estudante em Mézières e com certeza deve ter sido uma de suas referências iniciais para o estudo das máquinas.

Um outro estudo importante tratando de mecânica das máquinas foi a *Nova Arquitetura Hidráulica*, publicada em 1790, por Prony com o objetivo claro de suplantar o livro de Bélidor, o que acabou não acontecendo. O segundo volume desta obra era dedicado às máquinas à vapor e tem a importância de ressaltar uma característica desta escola de mecânica das máquinas que é considerar o motor, ou mais genericamente uma força motriz como o meio de vencer uma resistência, o que coloca o trabalho no centro das preocupações <sup>16</sup>.

Ao estudarmos o desenvolvimento do conceito de trabalho, na época de Carnot, muitos autores sempre se referem à memória de Coulomb sobre o atrito, publicada em 1781, na qual Coulomb ganhou o prêmio e Carnot a menção honrosa, como também já tivemos oportunidade de mencionar. No entanto, muitos deles não citam Carnot. É o caso de Prony que não o cita nem em seu curso de mecânica na Escola Politécnica, embora ele utilize, de maneira corrente, os textos de Euler, Laplace e Lagrange. No seu curso de hidrodinâmica ele usa os textos de Bossut [157].

Os primeiros autores a citar Carnot, aparecem na primeira década do século XIX. O primeiro deles é André Guenyveau, que em 1810 publicou um *Ensaio sobre a ciência das máquinas*, mas se diferenciava dos estudos de Carnot. Ele fazia cálculos relativos ao equilíbrio das máquinas além de apresentar uma série de aplicações práticas, também utilizando a memória de Coulomb já destacada. Ao se referir ao movimento ele constata que o mesmo pode ser comunicado de duas formas: por choque ou por pressão. Fazendo esta distinção ele aponta as transmissões contínuas como aquelas que fornecem o melhor rendimento. Mas Guenyveau não atribui a Carnot a origem do princípio que ele utiliza, muito embora no prefácio de seu ensaio ele cite Carnot como autor de um tratado geral das máquinas [157].

Jean-Nicolas-Pierre Hachette (1769-1834) é outro autor que cita Carnot no prefácio de seu *Tratado Elementar das Máquinas*, de 1811 e faz elogios aos *Princípios Fundamentais do Equilíbrio e do Movimento*. Hachette observa que no último capítulo, Carnot trata em algumas páginas toda a teoria das máquinas e das forças moventes que lhe são aplicadas. Ele ainda acrescenta que a obra de Carnot é a

---

<sup>16</sup> No capítulo 7, veremos primeiramente em Coulomb a investigação mais consistente sobre o atrito mecânico, uma das formas mais importantes de resistência ao movimento. Em seguida Coriolis e Poncelet estudam as formas gerais de utilização da força motriz para vencer qualquer resistência e criar a mecânica aplicada.

obra do *sábio mais profundo e do engenheiro o mais experimentado*. Contraditoriamente, Hachette pouco utiliza os resultados apresentados por Carnot, muito menos o desenvolve. Na realidade o curso ministrado por ele é muito mais uma coleção de desenhos de máquinas particulares, enveredando também pelo terreno dos elementos de máquinas como engrenagens, polias, etc [157].

Quem retoma uma linhagem de investigações e que se encaminha no sentido de aplicar o conceito de trabalho é Petit. Em 1818 ele publica: *Sobre o emprego do princípio das forças vivas no cálculo do efeito das máquinas* e que constitui uma obra interessante no sentido que mais nos interessa investigar aqui. Petit era um físico muito talentoso que juntamente com Dulong (1785-1838) conseguiu estabelecer a lei que leva seus nomes, tendo morrido prematuramente. Entre as propriedades gerais que ele apresenta para o movimento, a da conservação das forças vivas é erigido em princípio mais eficaz para o *cálculo das máquinas*. Segundo ele é a força viva que permite em cada caso particular a avaliação a mais natural do motor e do efeito produzido, e a equação exprimindo a relação entre essas duas quantidades pode fornecer a solução direta do problema. No fundo o que Petit estava propondo era um método de balanço de energia para solucionar o problema das máquinas [157].

Petit observa com acuidade que os cientistas e engenheiros já reconheceram que é pelo princípio da conservação das forças vivas que as máquinas devem ser estudadas. Mas surpreendentemente ele afirma que *a teoria das máquinas vista segundo este ponto de vista está quase que inteiramente a ser criada*. Isto além de surpreendente é intrigante, pois pressupõe que ele não tenha lido o que Carnot havia publicado que como sabemos segue exatamente esta direção [157].

Petit orienta seu estudo, como outros também o fizeram, admitindo que a função fundamental de um motor seja vencer uma resistência. Se a máquina estiver em equilíbrio é suficiente conhecer as intensidades das forças, mas se a máquina estiver em movimento é necessário além do conhecimento das forças, conhecer-se os espaços percorridos por seus pontos de aplicação, o que recoloca o trabalho como preocupação central [157].

Petit ilustra a aplicabilidade do princípio das forças vivas ao cálculo do efeito produzido pela máquina graças à equivalência em dimensões das quantidades  $MgH$  e  $\frac{1}{2} MV^2$ . Ele cita o exemplo clássico da lei da queda dos corpos. Se a resistência é um peso de massa  $M$  elevado a uma altura  $H$ , o efeito produzido pela máquina é encontrado multiplicando o peso por esta altura e vale  $MgH$ . Ou, como a velocidade adquirida por um corpo pesado que cai de uma altura  $H$  é tal que  $V^2 = 2gh$ , o efeito

$MgH$  é igual a  $\frac{1}{2} MV^2$ . Assim, qualquer que seja o gênero de resistência, a expressão do efeito produzido por uma máquina pode sempre se exprimir nas dimensões de uma força viva, isto é, em um produto de uma massa pelo quadrado da velocidade. Podemos também considerar que um motor contém uma certa quantidade de força viva. O que é verdade sobre a resistência a ser vencida é igualmente verdade sobre o *motor*. Sua capacidade de vencer uma resistência pode sempre se reduzir a uma força viva.

Nos termos em que o problema das máquinas estava sendo colocado, significava que o cálculo de toda espécie de máquina se reduzia à determinação da relação entre a força viva empregada e a força viva comunicada à resistência. Pode-se então determinar as condições sob as quais o rendimento de uma máquina é máximo. Segundo o próprio Petit: *a força viva comunicada à resistência é igual àquela que possui o motor, diminuída das forças vivas perdidas nas mudanças bruscas de velocidade e daquela que o motor conserva depois que exerce sua ação*. Em outras palavras, o que Petit faz nada mais é que um balanço de energia traduzindo as perdas em termos de uma equivalência em força viva, caminho também trilhado por Carnot.

Desde o começo do século XVIII que era comum calcular a potência de uma máquina ou de um motor em função da altura que eles podiam elevar um certo peso. Neste sentido as quantidades  $MgH$  e  $\frac{1}{2}MV^2$  eram praticamente equivalentes no funcionamento da maior parte das máquinas, e Petit, como também seus contemporâneos, passaram a considerar essas quantidades como fazendo parte da mesma realidade, isto é, a força viva. Eles todos não fazem nenhuma diferença entre o trabalho e a energia cinética e utilizam sistematicamente a sua conversibilidade.

Ainda sem denominar o produto da força pelo deslocamento de trabalho, e sim de momento de atividade, é na teoria das máquinas de Lazare Carnot que podemos encontrar a diferença entre força viva e trabalho. É o que tentaremos mostrar ao estudar essa teoria. Sadi, seu filho, percebeu esta distinção em seu conceito de conversibilidade<sup>17</sup>.

Muito provavelmente foi devido à reedição por Navier da *Arquitetura Hidráulica* de Bélidor que a teoria geral das máquinas de Carnot tenha finalmente passado a ocupar um lugar de destaque aos olhos da nova geração de engenheiros. Foi o que de fato ocorreu e alguns deles tiveram um papel destacado no sentido de promover o seu desenvolvimento até torná-la uma verdadeira ciência das máquinas. Este assunto será objeto do sétimo capítulo deste estudo.

---

<sup>17</sup> Estudaremos em maior profundidade o conceito de conversibilidade em Lazare Carnot quando abordarmos o conceito de movimento geométrico e tentaremos estabelecer a relação com os estudos de Sadi Carnot da máquina térmica.



Navier, na obra referida anteriormente, a qual ele agregou uma série de comentários e acréscimos, resume a história do princípio das forças vivas desde sua origem. Segundo ele foi Galileu quem primeiro atribuiu algumas definições e conceitos aos movimentos de uma máquina. Galileu estabeleceu que para uma dada potência em um dado tempo não podia se produzir senão um efeito determinado o qual equivalia e tinha por medida o produto do peso e da altura a qual ele era elevado.

Ainda segundo Navier, o princípio da conservação das forças vivas deve ser atribuído a Huygens e foi fruto de uma generalização que ele fez a um sistema de corpos de uma proposição de Galileu segundo a qual um corpo descendo livremente ao longo de uma curva qualquer adquire sempre a mesma velocidade que em uma queda vertical da mesma altura <sup>18</sup>.

Finalmente, a avaliação que Navier faz da obra de Carnot relativa às máquinas é que tanto no *Ensaio sobre as máquinas*, de 1781, como nos *Princípios fundamentais do equilíbrio e do movimento*, de 1803, ele cria uma teoria geral das máquinas, teoria essa inteiramente fundada nos princípios da mecânica.

## 5.5 MEMÓRIA DE LAZARE CARNOT DE 1779

Trata-se de uma memória submetida por Carnot à Academia Real de Ciências de Paris em 1778, com a finalidade de concorrer a um concurso promovido por esta mesma Academia. O ensaio se divide em duas partes. A primeira, do parágrafo 1 ao 26 é dedicada a descrição das experiências sobre o atrito. A segunda parte está dividida em três seções. A primeira estuda os princípios das *máquinas em geral*, parágrafos 27 a 50. A segunda seção, parágrafos 51 a 79, estuda sete classes de máquinas simples em equilíbrio. A terceira seção, parágrafos 80 a 85, estuda as máquinas simples em movimento.

Nesta primeira memória Carnot trata de fazer uma revisão dos princípios gerais da mecânica, ordená-los com vistas a sua aplicação às máquinas o que será feito na segunda memória de 1781.

Algumas observações preliminares são importantes antes de entrarmos na mecânica de Carnot. Na realidade essa mecânica está inteiramente fundada nos princípios gerais que regem a mecânica e que no fundo são o da conservação da força viva, da conservação da quantidade de movimento, da conservação do momento da quantidade de movimento, etc. Em se tratando de forças, como já vimos, para Carnot

---

<sup>18</sup> Estamos nos referindo aos estudos de Galileu sobre a queda dos corpos em um plano inclinado os quais levaram-no à lei de inércia.

elas se confundem com a quantidade de movimento. Uma particularidade interessante e peculiar em Carnot é a utilização generalizada da geometria e da trigonometria para deduzir seus princípios de conservação nas direções que mais lhe interessam. Isto o diferencia da abordagem essencialmente analítica e algébrica de Lagrange, que abole todas as figuras ou esquemas mecânicos montados em analogias e expressos graficamente. Mesmo assim, isso não impede que ele seja um antecessor imediato e até mesmo quase contemporâneo do grande responsável pela formalização da mecânica.

Um mecanismo importante para compreensão da aplicação dos princípios de conservação na mecânica de Carnot é seu esquema de decomposição de velocidades seguindo o modelo de d'Alembert. Neste sentido a velocidade efetiva de um corpo é sempre decomposta nas duas componentes, a velocidade que o corpo teria se não fosse perturbado e a velocidade que é destruída pelos choques através do movimento<sup>19</sup>.

Quando o conceito de movimento geométrico é aplicado associado com a decomposição das velocidades na forma descrita acima, tem-se uma interessante e original aplicação dos princípios de conservação. Na verdade esta idéia de movimento geométrico é uma versão *sui generis* do princípio dos trabalhos virtuais, mas com a vantagem de tentar estendê-lo para o caso do movimento.

O pressuposto fundamental que faremos é que essas duas memórias, ou como foram chamadas, de *ensaios*, constituem os estudos iniciais e preliminares cujo coroamento será feito com a publicação dos *Princípios*. Um outro aspecto importante é que tentaremos concentrar o foco de nossa análise nas seções diretamente relacionadas com a teoria das máquinas por entendermos que nosso estudo não é uma análise global da mecânica de Carnot, mas uma abordagem que tenta acompanhar o desenvolvimento do conceito de trabalho seguindo a evolução de uma teoria para as máquinas em geral. Além de tudo também temos a preocupação de buscar apreender a passagem desses primeiros estudos para uma sistematização maior, um aprofundamento e generalização também maiores dos conceitos empregados, enfim como o estudo de Carnot evoluiu dos *ensaios* para os *Princípios*.

Manteremos a mesma nomenclatura empregada por Carnot, inclusive a forma como ele escreva as equações, que mesmo contendo o símbolo de integral não aparece o termo diferencial.

O problema que Carnot se propõe resolver, que é o do movimento de uma máquina qualquer, é muito semelhante à dinâmica do sistema de partículas discutido

---

<sup>19</sup> Ver o princípio de d'Alembert em sua forma original [106].

por d'Alembert no princípio que leva seu nome. Trata-se, na realidade de um sistema geral de  $n$  corpos ou partículas, podendo alguns entre eles estarem conectados entre si, além do sistema como um todo possuir uma forma de vinculação qualquer, e a este sistema é dada uma condição inicial a todos ou somente a alguns dos corpos que dele fazem parte. O problema a ser resolvido é então determinar o movimento subsequente de qualquer corpo ou partícula do sistema. Chamando de  $m$  a massa de um corpúsculo, ou partícula qualquer do sistema,  $V$  a velocidade que ele teria se estivesse livre, isto é, sem a reação que ele sofre de outras partes do sistema,  $u$  a velocidade que ele efetivamente tem e  $y$  o ângulo entre  $V$  e  $u$ , teremos então:  $\int mu(V \cos y - u) = 0$ , ou seja, o somatório dos produtos das quantidades de movimento de cada um dos corpúsculos pela velocidade que ele perdeu, calculado no sentido de  $u$  é nulo.

Isto pode ser comprovado decompondo-se  $V$  em duas componentes,  $u$  e a outra que é a velocidade perdida nos choques, então a velocidade estimada no sentido de  $u$  é  $V \cos y - u$ .

É esta proposição que dá início a parte da memória de Carnot relativa às máquinas e é enunciada no parágrafo 27. No parágrafo 29 Carnot propõe o que ele chama de teorema fundamental o qual transcrevemos na íntegra:

*Se em um sistema qualquer de corpos duros agindo uns sobre outros de uma maneira qualquer seja imediatamente, seja por intermédio de uma máquina, chamarmos de  $m$  uma molécula qualquer do sistema,  $V$  a velocidade que ele teria se estivesse livre em um instante dado,  $u$  aquela que ele realmente adquire devido à ação recíproca das diferentes partes do sistema,  $y$  o ângulo formado entre as direções das velocidades  $V$  e  $u$ ; eu afirmo que teremos:  $\int mu(V \cos y) = 0$*

Se observarmos que a decomposição  $V \cos y$  é o próprio  $u$  teremos na realidade  $\int mu^2 = 0$ , o que significa a conservação da energia cinética total do sistema de partículas. O que devemos ter em conta em primeiro lugar é que Carnot não faz distinção entre o sinal de integral e o de somatório, ou seja, em termos de simbologia não há diferença para ele entre sistemas contínuos e sistemas discretos. Além disso, a equação acima expressa na realidade um balanço de energia, onde parte do sistema comunica movimento a outra parte de tal sorte que o processo é em si conservativo.

No corolário 13, aparece pela primeira vez nesta primeira memória uma referência direta ao trabalho. Façamos a sua transcrição integral:

Como a maior parte das máquinas tem por objeto elevar pesos eu me deterei alguns momentos sobre o caso ou na equação  $\int mu \, du - \int mp \, ds \cos x = 0$  encontrada no corolário 3, em que  $p$  é a força da gravidade e  $M$  a massa total do sistema,  $H$  a altura de onde desce o centro de gravidade durante o tempo  $t$ ,  $V$  a velocidade devido a descida da altura  $H$ ,  $h$  a altura donde a massa  $m$  desceu no mesmo tempo; é então claro que teremos  $ds \cos x = dh$  e  $\int mp \, ds \cos x = \int mp \, dh = Mp \, dH$ , e então  $2 \int \int mp \, ds \cos x = 2 \int Mp \, dH$  ou  $2MpH = MV^2$ , então  $\int mu^2 = \int mk^2 + MV^2$ .

A penúltima igualdade representa obviamente um balanço de energia ou que o trabalho realizado pelo peso desde  $H$  transformando-se em energia cinética igual a  $\frac{1}{2} MV^2$ . Sendo  $k$  a velocidade inicial do corpúsculo, a última igualdade representa o módulo de qualquer um dos três vetores em função dos outros dois.

Essas são as primeiras equações algébricas na primeira memória de Carnot e que envolvem as quantidades que mais tarde iriam se tornar conhecidas como energia cinética e trabalho e que por enquanto ainda eram denominadas de força viva e momento de atividade ou momento de ação, estas duas últimas as formas como Carnot designava o trabalho. Conforme vimos também se trata da aplicação do princípio da conservação da força viva, o qual temos nos reportado com bastante freqüência e ao qual retornaremos no capítulo seis quando ele é extensivamente aplicado às máquinas nas primeiras décadas do século XIX.

Carnot em seguida faz uma série de aplicações particulares inclusive considerando casos em que o sistema permanece em equilíbrio, sempre partindo das situações de movimento. No item 48, ele faz uma afirmação importante no contexto que temos perseguido ao longo deste estudo que é o da identificação do termo que se conserva quando a máquina está em movimento. Ele afirma: *A vantagem que têm as máquinas é então somente de poder variar os fatores  $F$ ,  $u$ ,  $t$ , mas o produto deve sempre ser igual a  $M p H$  desde que se trata de um peso ou de uma quantidade análoga como é o caso de uma outra resistência.*

O que Carnot deixa explícito, e ele o faz inúmeras vezes de formas diferentes, é o próprio princípio da conservação da energia, no âmbito da mecânica. Podemos variar a vontade as quantidades enumeradas como força, velocidade e tempo, mas o trabalho ou a energia dispendida no processo jamais ultrapassará uma certa quantidade constante  $M p H$ .

A segunda parte desta primeira memória trata do equilíbrio de máquinas simples e passaremos então para a segunda memória também denominada de *Ensaio* onde a teoria geral das máquinas continua a ser desenvolvida.

## 5.6 MEMÓRIA DE LAZARE CARNOT DE 1781

Esta segunda memória foi submetida por Carnot à Academia Real de Ciências de Paris para o concurso de 1781 e compreende 191 parágrafos, correspondendo a 107 páginas. Ela se divide em duas partes. A primeira, parágrafo 1 a 100 consiste em um estudo experimental sobre o atrito. A segunda parte aborda o mesmo assunto também já abordado na primeira memória, mas de uma maneira mais desenvolvida e se divide igualmente em duas partes. A primeira, parágrafos 101 a 160, estuda as *Máquinas em Geral*. A segunda parte constitui uma *aplicação das experiências em máquinas simples* e ocupa os parágrafos 161 a 191.

Logo no início desta investigação vejamos como o próprio Carnot justifica um tipo de teoria que seria geral e comum a todas as máquinas:

*Cada máquina pode ter propriedades particulares. Não se trata aqui senão daquelas que são comuns a todas; ao examinar as máquinas sob um ponto de vista geral nós evitaremos as repetições que necessitaremos fazer para cada ocasião que formos tratar das propriedades que são comuns a todas as outras: é também vantajoso reduzir os princípios ao menor número possível e de perceber a ligação que reúne essas verdades tão disparatadas a primeira vista.*

*Ou apesar da diferença entre todas as máquinas, suas propriedades são de alguma maneira compreendidas em uma mesma lei muito simples e da qual podemos deduzir com uma grande facilidade tudo o que se refere a cada uma em particular. Esta lei será explicada e demonstrada rigorosamente depois que tivermos falado um pouco sobre uma idéia geral e simples do nosso assunto.*

Carnot discorre longamente sobre a questão do equilíbrio das máquinas em várias situações, a mais simples de todas sendo aquela onde somente intervêm os pesos de suas partes constitutivas e a lei do equilíbrio será dada pela posição do centro de massa do sistema, evidentemente na posição mais baixa. No parágrafo 109 ele retorna ao tema central, ou seja, a teoria geral das máquinas, ao afirmar: *A ciência das máquinas em geral além de toda mecânica se reduz então a questão seguinte. Conhecendo o movimento virtual de um sistema de corpos, isto é, aquele que cada um dos corpos adquiriria se ele estivesse livre de encontrar o movimento real que terá no*

*instante seguinte devido à ação recíproca dos corpos supondo que cada um deles seja dotado de inércia comum a todas as partes da matéria.*

*E, portanto, este problema é mais simples que entre os corpos do que se entre eles encontrarmos alguns que sejam desprovidos desta inércia e é claro que não podemos ter uma teoria geral das máquinas sem ter resolvido este problema em toda sua extensão: é o que vamos tentar.*

Duas observações são importantes de serem feitas diante da citação de Carnot. A primeira é que a ciência das máquinas ou uma teoria geral das máquinas como ele denomina este seu estudo, se inscreve perfeitamente no quadro conceitual da mecânica geral e não seria uma ciência a parte. Até pelo contrário, segundo ele, o problema de uma ciência das máquinas se identifica com o problema geral da mecânica. A segunda observação pertinente é que em se tratando de uma teoria é necessário fazer hipóteses simplificadoras, enfim fazer a modelagem do problema. E dentro dessa modelagem ele admite que a questão da inércia é um problema a ser previamente resolvido antes da construção desta nova teoria. Em termos de modelagem mecânica ele também afirma que se os corpos interagindo entre si forem elásticos, é possível considerá-los duros, mas ligados a molas convenientemente construídas no sentido de reproduzir aquelas propriedades elásticas.

No parágrafo 111 ele faz uma importante afirmação: *O único princípio que pode nos conduzir a solução do problema proposto é o seguinte: A reação é sempre igual e contrária a ação. É desta lei simples e incontestável que partiremos, lei universal que submete igualmente todos os corpos seja durante o choque, a pressão ou a atração mesma e todos os fenômenos conhecidos da natureza, mas não se trata aqui senão de conhecer seu efeito no choque e na pressão.*

Devemos sempre ter em conta que o princípio da ação e reação em Carnot é o mesmo que o da conservação da quantidade de movimento e não da igualdade de forças no sentido newtoniano. Levando em conta a discussão sobre a modelagem feita anteriormente, consideremos então dois corpúsculos quaisquer retirados do sistema os quais são separados entre si por pequenas barras incompressíveis que como foi dito o movimento se comunica entre corpos vizinhos até se estender ao sistema inteiro. Então teremos:

$M'$  e  $M''$  = massas desses corpúsculos

$V'$  e  $V''$  = velocidades que eles devem ter no instante seguinte

$F'$  = ação de  $M''$  sobre  $M'$ , isto é, a força ou quantidade de movimento que o primeiro imprime ao segundo

$F''$  = a reação de  $M'$  sobre  $M''$

$q'$  e  $q''$  = os ângulos formados pelas direções de  $V'$  e  $F'$  e pelos de  $V''$  e  $F''$ , respectivamente.

A velocidade relativa entre  $M'$  e  $M''$  será  $V' \cos q' + V'' \cos q''$  e como os corpos devem seguir juntos,  $V' \cos q' + V'' \cos q'' = 0$ . Então, pelo princípio da reação igual à ação e em sentido contrário, teremos  $F' V' \cos q' + F'' V'' \cos q'' = 0$ . Se um deles for fixo e fizer parte de um obstáculo, teremos  $V' \cos q' = 0$  ou  $V'' \cos q'' = 0$ . Imaginemos então o sistema inteiro e os corpúsculos sendo tomados dois a dois, teremos  $\int F' V' \cos q' + \int F'' V'' \cos q'' = 0$ .

Reformulando o problema anterior, colocando-o mais em uma versão mais d'alembertiana como Carnot sempre faz teremos:

$M$  = massa de cada um dos corpúsculos do sistema

$W$  = sua velocidade virtual

$V$  = sua velocidade real

$U$  = a velocidade que ele perde de sorte que  $W$  seja a resultante de  $V$  e desta velocidade

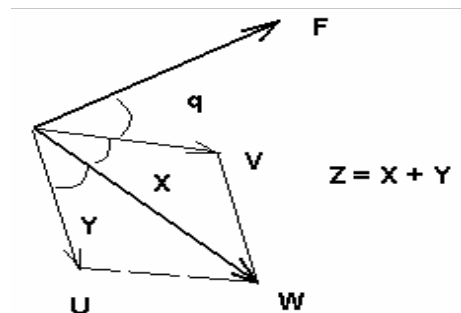
$F$  = força que imprime a  $M$  cada um dos corpúsculos adjacentes e através dos quais ele recebe evidentemente todo o movimento que lhe é transmitido de diferentes partes do sistema

$X$  = ângulo entre as direções de  $W$  e  $V$

$y$  = ângulo entre as direções de  $W$  e  $U$

$Z$  = ângulo entre as direções de  $V$  e  $U$

$q$  = ângulo compreendido entre  $V$  e  $P$



Teremos então para todo o sistema  $\int Fv \cos q = 0$  ou  $\int VF \cos q = 0$ . Como a velocidade antes do choque é  $W$  esta velocidade estimada no sentido de  $V$  será  $W \cos X$ , então  $V - W \cos X$  é a velocidade ganha por  $M$  no sentido de  $V$  então  $M(V - W \cos X)$  é a soma das forças  $F$  que atuam sobre  $M$  estimadas

cada uma no sentido de  $V$ , então  $MV(V - W \cos X)$  é a mesma soma multiplicada por  $V$  ou a cada corpúsculo responde um par, de sorte que a soma total de todas essas somas é  $\int VF \cos q$ , então  $\int MV(V - W \cos X) = \int VF \cos q$ , ou seja,  $\int MV(V - W \cos X) = 0$ .

Como  $W$  é a resultante de  $V$  e  $U$ , teremos  $W \cos X = V + U \cos Z$ .

Substituindo este valor na equação precedente, teremos:  $\int MVU \cos Z = 0$ , que é a equação chamada de fundamental e a qual já nos reportamos na primeira memória.

É nesta altura do ensaio que Carnot introduz o seu conceito de movimento geométrico, na seguinte forma: *Se um sistema de corpos parte de uma posição dada em um movimento arbitrário, mas tal que foi possível também submetê-lo a um outro igual e diretamente oposto, cada um desses movimentos será denominado de movimento geométrico.* Ele dá uma série de exemplos desses movimentos e o que realmente os caracteriza é sua reversibilidade, ou seja, se o sistema admite como possível um movimento igual e de sentido contrário. Neste caso este tipo de movimento só depende das configurações geométricas e não das regras da dinâmica<sup>20</sup>.

No parágrafo 116, Carnot propõe resolver o seguinte problema:

*Conhecendo o movimento virtual de um sistema qualquer dado, de corpos duros (ou seja, aquele que o corpo adquirirá se cada um dos corpos estiver livre) encontrar o movimento real que ele deverá ter no instante seguinte.*

## SOLUÇÃO:

Chamemos:

$m$  = massa de cada corpúsculo do sistema;

$W$  = velocidade virtual dada;

---

<sup>20</sup> No artigo de Antonino Drago intitulado: "Le lien entre mathématique et physique dans la mécanique de Lazare Carnot", em [158], pg. 501, encontramos muitas observações importantes acerca da noção criada por Carnot de movimento geométrico. O autor chama a atenção que para compreender corretamente esta noção é necessário eliminar certas ambigüidades deixadas por Carnot e os pontos obscuros devem-se aos seguintes fatos: a) Carnot dá duas definições diferentes de movimento geométrico. b) ele assinala várias vezes que os movimentos geométricos são infinitesimais e ao mesmo tempo ele os considera finitos. c) Carnot dá definições locais para os movimentos geométricos, mas após isso ele utiliza este conceito do ponto de vista global, ou seja, para o sistema inteiro. d) Carnot utiliza os movimentos geométricos em uma equação, chamada segunda equação fundamental, onde a dedução lógica é obscura senão incorreta. O autor somente considera movimento geométrico um movimento global e infinitesimal admitido e realizado sobre o sistema se o movimento oposto é possível. Em outras palavras, a característica fundamental do movimento geométrico é sua reversibilidade.



$V$  = velocidade real procurada;

$U$  = velocidade que cada corpúsculo perde no choque de sorte que  $W$  seja a resultante de  $V$  e desta velocidade;

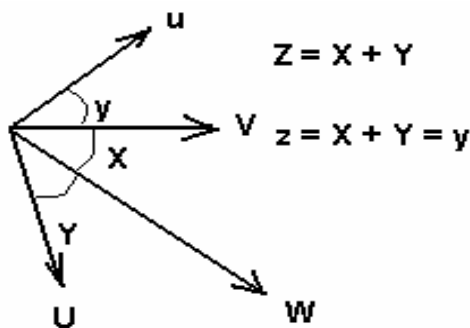
$u$  é o movimento geométrico.

Imaginemos então que forneçamos ao sistema um movimento geométrico arbitrário e  $u$  seja sua velocidade geométrica.

$X$  = ângulo entre  $W$  e  $V$  ;      $x$  = ângulo entre  $W$  e  $u$  ;

$Y$  = ângulo entre  $W$  e  $U$  ;      $y$  = ângulo entre  $V$  e  $u$  ;

$Z$  = ângulo entre  $V$  e  $U$  ;      $z$  = ângulo entre  $U$  e  $u$  .



$$\int muv \cos z = 0 \quad (1)$$

$$\int muv \cos z = \int muv \sin y = 0$$

Em seguida Carnot apresenta as várias formas nas quais a equação (1) pode ser escrita, todas elas relacionadas com o produto escalar dos vetores envolvidos.

Considerando os vetores anteriores e suas decomposições em três eixos coordenados como ele indica:

$W$ ---- componentes $W', W'', W'''$	$Uu \cos z = U' u' + U'' u'' + U''' u'''$
$V$ ----- componentes $V', V'', V'''$	$\int mU' u' + \int mU'' u'' + \int mU''' u''' = 0$
$U$ ---- componentes $U', U'', U'''$	$\int mu' W' + \int mu'' W'' + \int mu''' W''' = 0$
$u$ ----- componentes $u', u'', u'''$	$\int mu' V' + \int mu'' V'' + \int mu''' V''' = 0$

As equações acima servem para encontrar a lei de choque nos diversos casos particulares.

Como  $W^2 = U^2 + V^2$  ;  $\int mW^2 = \int mV^2 + \int mU^2$  , e ele conclui :

No choque de corpos duros seja o choque imediato ou que ele se faça por intermédio de uma máquina qualquer sem mola, seja enfim que se considere ou não a massa mesma da máquina, a soma das forças vivas antes do choque é igual a soma das forças vivas depois do choque mais a soma das forças vivas que apareceriam se a velocidade de cada móvel fosse igual aquela que ele perdeu devido ao choque <sup>21</sup>.

Em seguida Carnot aplica um balanço de energia semelhante para o caso no qual o movimento se faz através de variações muito pequenas que ele chama de insensíveis. Do ponto de vista matemático isto implica em fazer  $U$  um infinitésimo de segunda ordem e assim  $\int mW^2 = \int mV^2$ .

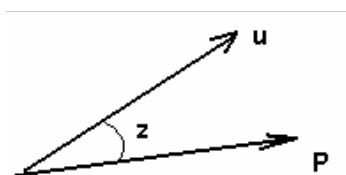
Após mostrar algumas identidades matemáticas provenientes desses balanços de energia cinética, Carnot faz algumas definições no sentido de ampliar o raio de ação de sua análise.

## DEFINIÇÕES

(a) A diferença entre forças solicitantes e forças resistentes depende do ângulo formado entre ela e a direção da velocidade. Se o ângulo for agudo temos o primeiro caso, se o ângulo for obtuso a força é resistente.

(b) Se uma força motriz absoluta  $P$  se move com a velocidade  $u$ , a quantidade  $Pudt$  será chamada de *quantidade de ação consumida* durante  $dt$  por esta força, isto é *a quantidade de ação consumida* em um tempo infinitamente curto por uma força motriz absoluta é o produto desta força pelo caminho que percorre neste tempo infinitamente pequeno o ponto onde ela está aplicada.

Então esta mesma quantidade em termos de um tempo dado, se chamarmos de  $ds$  o caminho percorrido durante  $dt$ , teremos  $\int Pds$ . Se  $P$  for constante como o caso de um peso de um corpo, então teremos  $Ps$ .



$u$  = velocidade

$P$  = força absoluta

$z$  = ângulo entre  $P$  e  $u$

<sup>21</sup> Trata-se de um balanço das forças vivas no qual as perdas devidas aos choques são transformadas em termos equivalentes a forças vivas.

$P \, u \, dt \, \cos z$  será chamada de *quantidade de ação produzida* pela força  $P$  durante  $dt$ , ou seja, durante um tempo infinitamente pequeno. Em um caminho finito  $\int P \cos z \, u \, dt$ .

Como vimos essas definições introduzem o conceito de trabalho, porém com a denominação de quantidade de ação. Com base nessas definições ele vai prosseguir seus estudos sobre o equilíbrio e o movimento das máquinas.

Carnot propõe então o estudo das máquinas na forma de uma série de teoremas o que nos dá uma indicação de seu esquema classificatório das máquinas para o estudo de seu movimento.

### **TEOREMA 1 : Princípio geral do equilíbrio nas máquinas**

*Se uma máquina estiver em equilíbrio e a ela imprimirmos um movimento geométrico arbitrário sem nada alterar em termos das forças que lhe são aplicadas, a quantidade de ação produzida então no primeiro instante pelas forças solicitantes será igual a quantidade de ação produzida no mesmo tempo infinitamente curto pelas forças resistentes.*

Trata-se na realidade este teorema da aplicação do princípio dos trabalhos virtuais aos sistemas ideais simples, isto é, sem atrito ou elementos elásticos como estudamos atualmente.

Carnot passa então ao problema dinâmico na forma de um novo teorema.

### **TEOREMA 2 : Princípio geral do movimento nas máquinas**

*Se fizermos variar subitamente o movimento de uma máquina com um outro movimento qualquer geométrico e se abandonarmos a máquina a ela mesma, a conservação das forças vivas terá lugar em seguida e a cada instante do movimento que ela adquirirá em qualquer alteração que ela tiver às forças motrizes.*

Usando a seguinte nomenclatura:

$m$  = massa de cada corpúsculo

$V$  = velocidade real

$P$  = força motriz

$U$  = velocidade depois da variação do movimento real em outro movimento qualquer geométrico

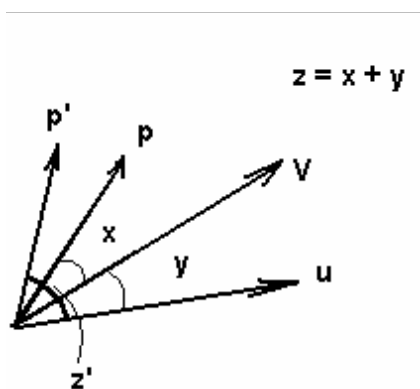
$X$  = ângulo entre  $V$  e  $p$

$Y$  = ângulo entre  $V$  e  $u$

$Z$  = ângulo entre  $u$  e  $p$

$p'$  = força motriz após ter havido uma variação arbitrária

$z'$  = ângulo formado entre  $p'$  e  $u$



$$\int mu \, du = \int mu \, dt \, p' \cos z'$$

Podemos observar que a velocidade virtual de  $m$  estimada no sentido de  $u$  é  $V \cos y + d(V \cos y)$  e que a velocidade perdida por  $m$  durante  $dt$  estimada no sentido de  $u$  é  $p dt \cos z - d(V \cos y)$ .

Quanto ao teorema 2, ele é mais uma forma de aplicação do princípio da conservação das forças vivas. O fato de ter sido mencionado um movimento geométrico diz respeito a preservação dos vínculos do sistema e não a aplicação do princípio dos trabalhos virtuais ao problema dinâmico.

Esses também são os teoremas fundamentais para o estudo das máquinas. Os outros casos são tratados na forma de corolários e, portanto como casos particulares como veremos a seguir.

### **COROLÁRIO 1 : Sobre o movimento nas máquinas com peso**

*Se viermos a mudar subitamente o movimento efetivo de uma máquina com peso em um outro movimento qualquer geométrico e se abandonarmos imediatamente o sistema a suas próprias forças, a soma das forças vivas que terão lugar em seguida a cada instante do movimento que ela adquirirá é igual a soma das forças vivas iniciais (isto é imediatamente depois da variação) mais a soma das forças vivas que teriam*

*lugar se cada ponto do sistema tivesse sua velocidade igual aquela que é devida a altura donde desceu o centro de gravidade depois da variação.*

$M$  = massa total do sistema

$H$  = altura de onde desceu o centro de gravidade depois da mudança  $W$  da velocidade devido a altura  $H$

$h$  = altura de onde desceu cada corpúsculo  $m$  do sistema depois do mesmo instante,  $k$  sendo sua velocidade inicial e  $V$  a velocidade no tempo  $t$

$z$  = ângulo entre  $V$  e a vertical

$\int mv^2 = \int mk^2 + MW^2$  que será evidente se a diferencial  $\int mVdV = \int MWdW$  for uma equação exata, mas  $W^2 = 2gH$  e então teremos que provar que  $\int mVdV = MgdH$  ou  $\int mVdV = \int mgdh$  ou  $\int mVdV = \int mgVdt \cos z$

### **COROLÁRIO 2 : Sobre as máquinas que se movem uniformemente**

*Sempre que uma máquina se move uniformemente (i.e. que cada ponto do sistema tem uma velocidade constante) a quantidade de ação produzida em um tempo dado pelas forças solicitantes é igual a quantidade de ação produzida no mesmo tempo pelas forças resistentes.*

$$\int mpVdt \cos x = \int mVdV \quad \text{mas como} \quad dV = 0 \quad \text{então} \quad \int mpVdt \cos x = 0$$

### **COROLÁRIO 3 : Sobre as máquinas com peso que se movem uniformemente**

*Sempre que uma máquina que não tenha outras forças aplicadas senão seus pesos e se move uniformemente, o centro de gravidade do sistema permanece constantemente na mesma altura sem subir ou descer.*

$$V = k \quad \text{então} \quad MW^2 = 0 \quad \text{então} \quad W = 0$$

#### **COROLÁRIO 4 : Sobre as máquinas sujeitas a retornos periódicos**

*Em uma máquina sujeita a retornos periódicos, a quantidade de ação produzida durante cada período pelas forças solicitantes é igual a quantidade de ação produzida no mesmo tempo pelas forças resistentes.*

#### **COROLÁRIO 5 : Sobre as máquinas sujeitas ao atrito**

*Tudo que temos dito das máquinas em geral deve se estender também aquelas que estão sujeitas ao atrito ou outras resistências quaisquer, observando essas resistências como forças ativas aplicadas a máquina mas qualquer que seja o movimento é claro que essas forças devem sempre ser computadas entre aquelas que temos chamado de resistentes, isto é entre aquelas que são exercidas em um sentido contrário às velocidades reais dos pontos onde elas são aplicadas. Assim por exemplo se os corpos não estão animados de nenhuma força motriz é claro que as velocidades irão sempre diminuindo e que em conseqüência procuraremos em vão uma máquina sujeita ao atrito e que pode conservar perpetuamente seu movimento primitivo sem alteração : e tem mais pois temos encontrado por experiência que o atrito aumenta quando a velocidade relativa dos corpos diminui; e partindo os graus de velocidade perdidas a cada instante serão de mais a mais maiores, de sorte que o movimento não pode acabar não somente de enfraquecer pouco a pouco mas mesmo de se estender totalmente como se o atrito fosse por exemplo proporcional à velocidade como acreditavam alguns físicos célebres e o movimento se enfraqueceria de verdade de mais a mais não podendo portanto ser perpétuo.*

*O mesmo raciocínio pode ser aplicado às máquinas com peso e chegamos a mesma coisa, pois cada vez que o centro de gravidade subir para descer em seguida, isto será sempre com menos velocidade e por conseqüência ele subirá sempre menos e menos e acabará por não poder subir mais.*

Nossa intenção ao transcrever na íntegra o corolário 5 é mostrar que a mecânica de Carnot não considera as máquinas como dispositivos e sistemas ideais, ou seja, completamente sem atrito com a aplicação óbvia do princípio dos trabalhos virtuais para os casos de equilíbrio e o princípio da conservação da energia cinética para os casos dinâmicos. Como vimos da longa citação acima, o atrito joga um papel importante nas suas considerações sobre as máquinas. No entanto, normalmente ele sempre converte em trabalho ou em energia cinética (força viva) aquela parte que se perde de forma que sua análise fica sempre restrita ao campo da mecânica. Em outras

palavras, embora para Carnot a energia ou o trabalho seja consumido pelo atrito, no entanto ele pode ser convertido em uma parcela de força viva.

A parte final da memória de Carnot é dedicada a considerações gerais sobre as máquinas. A questão do trabalho volta novamente ao centro das preocupações quando ele indaga qual o verdadeiro objetivo de uma máquina? Ele afirma: *Nós já temos dito que é de poder variar a vontade e segundo o que as circunstâncias exigem, os termos da quantidade de ação  $F V T$  ou  $Q$  produzida pelas forças solicitantes. Se o tempo é precioso e se a ação deve ser produzida em um tempo muito curto e que não temos senão uma força capaz de imprimir pouca velocidade, então com um grande esforço poderemos encontrar uma máquina para suplementar a velocidade necessária para a força. Se ao contrário, for necessário elevar um peso bastante considerável e se só tivermos uma fraca potência, mas capaz de uma grande velocidade, poderemos imaginar uma máquina com a qual o agente poderá compensar pela sua velocidade a força que lhe falta. Enfim, se a potência não é capaz nem de um grande esforço nem de uma grande velocidade poderemos ainda com a ajuda de uma máquina somente suplantar a resistência em questão, mas então não poderemos dispensar de empregar muito tempo e é isto o que é necessário entender por este princípio tão conhecido: que nas máquinas em movimento perde-se sempre em tempo ou velocidade o que se ganha em força.*

Esta discussão é essencialmente a mesma que fizemos no capítulo 3 quando introduzimos as idéias de trabalho e energia. A quantidade que permanece aproximadamente constante e que limita a ação de uma determinada máquina é o trabalho que ela é capaz de realizar. Quanto ao princípio enunciado na última frase da citação ele também já era conhecido pelo menos empiricamente conforme dissemos desde a época de Heron de Alexandria.

Após tecer essas considerações sobre os objetivos de uma máquina qualquer Carnot passa a discutir a questão da eficiência das máquinas, desta vez indagando qual a maneira mais vantajosa de aplicar potência motriz nas máquinas em movimento de forma que ela produza o maior efeito possível. Ele então afirma:

*A condição geral é que  $Q$  seja um máximo o que dá origem a duas reflexões, a primeira referente às direções que convêm dar as forças, e a outra a maneira de proporcionar convenientemente as faculdades que elas são capazes. O primeiro ponto é resolvido pelo que deve ser dirigido no sentido mesmo de suas velocidades.*

*A segunda reflexão se apresenta também muito naturalmente: um agente é suscetível de duas faculdades, uma é a força, a outra a velocidade; ou para obter deste agente todo o efeito do qual ele é capaz, existe uma certa relação e colocação entre sua força e sua velocidade, relação que não pode ser conhecida senão pela*

*experiência, Por exemplo, reconhecemos, suponho que um homem trabalhando durante 8 horas por dia com uma manivela pode fazer continuamente um esforço de 25£ com uma velocidade de um pé por segundo, mas se forçarmos este homem a ser muito mais rápido crendo em avançar, há necessidade de retardarmos porque o homem não estará em estado de fazer um esforço continuado de 25£ durante horas por dia, de sorte que a quantidade de ação  $FVT$  que ele produz diminuirá. Se ao contrário diminuirmos a velocidade, a força aumentará mais em relação com  $FVT$ , de sorte que  $FVT$  diminuirá ainda segundo a experiência para que  $FVT$  seja um máximo é necessário conservar a velocidade aproximada em pés por segundo e de não a fazer trabalhar senão em torno de 8 horas por dia<sup>22</sup>.*

Para finalizar esta segunda memória, Carnot introduz algo muito parecido com um balanço de energia, evidentemente restrito ao campo da mecânica, para os casos nos quais não exista ou exista choque. Para o caso de uma máquina que eleva um peso  $P$  a uma altura  $H$ , o momento de ação em uma altura  $H$  será dado pelas forças solicitantes e será  $PH + 1/2 \int mu^2$ .

Para o caso de choque, chamamos de  $q$  a quantidade de ação que ele produzirá sem choque,  $Q$  a quantidade de ação que ele terá produzido efetivamente e  $h$  a altura onde estará o corpo  $P$  no momento do choque,  $X$  a soma das forças vivas do sistema imediatamente antes do choque e  $Y$  a soma das forças vivas imediatamente depois do choque. Então teremos:

no momento do choque	$Ph + X / 2$
imediatamente depois do choque	$P(H - h) - Y / 2$
ele terá a produzir a quantidade de ação	$PH + (X - Y) / 2$

ou seja, que  $Q = PH + (X - Y) / 2$ , onde  $X$  é sempre maior que  $Y$  e  $Q > PH$   
ou  $Q > q$

Donde Carnot conclui que de qualquer maneira que se considere o choque existirá necessariamente uma perda de quantidade de ação. Finalizando podemos dizer que para que a transmissão de movimento seja máxima devemos evitar os atritos e as situações de choque e que essas perdas são também sempre medidas pelo trabalho que Carnot denomina quantidade de ação.

---

<sup>22</sup> É importante ressaltar que a preocupação com a eficiência das máquinas já está presente em Carnot e será amplamente desenvolvida pelos engenheiros politécnicos Navier, Coriolis e Poncelet. Também deve ser observada a influência do trabalho de Coulomb sobre a força dos homens na argumentação usada por Carnot.



## Capítulo 6: Os “Princípios Fundamentais do Equilíbrio e do Movimento” de Lazare Carnot

“A mecânica racional de Galileu, de Descartes, de Newton não era então diretamente aplicável às máquinas e não é surpreendente que paralelamente fosse mantido um “corpus” de conhecimentos experimentais, mais ou menos formalizado, destinado aos práticos... Será necessário esperar até o fim do século XVIII para que com Lazare Carnot a ciência das máquinas pudesse ser formalmente integrada à mecânica racional”.

(François Vatin – O Trabalho, economia e física, 1780-1830, PUF, Paris, 1993)

A obra principal de Carnot referente às máquinas foi escrita em 262 páginas. Após o prefácio seguem-se duas partes nas quais ela está dividida:

- 1º) Noções preliminares. Hipóteses admitidas como leis gerais do equilíbrio e do movimento. Conseqüências dessas hipóteses.
- 2º) Desenvolvimento de hipóteses estabelecidas precedentemente como leis da natureza. A pressão e suas leis por fórmulas algébricas. Considerações gerais sobre as forças moventes aplicadas às máquinas.

Já tendo sido analisado no capítulo precedente as duas memórias de Carnot denominadas de *Ensaio sobre as Máquinas*, faremos neste capítulo um estudo dos *Princípios*, evitando algumas repetições e pontos comuns já abordados nos dois ensaios anteriores, sem, no entanto, perder de vista que muitas delas são inevitáveis e desejáveis para que se possa ressaltar os desenvolvimentos e aspectos evolutivos de seu trabalho na passagem dos *Ensaio*s para os *Princípios*.

### PREFÁCIO

De início Carnot adverte, que este seu novo livro, trata-se na realidade de um mesmo estudo (contido nos *Ensaio*s) ao qual ele agregou alguns desenvolvimentos para tornar a leitura mais fácil. Com a introdução dessas mudanças, resultou em uma obra de alguma maneira nova, pelo menos na forma, e assim ele resolveu dar-lhe outro nome que ele julga mais adequado.

Carnot também observa que as mudanças de fundo entre os trabalhos anteriores e este, são muito poucas, exceto no que diz respeito ao princípio da mínima ação. É assim que ele se refere a esse problema: *Maupertuis, como se sabe, deu a primeira idéia deste princípio, tanto pelo caso onde o movimento varia por graus insensíveis, como por meio de mudanças bruscas. Mas como ele somente entreviu muito vagamente este princípio, donde tirou as causas finais, não colocou nenhuma diferença entre os dois casos que acabamos de falar. Existe, portanto, um grande interesse em aplicar o princípio da mínima ação a cada um dos dois casos, dando a seu enunciado a clareza necessária e a precisão matemática, sendo, necessário fazer duas proposições que não têm nada em comum, ou antes, ela resulta que existem dois princípios exatos, mas muito diferentes um do outro, ao qual o princípio vago de Maupertuis deu lugar, um aplicável exclusivamente ao caso onde o movimento varia por graus insensíveis, o outro exclusivamente ao caso do choque de corpos e das variações bruscas.*

Ainda segundo Carnot, Euler separou o primeiro caso do segundo, fez do primeiro uma proposição rigorosa e aplicou em particular este princípio ao caso de um corpo submetido à lei de atração. Lagrange através do novo cálculo por ele inventado, o cálculo variacional, provou de forma elegante que a proposição de Euler tem caráter geral para um sistema qualquer de corpos submetidos às leis de atração exercidas como uma função qualquer das distâncias. No que tange ao outro caso, isto é ao choque e movimentos bruscos, ele acredita poder fazer desaparecer os aspectos vagos e confusos e ainda colocá-lo na forma de um belo princípio, válido para um caso qualquer de um sistema de corpos agindo uns sobre os outros através de choques ou mudanças bruscas, como é o caso de uma máquina qualquer. Dessa forma, ele acrescenta: *Nesta nova edição, eu desenvolvi o que já tinha dito a este respeito no primeiro trabalho, e que fiz ver que este princípio tem lugar realmente para os corpos dotados de diversos graus de elasticidade, como também para os corpos duros.*

Carnot de forma muito explícita difere a sua mecânica, ou a mecânica que ele precisa desenvolver para estudar as máquinas, da mecânica das mudanças e transformações contínuas de Euler e Lagrange. Neste sentido, se faz necessário generalizar o princípio de Maupertuis para que ele adquira um caráter geral. Ele também se propõe a realizar esta tarefa em seus *Princípios*.

Existe ainda uma diferença essencial em relação ao método geral de abordagem seguido no primeiro ensaio. Como ele vai tratar dos problemas envolvendo a percussão dos corpos e suas variações bruscas de posição e velocidade, essa teoria agora apresentada não pode estar fundada sobre o princípio das velocidades virtuais. É assim que ele introduz um novo método baseado em um conceito novo de

movimento por ele chamado de *movimentos geométricos*. Segundo suas próprias palavras: *Isto resulta em uma sorte de teoria nova sobre uma classe de movimentos... esses movimentos geométricos são aqueles que podem adquirir as diferentes partes de um sistema de corpos, sem se perturbar nem aos outros e que como consequência não depende da ação e da reação dos corpos, mas somente das condições de suas ligações, podendo ser determinados somente pela geometria e independente das regras da dinâmica.*

Esta é uma segunda característica da teoria mecânica de Carnot, qual seja a de recorrer a geometria, ou melhor, tentar trazer os problemas de dinâmica para o campo da cinemática quando os movimentos são tais que somente dependem das condições de vínculo do sistema.

Existe uma outra novidade nos *Princípios* de Carnot em relação aos *Ensaio*s. Ele faz referência a base experimental na qual a mecânica deve repousar e assinala que a primeira parte assenta em uma base experimental bem estabelecida, isto é, as noções preliminares e os fatos sobre os quais está fundada. A segunda parte começa precisamente no ponto no qual ele considera que a ciência mecânica deixou de ser experimental para tornar-se inteiramente racional, isto é, onde os princípios lhe parecem suficientemente estabelecidos e comprovados pela experiência para não ter mais necessidade senão do raciocínio. Só então a ciência será suscetível da aplicação do cálculo analítico <sup>1</sup>.

Esta visão que Carnot tem da mecânica é interessante, pois se configura numa ruptura com o pensamento dos Cartesianos sobre esta ciência. Para eles a mecânica era uma ciência puramente racional e seus princípios poderiam ser deduzidos somente pelo raciocínio. Carnot inverte a forma e a determinação do conhecimento do mundo físico, pelo menos no que tange a mecânica. Somente a partir de uma segura base experimental é que os métodos analíticos podem ser aplicados. Na realidade é o que fizeram Euler e Lagrange. O primeiro escrevendo a segunda lei de Newton na forma de uma equação diferencial de segunda ordem. O segundo reescrevendo a mecânica de forma extremamente elegante e dando-lhe uma formalização até hoje atual sem, no entanto deduzi-la da segunda lei como fez Euler, mas apoiando-se no princípio da mínima ação.

Carnot encerra seus comentários contidos no prefácio afirmando que de forma análoga aos trabalhos anteriores somente ao final fará as aplicações dos princípios desenvolvidos às máquinas.

---

<sup>1</sup> Novamente se coloca a ligação de Carnot com a mecânica de Newton e sua ruptura, neste aspecto, com a visão que os cartesianos tinham da mecânica como algo puramente racional.

**PRIMEIRA PARTE: Noções preliminares. Hipóteses admitidas como leis gerais do equilíbrio e do movimento. Conseqüências deduzidas dessas hipóteses.**

Apesar de sua herança dalambertiana, conforme vimos no prefácio, Carnot atribui a experiência um papel fundamental no conhecimento do mundo físico. Logo no início desta primeira parte ele volta a enfatizar e agora a aprofundar a discussão sobre este assunto ao citar Locke e seu *Ensaio sobre o Entendimento Humano*, concordando com ele que todas as idéias vêm dos sentidos <sup>2</sup>. Isto é válido, segundo Carnot, para todas as ciências, mesmo as mais abstratas, como é o caso da matemática. Ele fundamenta seu ponto de vista dizendo que *as ciências não são outra coisa senão séries de raciocínios estabelecidos sobre a quantidade*. Contudo, ele reconhece que as ciências retiram de forma diferenciada seus fundamentos da experiência. As matemáticas puras tiram menos que todas as outras; em seguida vêm as ciências físico-matemáticas e em seguida as ciências físicas, etc.

Carnot também discute, e isto é importante, pois indica o critério que ele utiliza para estruturar este estudo, que é identificar o ponto onde cada ciência deixa de ser experimental para tornar-se inteiramente racional. Se este critério fosse usado, seria possível reduzir ao menor número possível as verdades que somos obrigados a tirar da observação e que uma vez estabelecidas seriam suficientes para que combinadas pelo raciocínio somente elas pudessem abraçar todas as ramificações da ciência.

Essas idéias, que combinam o racionalismo de d'Alembert com o empirismo de Locke, inclusive defendendo a precedência da experiência sobre os elementos puramente racionais na formação de nosso quadro conceitual, aproximam Carnot de Newton e dos empiristas ingleses com relação a uma epistemologia da mecânica, muito mais do que da escola racionalista francesa.

Para que possamos ter um melhor entendimento sobre os desenvolvimentos feitos por Carnot ao longo deste trabalho, é necessário que apresentemos suas definições sobre os conceitos básicos da mecânica como: espaço, tempo, matéria, repouso, movimento, etc.

---

<sup>2</sup> Nesta obra de Locke [159], podemos encontrar a discussão desta questão logo no livro II intitulado: "As Idéias", Capítulo I, pg. 165. No subtítulo "Todas as idéias derivam da sensação ou reflexão", podemos ler: "Suponhamos, pois, que a mente é, como dissemos, um papel em branco, desprovida de todos os caracteres, sem quaisquer idéias; como ela será suprida? De onde lhe provém este vasto estoque, que ativa e que a ilimitada fantasia do homem pintou nela com uma variedade quase infinita? De onde apreenda todos os materiais da razão e do conhecimento? A isso respondo, numa palavra, da experiência. Todo o nosso conhecimento está nela fundado, e dela deriva fundamentalmente o próprio conhecimento. Empregada tanto nos objetos sensíveis externos como nas operações internas de nossas mentes, que são por nós mesmos percebidas e refletidas, nossa observação supre nossos entendimentos com todos os materiais do pensamento. Dessas duas fontes de conhecimento jorram todas as nossas idéias, ou as que possivelmente termos".

Se chamarmos:

$m$  = massa;  $e$  = espaço, ou quantidade linear ;  $t$  = tempo ;

toda quantidade da forma, ou redutível a forma  $e/t$  chama-se velocidade ;

toda quantidade da forma  $m e/t$  chama-se quantidade de movimento ;

toda quantidade da forma  $e/t^2$  chama-se força aceleratriz ou retardatriz ;

toda quantidade da forma  $m e/t^2$  chama-se força motriz ;

toda quantidade da forma  $m e/t$  ou  $m e/t^2$  chama-se simplesmente força ou potência ;

toda quantidade da forma  $m e^2 / t^2$  chama-se força viva, ou momento da força motriz ou momento de atividade ;

toda quantidade da forma  $m e^2 / t$  chama-se momento da quantidade de movimento ou quantidade de ação ;

Finalizando este conjunto de definições, Carnot conceitua o equilíbrio como sendo a destruição geral de todos os movimentos. Isto significa que ele considera o equilíbrio como um caso especial do movimento, visualizando sempre o movimento no esquema da decomposição de d'Alembert.

O conceito de trabalho, ainda sem esta denominação, evidentemente, aparece pela primeira vez no *Princípios* na página 36, item 57, na seguinte forma:

*Com efeito, seja  $M$  uma massa,  $P$  seu peso,  $g$  a gravidade,  $dt$  o elemento de tempo e  $H$  a altura a qual  $P$  foi elevada. Seguindo esta nova maneira de visualizar as forças, o que deve ser empregado para elevar  $P$  à altura  $H$ , será  $PH$ ; mas  $H$  sendo um espaço percorrido, pode ser expresso pelo produto de uma velocidade  $V$  e de um tempo  $T$ ; por outro lado, temos  $P = gM = g dt M/dt$ , e  $g dt$  é uma velocidade  $V'$ . Então  $PH = MVV'T/dt$ ; então  $dt$  e  $T$  sendo duas quantidades homogêneas,  $PH$  será o produto de uma massa pelo produto de duas velocidades, ou pelo quadrado da velocidade média proporcional entre  $V$  e  $V'$ ; então a força  $PH$  resulta em um produto de uma massa pelo quadrado de uma velocidade, como  $Mu^2$ , chamando  $u$  a média proporcional entre  $V$  e  $V'$ . Tal é a origem natural da noção de forças vivas. Tem havido grandes discussões sobre a questão de saber se as forças dos corpos em movimento devem ser avaliadas pelo*

*produto da massa pela velocidade, ou pelo produto da massa pelo quadrado da velocidade. Isto se reduz como vimos a uma disputa de palavras*<sup>3</sup>.

No parágrafo 59 podemos ler: *Nós acabamos de ver que a força viva pode se apresentar ou sob a forma  $Mu^2$  de uma massa pelo quadrado de uma velocidade, ou sob a forma  $PH$  de uma força motriz por uma linha. No primeiro caso é a força viva propriamente dita; no segundo, podemos lhe dar a denominação particular de força viva latente*<sup>4</sup>.

Claramente está dito que as duas quantidades são intercambiáveis, uma podendo converter-se na outra e vice-versa. Carnot continua a utilizar e desenvolver essas idéias sobre o trabalho, quase sempre no contexto de sua conversão em força viva, muito embora a denominação mais freqüente para o termo trabalho fosse momento de atividade. Na citação seguinte lemos: *Chamarei de momento de atividade consumido por uma força motriz, ao produto desta força pelo caminho que é descrito pelo ponto onde ela é aplicada, estimado no sentido desta força; isto é, o produto desta força pelo caminho que descreve o ponto onde ela é aplicada e pelo cosseno do ângulo da projeção, ou ângulo compreendido entre a direção desta mesma força, e a direção desta mesma velocidade.*

No sub-item denominado: *Das hipóteses que podem ser admitidas como leis gerais do equilíbrio e do movimento*, Carnot apresenta um conjunto de hipóteses segundo as quais vai acontecer a comunicação do movimento em um sistema de corpos. Segundo ele essas hipóteses são as verdadeiras leis da natureza. Vamos citar integralmente todas essas hipóteses exatamente como se encontram no texto:

*(1ª) Hipótese. Um corpo uma vez colocado em repouso, não deverá sair por ele mesmo e uma vez em movimento não deverá ele mesmo variar sua velocidade nem a direção desta velocidade.*

*(2ª) Hipótese. Se as diferentes partes de um sistema qualquer de corpos em equilíbrio imprimirmos novas forças, de sorte que em seu conjunto elas sejam nulas, o equilíbrio se manterá.*

*(3ª) Hipótese. Sendo que diversas forças tanto ativas como passivas, estejam mutuamente em equilíbrio, cada uma dessas forças é sempre igual e em direção oposta a resultante de todas as outras.*

*(4ª) Hipótese. As quantidades de movimento ou forças motrizes que se destroem em cada instante em um sistema de corpos, podem sempre ser*

---

<sup>3</sup> Carnot se refere à disputa entre Descartes e Leibniz sobre a quantidade que se conserva no universo, se a quantidade de movimento (segundo Descartes) ou a força viva (segundo Leibniz). Se a preocupação central é com o que melhor representa as forças que atuam sobre os corpos em movimento, aparentemente isto parece uma questão semântica, pois ambos podem representá-los.

<sup>4</sup> O trabalho aparece aqui como uma forma de força viva.

*decompostas em outras forças iguais duas a duas e diretamente opostas, seguindo a linha reta que liga os móveis aos quais elas pertencem: estas forças podem ser olhadas como destruídas respectivamente em cada um desses corpos pela ação de outra.*

*(5ª) Hipótese. A ação de dois corpos contíguos que se exercem um sobre o outro por choque, pressão ou tração, não depende de sua velocidade absoluta, mas somente de sua velocidade relativa. No caso de dois corpos que não se comunicam senão por meio de corpos interpostos, se transmite de próximo em próximo de um a outro, por meio de corpos intermediários: de sorte que isto se resolve sempre em uma série de ações que se exercem imediatamente entre dois corpos contíguos.*

*(6ª) Hipótese. As quantidades de movimento ou as forças mortas que se imprimem reciprocamente os corpos por meio de fios ou de barras, são dirigidas no sentido dos fios ou dessas barras, e aquelas que se imprimem por choque ou pressão, são dirigidas seguindo a perpendicular tirada de sua superfície comum no ponto de contato.*

*(7ª) Hipótese. Quando os corpos que se chocam forem perfeitamente duros ou perfeitamente moles, eles se movem sempre com companhia após o choque: isto é seguindo a linha de sua ação recíproca que, seguindo a hipótese precedente, é sempre perpendicular a sua superfície comum no ponto de contato. Quando os corpos são perfeitamente elásticos, eles se separam após o choque com uma velocidade relativa igual aquela que eles têm no sentido oposto imediatamente antes do choque. Quando os corpos não são nem perfeitamente duros, nem perfeitamente elásticos, eles se separam com uma velocidade relativa mais ou menos grande, segundo o grau de elasticidade.*

Carnot comenta uma a uma todas as hipóteses sempre afirmando que elas são fruto da experiência, conforme foi visto no início deste estudo, quando ele discute a maneira como *Os Princípios* foram estruturados.

Se observarmos com atenção as sete hipóteses propostas por Carnot, veremos que elas englobam todos os casos de movimento de sistemas, em especial os de transmissão ou comunicação de movimento propagando-se através de corpos contíguos como também os problemas de choque entre corpos. Evidentemente o objetivo principal de Carnot é o estudo das máquinas.

A primeira hipótese é claramente uma outra forma de apresentar a lei do equilíbrio. Uma vez que um determinado corpo esteja em repouso ou passe a condição de estar em movimento, somente uma ação externa pode modificar ambas as situações.

A segunda hipótese ainda se refere ao equilíbrio, mas agora em relação a um sistema de corpos. Para este caso é introduzido o conceito de resultante, ou seja, a força que substitui o efeito mecânico de todas elas e que no caso do equilíbrio, evidentemente é nula.

A terceira hipótese refere-se a uma composição de forças, também envolvendo o conceito de resultante, sobre a qual é feita uma operação vetorial.

A quarta hipótese aborda o problema do choque entre dois corpos e a decomposição das quantidades de movimento envolvidas, segundo a direção na qual o choque ocorre, utilizando também o princípio da ação e reação que como sabemos surge em corpos diferentes.

A quinta hipótese discute a ação entre dois corpos contíguos, sendo que esta ação pode ser um choque, uma pressão de contato ou uma força de tração através de um elemento flexível. Para o caso do choque o que interessa é o movimento relativo entre os corpos. No caso da comunicação entre corpos, através de um outro interposto entre eles a ação se dá através destes elementos intermediários ou de outros em uma série tal que o movimento é transmitido em cadeia, mas sempre devido a ação de corpos contíguos.

É evidente que aqui existe uma crítica a transmissão de forças a distância como acontece com a atração gravitacional proposta por Newton em seu *Principia*. Para Carnot como também para os Cartesianos em geral para que esta ação se efetue é necessário um agente portador, ou melhor, um meio capaz de transmitir esta força através do espaço.

A sexta hipótese trata das forças mortas ou forças internas em sistemas ideais (sem atrito) interligados por fios, barras ou por contato. Quando o atrito é desprezado, as forças de contato são sempre perpendiculares às superfícies de contato.

A sétima e última hipótese discute o choque entre corpos sejam eles perfeitamente elásticos, inelásticos, ou com características intermediárias entre essas situações extremas e perfeitamente ideais. Na análise do que ocorre antes e depois do choque ele introduz o que conhecemos hoje como coeficiente de restituição que é a razão entre a velocidade relativa de separação e a velocidade relativa de aproximação entre dois corpos. Como sabemos, para o caso de corpos elásticos este coeficiente é igual a um e para o caso do choque plástico igual a zero, no primeiro caso não havendo perda de energia e no segundo havendo a máxima perda com os corpos aderindo um ao outro e movendo-se juntos após o choque.

Tendo Carnot enunciado este conjunto de hipóteses que por assim dizer constroem as bases de sua mecânica, ele vai tratar de testar e aplicá-las numa espécie de verificação das mesmas. Ele utiliza uma metodologia hipotético-dedutiva



ao proceder desta maneira. É o que vai acontecer no item seguinte que ele denomina: *Diversas conseqüências deduzidas das hipóteses precedentes. Aquilo que denominamos força de inércia. Propriedades das forças que concorrem em um mesmo ponto. Das forças paralelas e do centro de gravidade.*

A idéia de Carnot sobre a força de inércia é a tradicional e que tem origem em Galileu e Newton. Ao se referir a um sistema de corpos ele a define da seguinte forma: *Chamamos então de força de inércia de cada um dos corpos em cada instante, a resistência que ele opõe a sua mudança de estado, Isto é, a reação que ele exerce sobre o sistema dos outros corpos que fazem passar do repouso ao movimento; do movimento ao repouso, ou de um movimento a um outro movimento: é, em uma palavra, uma força igual e contrária aquela que é necessário imprimir a este móvel, para fazê-lo passar do estado onde está, aquele onde ele se encontrará no instante seguinte.*

*Donde segue-se, que se decomusermos a velocidade efetiva do móvel antes do choque em duas outras, onde uma é aquela que ele deve adquirir depois do choque; a outra multiplicada pela massa deste móvel, será o que denominamos sua força de inércia no momento do choque.*

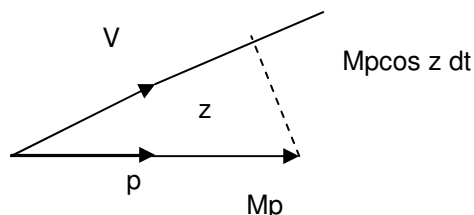
Carnot adverte para que não se confunda a força de inércia com a quantidade de movimento perdido. Ele acrescenta: *A quantidade de movimento perdida é a resultante da quantidade de movimento produzida pela força motriz e a quantidade de movimento produzida pela inércia.*

Carnot também distingue o que é inércia do que é força de inércia: *A inércia não é senão uma propriedade que não pode entrar em um cálculo, mas a força de inércia é uma verdadeira quantidade suscetível de uma apreciação exata. A inércia é simplesmente a propriedade que tem cada corpo de permanecer em seu estado de repouso ou de movimento uniforme e retilíneo; e a força de inércia é a quantidade de movimento que este corpo imprime a todo outro corpo que ele venha a tirar deste estado.*

Em seguida, Carnot se propõe a matematizar alguns resultados já estabelecidos. Chamando  $M$  a massa do corpo,  $M_p$  a força motriz atuando no corpo,  $M_q$  a força de inércia, seus efeitos  $M p dt$  e  $M q dt$  no intervalo de tempo  $dt$ . A quantidade de movimento perdido durante  $dt$  será a resultante das duas forças anteriores.

Se chamarmos de  $V$  a velocidade do corpo, sua variação  $dV$  no intervalo  $dt$ ,  $z$  o ângulo entre a velocidade e a força motriz. Esta força estimada no sentido de

$V$  será  $Mp \cos z$  e a quantidade de movimento impresso no sentido de  $V$ , durante o intervalo  $dt$  será  $Mp dt \cos z$ .



Sendo  $MV$  a quantidade de movimento, sua variação no intervalo  $dt$  será  $MdV$  e então  $-MdV$  será o efeito da força de inércia, estimada no sentido de  $V$ ; a resultante dessas duas forças é  $Mp \cos z dt - MdV$ , no sentido de  $V$  será a quantidade de movimento perdida por  $M$ , no intervalo  $dt$ . Se esta quantidade de movimento perdida for o resultado de uma pressão exercida por  $M$ , esta força em cada instante, segundo a direção de  $V$  será  $Mp \cos z - M \frac{dV}{dt}$ .

Se o corpo adquirir uma nova velocidade, dada por  $u$  e se  $x$  for o ângulo entre esta nova velocidade e a força  $Mp$ ,  $y$  o ângulo entre as duas velocidades  $V$  e  $u$ ,  $Mp \cos x$  será a força motriz no sentido de  $u$ ;  $V \cos y$  será a componente da velocidade  $V$  no sentido de  $u$  e, portanto  $d(V \cos y)$  a variação desta componente no sentido de  $u$ . Então  $-Md(V \cos y)/dt$  será a força de inércia estimada no sentido de  $u$ . A pressão exercida em cada instante agora no novo sentido será  $Mp \cos x - Md(V \cos y)/dt$ .

Carnot estuda agora o equilíbrio de um sistema de corpos para diferentes sistemas de forças aplicadas e inclui neste estudo a posição do centro de gravidade de um sistema. Sem o mencionar enuncia o teorema de Varignon na seguinte forma:

*Em um sistema qualquer de forças em equilíbrio em torno de um ponto dado, a soma dos momentos das forças em relação a um eixo qualquer no espaço, é igual a zero, tomando-se como positivos o momento das forças que tendem a fazê-lo girar num sentido e negativo aqueles que tendem a fazê-lo girar no sentido contrário.*

Para chegar a definir a posição do centro de gravidade de um sistema de corpos, ele estuda o equilíbrio de um sistema de forças paralelas, aplicado a um sistema de corpos.

Antes de encerrar a primeira parte de seu livro, Carnot discute um novo item intitulado: *Novas conseqüências resultantes das hipóteses estabelecidas*

*precedentemente; acordo desses resultados com outros fatos geralmente reconhecidos.*

Neste item Carnot vai tentar exprimir os aspectos da teoria que já estão consolidados, por intermédio de fórmulas algébricas. Entre os princípios e leis que ele qualifica como de fundamental importância para a mecânica estão: o princípio das velocidades virtuais, o princípio da conservação das forças vivas, o princípio da posição do centro de gravidade e o princípio da mínima ação. Carnot demonstra o princípio das velocidades virtuais utilizando argumentos puramente geométricos, primeiramente para o caso de duas forças e depois para um número qualquer de forças. Ele atribui este princípio a Galileu. Sobre a contribuição de Lagrange, ele assim se expressa:

*Lagrange em sua Mecânica Analítica, parte do princípio das velocidades virtuais entre duas forças somente, como de uma verdade fundamental reconhecida, e ele passa a estender, como acabamos de fazer, mas pelo caminho puramente analítico que ele adotou em sua bela obra, este princípio a um sistema qualquer de forças que agem simultaneamente*<sup>5</sup>.

É importante esta observação de Carnot sobre Lagrange, pois como já tínhamos comentado anteriormente, Lagrange atribui ao princípio das velocidades virtuais um grande valor como um dos princípios fundadores da mecânica.

Voltando à Carnot, a partir do princípio das velocidades virtuais, ele vai aplicá-lo, no sentido de mostrar que em uma máquina em equilíbrio a velocidade virtual do centro de gravidade é zero. Com isto ele enuncia o princípio de Torricelli na seguinte forma: *Em toda máquina possuindo pesos e em equilíbrio, o centro de gravidade está no ponto mais baixo possível.*

A forma de traduzir algebricamente o equilíbrio mútuo de diversas massas, de valor  $M$ , sendo  $V$  suas velocidades,  $z$  o ângulo entre as direções da força motriz  $Mp$  e  $V$  é, se observarmos o princípio das velocidades virtuais:

$$\int MpV \cos z = 0$$

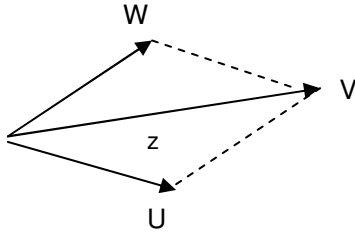
Também algebricamente pode ser traduzido o choque entre corpos duros, desde que se considere, como ele o faz, as seguintes quantidades: seja  $M$  a massa do corpo a ser analisado,  $W$  sua velocidade antes do choque,  $V$  sua velocidade depois do choque,  $U$  a velocidade que se perde no choque e  $z$  o ângulo entre  $V$  e  $U$ . Então, temos:

---

<sup>5</sup> Como vimos, Poinsot [120], faz a crítica do princípio das velocidades virtuais como um princípio fundamental da mecânica.

$$\int MUV \cos z = 0 \quad (\text{Para corpos duros})$$

Considerando ainda a composição vetorial:



$$W^2 = V^2 + U^2 + 2VU \cos z$$

$$MW^2 = \int MV^2 + \int MU^2 + 2 \int MVU \cos z$$

Do resultado anterior a última integral do segundo membro da equação é nula. Teremos assim:

$$\int MW^2 = \int MV^2 + \int MU^2$$

A equação acima significa uma conservação de energia cinética antes e depois do choque. Ele está considerando, como já mencionamos o caso de corpos duros.

Com o resultado acima, Carnot demonstra o chamado princípio de Huygens, que envolve o choque de corpos duros quaisquer com a particularidade dos movimentos serem infinitesimais ou, como ele denomina, *por graus insensíveis*. Carnot também observa, que se  $U$  é infinitamente pequena,  $U^2$  será um infinitésimo de segunda ordem e assim teremos:

$$\int MW^2 = \int MV^2$$

Isto seria o princípio da conservação da energia cinética pura e simplesmente, estabelecendo-se a igualdade dessas quantidades antes e depois do choque. Esta última equação também é válida para os corpos elásticos, ou seja, quando não existe nenhuma perda das forças vivas<sup>6</sup>.

Carnot termina a primeira parte de sua obra com uma citação que é uma espécie de balanço do estudo realizado até aqui:

*Esses resultados de natureza tão diferente em aparência, e, entretanto, todos concordantes com as hipóteses propostas devem nos dar a justeza dessas hipóteses, uma confiança tão intensa que é possível esperar uma ciência que é necessariamente*

<sup>6</sup> A decomposição das velocidades usando o princípio de d'Alembert, transforma a lei dos cossenos num princípio de conservação da mecânica (das forças vivas).

*fundada em parte na experiência. Nós olhamos daqui para frente essas hipóteses, e os raciocínios que as apóiam, como confirmados uns pelos outros, e como podendo servir de base a teoria do equilíbrio e do movimento.*

Podemos concluir da citação acima que o método de Carnot é em tudo semelhante ao de Galileu e Newton. Com base na experiência constrói-se um conjunto de hipóteses que estão sujeitas a confirmação através de novas experiências e somente após percorrer este caminho é que uma formalização via álgebra ou geometria é tentada.

**SEGUNDA PARTE: Desenvolvimento das hipóteses estabelecidas precedentemente como leis da natureza. A impressão dessas leis por fórmulas algébricas. Considerações gerais sobre as forças moventes aplicadas às máquinas.**

O estudo que Carnot se propõe a desenvolver nesta segunda parte está devidamente resumido no parágrafo 135:

*Agora trataremos de traduzir estes princípios em fórmulas algébricas. Demonstrar os resultados de uma maneira rigorosa somente pelo raciocínio, partindo das hipóteses estabelecidas anteriormente e deduzir as conseqüências mais gerais. Começaremos pelo choque dos corpos, seja imediato, seja operado por intermédio de uma máquina. Deduziremos em seguida, como caso particular, as leis do movimento de um sistema de corpos desde que o movimento varie por graus insensíveis. Esta teoria enfeixará todos os princípios fundamentais da comunicação dos movimentos, e por conseqüência, da mecânica.*

É nesta parte de seu trabalho, ou seja, a partir do parágrafo 136, que ele introduz o conceito de movimento geométrico e dedica parte considerável de seu livro a ele. Este conceito que está intimamente associado ao princípio das velocidades virtuais é uma contribuição original de Carnot e, portanto, deve ser acompanhada de perto para uma análise posterior. Ele define o movimento geométrico como:

*Todo movimento, que impresso a um sistema de corpos não varia a intensidade da ação que eles exercem ou poderiam exercer uns sobre os outros se imprimirmos outros movimentos quaisquer, será denominado movimento geométrico.* E continuando ele acrescenta: *A velocidade que adquire então cada móvel será denominada de velocidade geométrica.*

Após definir o que seja movimento geométrico, Carnot ilustra esta definição com uma série de exemplos. O primeiro deles é o caso de dois corpos se aproximando

para o choque, se imprimirmos a eles movimentos comuns tais que não alterem sua velocidade relativa, esses movimentos são movimentos geométricos. O segundo exemplo diz respeito a dois corpos ligados entre si através de um fio ou barra. Se imprimirmos movimentos que não alterem suas velocidades relativas, eles também serão movimentos geométricos. Constam ainda outros exemplos fazendo parte de uma longa lista. Para o caso citado de dois corpos  $A$  e  $B$  presos à extremidade de uma barra aos quais se imprime velocidades nas extremidades proporcionais a seus braços de alavanca e de sentido contrário é um exemplo típico de movimento geométrico. Finalmente o caso de dois corpos  $A$  e  $B$  presos a um fio que por sua vez passa através de uma polia. Se imprimirmos a mesma velocidade  $V$  aos corpos  $A$  e  $B$  e de sentidos contrários, teremos movimentos geométricos.

Carnot observa que esta definição é passível de generalização, pois este conceito se aplica sem distinção a todas as espécies de corpos, duros, moles, elásticos, sólidos e fluídos. A condição fundamental de sua existência é que eles não perturbem uns aos outros, não exercendo sobre eles uma ação qualquer. Esses movimentos são completamente independentes das regras da dinâmica, dependendo única e exclusivamente das condições de vínculo entre as partes do sistema e são determinados somente pela geometria do sistema.

Carnot enuncia em seguida um conjunto de teoremas e alguns corolários sobre as propriedades dos movimentos geométricos com vistas a sua aplicação posterior. Isto constitui a estruturação de uma teoria para os mesmos. Vejamos então os teoremas e corolários mais importantes para que possamos depois analisá-los no contexto do princípio das velocidades virtuais <sup>7</sup>.

**TEOREMA I:** *Quando dois corpos atuam um sobre o outro por choque, pressão ou tração, é sempre ou imediatamente, em virtude de sua contigüidade, ou por uma série de outros corpos contíguos interpostos entre os primeiros, e que transmitem a ação de próximo em próximo por uma série de ações imediatas entre esses corpos intermediários contíguos.*

Evidentemente, este teorema é uma crítica a ação a distancia como é proposta por Newton a ação gravitacional. A contigüidade é que garante a transmissão da ação.

---

<sup>7</sup> Na realidade o que Carnot está tentando é uma generalização do princípio das velocidades virtuais para o caso do sistema em movimento, embora restrito ao que ele chama de movimento geométrico.

**TEOREMA II:** *Desde que um sistema de corpos adquira um movimento geométrico qualquer, e que este sistema seja perfeitamente livre ou perturbado por obstáculos, é sempre possível de exercer sobre ele um outro conjugadamente geométrico, absolutamente igual ao primeiro, e no sentido diametralmente oposto.*

Este teorema garante a reversibilidade dos movimentos geométricos.

**TEOREMA III:** *Se dois movimentos geométricos são impressos a um mesmo sistema de corpos e se este sistema for perfeitamente livre ou perturbado por obstáculos, o movimento resultante dos dois será igualmente um movimento geométrico.*

**TEOREMA IV:** *Em um sistema qualquer de corpos duros, se ele sofre um choque ou uma ação instantânea qualquer, seja imediata, seja por meio de uma máquina qualquer sem mola, o movimento que ele adquirirá depois do choque, será necessariamente um movimento geométrico.*

**TEOREMA V:** *Todo movimento geométrico impresso a um sistema qualquer de corpos, é recebido por este mesmo sistema sem nenhuma alteração.*

**TEOREMA VI:** *Em um sistema de corpos duros agindo uns sobre os outros, seja imediatamente, seja por intermédio de uma máquina qualquer sem mola, se ao movimento ou ao choque que vai ocorrer, decomposermos o movimento geral em dois outros, onde um é aquele que deve ter lugar depois do choque, o outro será necessariamente aquele que deve ser destruído, e esses dois movimentos compostos são tais, que se o primeiro for somente ele, o mesmo não sofrerá alteração e que se o segundo for somente ele, existirá o equilíbrio no sistema geral.*

Embora a primeira vista possa parecer complicado o entendimento desse teorema, ele expressa precisamente o princípio de d'Alembert tal qual o mesmo foi enunciado originalmente. Este princípio vem sendo modificado ao longo do tempo até associar ao mesmo o princípio dos trabalhos virtuais e, posteriormente, a segunda lei de Newton descrita em um sistema de coordenadas móveis a ponto de ao somatório das forças atuando sobre uma partícula adicionarmos o produto da massa pela

aceleração com o sinal trocado e obtermos uma equação de equilíbrio. Isto, no entanto, está bem distante do enunciado original feito por d'Alembert em 1743 <sup>8</sup>.

**TEOREMA VII:** *Em um sistema de corpos duros agindo uns sobre os outros, seja imediatamente, seja por intermédio de uma máquina qualquer sem mola, se no momento no qual o choque vai ocorrer, decomusermos o movimento geral em dois outros, onde um seja aquele que deve ser destruído pelo choque, e que no lugar do segundo nós substituirmos por um outro movimento qualquer geométrico, este movimento será aquele que deverá realmente então ter lugar depois do choque.*

**TEOREMA VIII:** *A mínima força suficiente para romper o equilíbrio de um sistema de corpos, qualquer que ele seja e qualquer que seja o movimento que ele esteja animado, requer que esta força seja empregada para produzir um movimento geométrico; mas para produzir um mesmo infinitamente pequeno que não seja geométrico é necessário obrigatoriamente uma força finita.*

**DEFINIÇÃO:** *Quando existir um equilíbrio em um sistema de corpos seja imediatamente, seja por intermédio de uma máquina qualquer sem mola, e que venhamos a perturbar este equilíbrio pela ação de uma força infinitamente pequena, a velocidade que adquirir então cada um dos corpos do sistema denomina-se sua velocidade virtual e o movimento geral do sistema denomina-se seu movimento virtual.*

**TEOREMA IX:** *Todo movimento virtual em um sistema qualquer de corpos é necessariamente geométrico.*

Este conjunto de nove teoremas, alguns corolários que omitimos e uma definição estabelecem a identidade entre os movimentos geométricos e o princípio dos trabalhos virtuais. Isto amplia sobremaneira a importância do conceito de trabalho dentro da mecânica de Carnot. Para ele a teoria dos movimentos geométricos era uma ciência ainda a ser desenvolvida e que ocupava uma posição intermediária entre a geometria pura e simples e o estudo da comunicação dos movimentos que era a mecânica das máquinas.

---

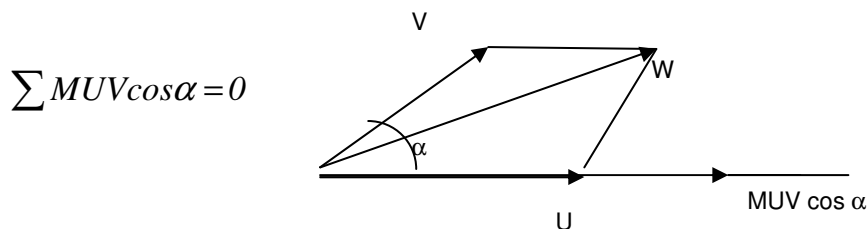
<sup>8</sup> Ver [116].



Como a estrutura do livro de Carnot na sua maior parte, está constituída por teoremas, corolários e definições, tentando ele construir uma ciência fundada na experiência, mas organizada em proposições gerais a ponto de serem matematizadas através da geometria, teremos a seguir alguns teoremas voltados para o choque entre corpos visando a mecânica das máquinas.

**TEOREMA X:** *No choque de dois corpos duros, consideremos que ambos sejam móveis, ou que exista um eixo fixo; a soma dos produtos da quantidade de movimento perdida por cada um deles multiplicada por sua velocidade depois do choque, estimada no sentido desta quantidade de movimento é igual a zero.*<sup>9</sup>

**TEOREMA XI:** *No choque de corpos duros, em qualquer número que eles sejam no sistema, e consideremos que todos sejam móveis ou que haja alguns fixos, a soma dos produtos da quantidade de movimento perdida por cada um desses corpos, multiplicada por sua velocidade depois do choque, estimada no sentido desta quantidade de movimento perdida, é igual a zero.*



<sup>9</sup> É possível encontrar os princípios de conservação enunciados por Carnot usando a definição de movimento geométrico, ao fazermos:  $m_i$  = massa da partícula;  $u_i$  = movimento geométrico.

$$\Delta \vec{v}_i = \vec{v}_i' - \vec{v}_i = \text{velocidade perdida} = \vec{U}_i'; \quad \sum_{i=1}^n m_i \vec{u}_i \cdot \vec{U}_i = 0$$

a) Considerando que o sistema tenha uma translação, i.e.,  $\vec{u}_i = \vec{u}$

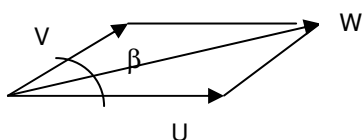
$$\text{então } u \left( \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i' - \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i \right) = 0 \quad (\text{conservação da quantidade de movimento})$$

b) Considerando uma rotação constante, i.e.,  $\vec{u}_i = \vec{\omega} \times \vec{r}_i$ , então:

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{\omega} \times \vec{r}_i \cdot \vec{U}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{\omega} \cdot \vec{r}_i \times \vec{U}_i = \vec{\omega} \times \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i \times \vec{U}_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times (m_i \cdot \vec{v}_i) = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times (m_i \vec{v}_i) \quad (\text{conservação do momento angular})$$

**TEOREMA XII:** No choque de corpos duros, qualquer que seja seu número, e consideremos que o choque seja imediato, ou que ele se faça por meio de uma máquina qualquer sem mola, a soma das forças vivas antes do choque, é sempre igual a soma das forças vivas depois do choque, mais a soma das forças vivas que teriam lugar, se cada um dos corpos se movesse livremente somente com a velocidade que ele perdeu no choque.



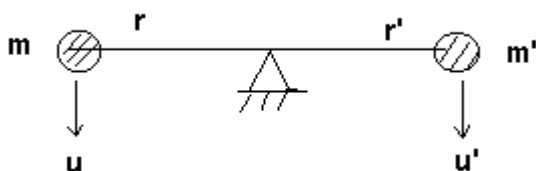
$$\sum MW^2 = \sum MV^2 + \sum MU^2$$

pois  $2\sum MVU \cos \beta = 0$

**COROLÁRIO I:** Desde que vários corpos animados de forças quaisquer estejam mutuamente em equilíbrio, seja imediatamente, seja por meio de uma máquina qualquer sem mola; a soma dos produtos de cada massa pelo quadrado da velocidade com a qual ele tende a se mover, é um mínimo, isto é, mínimo que não será a soma dos produtos de cada massa pelo quadrado da velocidade que ela perderia, se o sistema adquirisse um movimento qualquer geométrico.

$$mg^2 + m'g'^2 = m(g-u)^2 + m'(g+u')^2$$

$$mu^2 + m'u'^2 = 2mgu + 2m'gu'$$



Como  $u$  e  $u'$  são muito pequenas

$$mgu - m'gu' = 0 \quad \frac{mg}{m'g} = \frac{u'}{u}$$

Donde se deduz o princípio das velocidades virtuais.

**COROLÁRIO II:** Se o sistema varia seu movimento por graus insensíveis, a quantidade de movimento perdida a cada instante pelo corpo será infinitamente pequena.

$$U \cong 0; U' = 0; \int MW^2 = \int MV^2$$

Donde se conclui que um sistema de corpos duros com variações insensíveis de seu movimento conserva sempre a soma das forças vivas.

**TEOREMA XIII:** *No choque de corpos perfeitamente elásticos, qualquer que seja o número, a soma das forças vivas antes do choque, é sempre igual a soma das forças vivas depois do choque.*

Por definição não existem perdas no choque de corpos perfeitamente elásticos. Usando a equação já estabelecida:

$$\sum MW^2 = \sum MV^2 + \sum MU^2 ; \text{ sendo } U = 0$$

$$\sum MW^2 = \sum MV^2$$

**COROLÁRIO IV:** *Se os corpos não são perfeitamente elásticos, mas todos dotados de um certo grau de elasticidade representado por  $n$ , isto é, tal que a ação recíproca dos corpos ao invés de ser dobrada, como acontece no caso dos corpos perfeitamente elásticos, for somente esta mesma força multiplicada por  $n$ : é claro que a direção de cada uma das velocidades perdidas seria ainda a mesma, assim como o ângulo entre  $W$  e  $U'''$ .*

Para o caso dos corpos duros, teremos:

$$\int MUW \cos(\widehat{W U}) - \int MU^2 = 0 \quad ( I )$$

Supondo que com um grau de elasticidade expresso por  $n$ , a velocidade perdida seja  $U'$  e a velocidade restante  $V'$ , e teremos:

$$U' = nU ; U = 1/nU'$$

Multiplicando (I) por  $n$ , temos:

$$n \int MU'W \cos(\widehat{W U'}) - \int MU'^2 = 0$$

$$W \cos(\widehat{W U'}) = V' \cos(\widehat{V U'}) + U'$$

$$\int MV' U' \cos(\hat{V} U') + \left(\frac{n-1}{n}\right) \int MU'^2 = 0$$

Por outro lado temos:

$$W^2 = V'^2 + U'^2 + 2V' U' \cos(\hat{V} U'), \text{ e assim:}$$

$$1/2 \int MW^2 = 1/2 \int MV'^2 + 1/2 \int MU'^2 + \int MV' U' \cos(\hat{V} U')$$

$$\text{ou } \int MW^2 = \int MV'^2 - (n-2)/n \int MU'^2$$

Para o caso da elasticidade perfeita,  $n = 2$

$$\int MW^2 = \int MV'^2$$

Para o caso de corpos duros,  $n = 1$

$$\int MW^2 = \int MW'^2 + \int MU'^2$$

É possível então colocar em uma formula geral, a equação do balanço das forças vivas para qualquer grau de elasticidade dos corpos envolvendo o choque.

**TEOREMA XIV:** *Em um sistema qualquer de corpos duros em contato imediato uns com os outros, ou pertencendo a uma máquina qualquer sem mola, se ocorre um choque, e se no momento em que o choque ocorre, decompuermos o movimento com o qual o sistema tende a se mover em dois, onde um é aquele que deve ser destruído, o outro é tal, que se o supirmos sozinho, e o substituímos por um outro movimento qualquer geométrico, a soma dos produtos da quantidade de movimento perdido por cada um dos corpos do sistema multiplicado pela velocidade geométrica, estimada no sentido desta quantidade de movimento, será igual a zero.*

**TEOREMA XV:** *Entre todos os movimentos que sejam possíveis, um sistema de corpos perfeitamente duros agindo uns sobre os outros por um choque imediato, ou por meio de máquinas quaisquer sem mola, de maneira que resulte uma variação brusca no estado do sistema: todos os movimentos que terão lugar realmente depois da ação serão movimentos geométricos, tal que a soma dos produtos de cada uma das massas pelo quadrado da velocidade que ele perderá, é um mínimo.*

Seja:

$M$  = massa de cada um dos corpos do sistema

$W$  = sua velocidade antes do choque

$V$  = sua velocidade depois do choque

$U$  = sua velocidade perdida no choque

$u$  = sua velocidade geométrica qualquer

É necessário provar que  $\int MU^2$  é um mínimo desde que  $M$  adquira a velocidade  $V$  depois do choque. Isto equivale a fazer  $\delta \int MU^2 = 0$  desde que no lugar de  $V$  substituamos a velocidade geométrica  $u$  que difere daquela por uma variação infinitesimal. Carnot apresenta uma prova geométrica da proposição acima, usando uma série de decomposições e diagramas de velocidades convenientes. Ele ainda mostra uma forma alternativa do problema de minimização, introduzindo o parâmetro tempo. Se supusermos um dado tempo  $t$ , cada corpo  $M$  percorreu o espaço  $X$  com a velocidade  $U$  e assim teremos  $U = X/t$ . A fórmula anterior pode ser escrita na forma seguinte desde que dividamos por  $t$  que é o mesmo para todos os corpos.

$$\delta \int MUX = 0$$

Na longa citação a seguir, Carnot analisa sua contribuição à extensão do princípio da mínima ação para o caso dos movimentos bruscos. Devido a importância que este fato tem transcreveremos na íntegra o texto de sua obra. Ele afirma: *Maupertuis chama, em seu Ensaio de Cosmologia, quantidade de ação ao produto de uma massa por sua velocidade e pelo caminho que ele percorre. Assim, MUX é uma quantidade de ação, e ele avança em princípio, que a quantidade de ação necessária para produzir uma variação no movimento do corpo, é sempre um mínimo. Este*

*princípio deve ser considerado como o enunciado da equação precedente que é sua tradução algébrica. Maupertuis funda este princípio sobre as causas finais; mas como as causas finais se interpretam arbitrariamente, podemos de fato dizer tudo que quisermos, que não tiraremos nenhuma consequência precisa, se não a apoiarmos em demonstrações matemáticas. Maupertuis provou que, com efeito, seu princípio tem lugar no choque direto de dois corpos livres perfeitamente duros, e no caso de dois corpos perfeitamente elásticos; além disso não foi dito nada, e seu princípio, mesmo muito belo, não foi aprofundado por ele, nem por outros geômetras, no que se refere as variações bruscas: pelo menos não acho que alguém tenha demonstrado de forma geral antes da primeira edição desta obra, onde eu estabeleci o princípio equivalente dado acima; mas somente para os corpos duros.*

*A demonstração que acabo de fazer aqui é mais geral, pois que ela envolve os corpos dotados de diversos graus de elasticidade; mas ele prova ao mesmo tempo quanto são caducas as demonstrações baseadas em causas finais, pois que ele faz ver que o princípio não é tão geral; mas restrito ao caso onde todos os corpos do sistema são dotados do mesmo grau de elasticidade. De resto, o teorema tal que eu apresentei, me parece mais simples e mais fácil de empregar que aquele da mínima ação onde se introduz inutilmente o espaço percorrido. Mas não é menos verdade, que após a explicação que vem de ser feita, não resta mais nada vago no princípio de Maupertuis, e que ela é rigorosa e matematicamente demonstrada.*

Em seguida Carnot enuncia três blocos de proposições, na realidade princípios de conservação das quantidades de movimento linear, angular e de percussão para corpos quaisquer em movimento.

**TEOREMA XVII:** *Em um sistema de corpos perfeitamente livre, sejam esses corpos duros, moles ou elásticos, se ocorre um choque:*

- 1) A soma das quantidades de movimento perdidas por todos os corpos do sistema, estimada em um sentido qualquer após o choque, é igual a zero.*
- 2) A soma das quantidades de movimento perdidas por uma porção qualquer dos corpos do sistema em um sentido dado é igual a soma das quantidades de movimento ganho, no mesmo tempo e no mesmo sentido, por todos os outros corpos do sistema.*

- 3) *A soma das quantidades de movimento perdidas por uma porção qualquer dos corpos do sistema em um sentido dado é igual a soma das quantidades de movimento ganho, no mesmo tempo e no mesmo sentido, por todos os outros corpos do sistema.*
- 4) *A quantidade total de movimento do sistema, estimado em um sentido qualquer, permanece a mesma que antes do choque.*

**TEOREMA XVIII:** *Em um sistema de corpos perfeitamente livre, sejam esses corpos de natureza qualquer, se ocorrer um choque:*

- 1) *A soma dos momentos de rotação das quantidades de movimento perdidas por todos os corpos do sistema, em relação a um eixo qualquer no espaço, e tendentes a girar em um mesmo sentido deste eixo é igual a zero.*
- 2) *A soma dos momentos de rotação das quantidades de movimento perdidas por uma porção qualquer dos corpos do sistema em um sentido dado em torno deste eixo, é igual a soma dos momentos das quantidades de movimento ganhos no mesmo tempo e no mesmo sentido em torno deste eixo, por todos os outros corpos do sistema.*
- 3) *A soma dos momentos de rotação das quantidades de movimento efetivas depois do choque em um sentido dado em torno de um eixo, permanece o mesmo que antes do choque.*

**TEOREMA XIX:** *No choque de corpos, quer esses corpos sejam duros ou não, e que a ação seja imediata ou que ela se faça por meio de uma máquina qualquer sem mola ou com mola:*

- 1) *A soma dos momentos de percussão de todos os corpos do sistema com relação a um movimento qualquer geométrico, é igual a zero.*
- 2) *A soma dos momentos de atividade de todos os corpos do sistema antes do choque, em relação a um movimento qualquer geométrico, é igual a soma dos*

*momentos de atividade depois do choque com relação ao mesmo movimento geométrico.*

A questão do trabalho volta novamente ao texto de Carnot na forma do teorema de trabalho e energia cinética em suas considerações sobre o movimento variando por graus insensíveis.

**TEOREMA XX:** *Quando um sistema de corpos duros, livre ou vinculado a uma máquina qualquer sem mola é animado de forças motrizes quaisquer, variando o movimento por graus insensíveis, se por um instante qualquer do movimento, chamarmos  $m$  cada uma das massas dos corpúsculos do sistema,  $V$  sua velocidade,  $P$  sua força motriz,  $u$  a velocidade que ele adquire se suprimirmos o movimento efetivo, substituindo-o por outro movimento qualquer geométrico;  $dt$  sendo o intervalo de tempo, teremos as seguintes equações:*

$$\sum mVdV - \sum mVPdt \cos(\widehat{V P}) = 0 \quad (II)$$

$$\sum mud[V \cos(\widehat{u V})] - \sum muPdt \cos(\widehat{u P}) = 0 \quad (III)$$

*As equações acima relacionam trabalho com energia cinética, ou, o que é o mesmo, força viva. Na equação (II) o deslocamento virtual é no sentido da trajetória. A equação (III) prescreve o trabalho relacionado ao deslocamento  $u$  do movimento geométrico. Deve ser observado que Carnot utiliza agora o símbolo  $\sum$  para designar uma soma. Em outras partes do trabalho, como vimos a soma  $\sum$  pode ser uma integral ou um somatório.*

Dentro de um conjunto de teoremas onde Carnot trata especificamente das relações entre trabalho e energia, ainda denominando o trabalho como momento de atividade, e a energia cinética como força viva, selecionamos os dois que se seguem onde ele enuncia o princípio da conservação das forças vivas e o princípio das velocidades virtuais, respectivamente.

**TEOREMA XXII:** *Quando um sistema de corpos duros, livre ou vinculado a uma máquina qualquer sem mola, e animado de forças motrizes quaisquer, variando o movimento por graus insensíveis, a força viva no início de um tempo dado é igual a*



*força viva inicial, mais a força viva que teria lugar, se cada um dos corpos do sistema tivessem somente esta velocidade que ele teria adquirido percorrendo livremente a curva que ele descreveu; supondo por outro lado que ele não tenha sido animado a cada ponto desta curva, senão pela mesma força motriz que ele é sujeito realmente, e que sua velocidade inicial tenha sido nula.*

O enunciado acima pode ser traduzido pela equação (II). Carnot aplica esta equação a vários casos particulares, inclusive considerando o trabalho e a energia cinética do centro de gravidade da máquina.

**TEOREMA XXIV:** *Se várias forças aplicadas a um sistema ou a uma máquina qualquer se fizerem mutuamente em equilíbrio, e se este equilíbrio vier a ser perturbado pela ação de uma nova força infinitamente pequena, a soma dos produtos de cada uma das forças por sua velocidade virtual estimada no sentido desta força, isto é, pela velocidade infinitamente pequena do ponto onde ela é aplicada, estimada no sentido desta força, será igual a zero.*

## **CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DAS FORÇAS MOVENTES ÀS MÁQUINAS**

A partir da página 227, parágrafo 252, Carnot passa a discutir as questões que mais diretamente envolvem as máquinas. Trata-se da parte final de seus *Princípios*, do qual preservamos o mesmo subtítulo e no qual ele aborda em profundidade os principais problemas colocados pela utilização das máquinas, desde o estudo de seu equilíbrio, a análise de seu movimento e o meio de aumentar sua eficiência. Evidentemente são problemas que estão na ordem do dia da engenharia de então e a partir da publicação dos *Princípios* os engenheiros politécnicos das primeiras décadas do século XIX farão vários desenvolvimentos tendo como base a obra pioneira de Carnot. Como será visto no capítulo seguinte, o conceito de trabalho ocupará uma posição central em todas as investigações realizadas, da mesma forma que também ocupa nos *Princípios*.

Carnot começa definindo uma máquina como o corpo ou corpos que se interpõem entre duas ou mais potências (forças), com um determinado objetivo a ser alcançado. Ele comenta que em geral esses corpos são considerados sem massa devido a seu pequeno efeito dentro do sistema de forças aplicado, independente de se

essas forças são motrizes ou de inércia. Ele observa que ao fazer essa abstração o problema de encontrar uma relação entre elas se simplifica.

Nesta parte inicial, Carnot também discute o fato de uma máquina poder ser representada por uma montagem conveniente de uma grande quantidade de corpúsculos separados por fios ou barras, através dos quais a ação e o movimento se transmitem entre suas partes de um elemento para o seu vizinho e assim por diante.

Carnot tem plena consciência de fazer uma investigação com a finalidade de estudar as máquinas em geral ao afirmar que sua intenção não é *pesquisar as propriedades particulares a cada uma delas, o que eu já tinha observado, o objeto dos tratados seguidos pela mecânica, mas oferecer algumas considerações sobre elas, de suas propriedades que são comuns a todas as máquinas*<sup>10</sup>.

Em seguida ele aborda o problema do equilíbrio e do movimento de uma máquina, ressaltando a diferença entre os dois tipos de efeitos que podem ser causados pelas forças aplicadas à ela. No caso do equilíbrio somente consideramos a intensidade das forças enquanto que na análise do movimento é necessário que se leve em conta a velocidade do ponto de aplicação de cada uma das forças além do caminho percorrido também por cada uma delas. Em outras palavras, o método proposto por Carnot para uma dinâmica das máquinas está baseado no trabalho das forças.

A distinção entre os dois tipos de efeitos é feita através de um exemplo que consiste no equilíbrio ou movimento de um peso suspenso por uma talha. Para o equilíbrio trata-se de sustentar o peso enquanto que na situação dinâmica o problema é caracterizado pela elevação do peso a uma certa altura, sendo o primeiro um caso particular do segundo, desde que o equilíbrio não é outra coisa senão o movimento quando a velocidade se reduz a zero. Isto também caracteriza um limite que foi atingido.

Pensando em termos de velocidades virtuais, as duas forças que atuam no equilíbrio, estão sempre em razão recíproca de suas velocidades virtuais respectivas, estimadas no sentido das forças e pode ser imaginado como o equilíbrio de uma alavanca. Para o caso do movimento estamos lidando com velocidades reais e não virtuais como no equilíbrio.

A propriedade que vem do equilíbrio de uma alavanca faz com que uma pequena força possa manter o equilíbrio de um peso considerável e que difere do caso de elevar um peso a uma dada altura, fazendo com que a força desça de um certo número de metros se ela for muito pequena em relação ao peso.

---

<sup>10</sup> Antes de Carnot as máquinas eram estudadas caso a caso como uma sucessão de casos particulares. Carnot tem como objetivo explícito uma teoria geral das máquinas.

Para o caso do movimento, não somente o peso em si deve ser considerado, mas ainda a altura a qual ele vai ser elevado, tornando as duas operações com a máquina muito diferentes. No caso do equilíbrio a máquina pode centuplicar o efeito da força enquanto que no caso da máquina em movimento estamos diante de uma quantidade invariável que é sempre igual ao produto da força pelo caminho que ela percorre, estimado no sentido da força. Visto de outra forma, Carnot discute exatamente a questão da energia no âmbito da mecânica, traduzida pelo trabalho mecânico. Para eliminar qualquer dúvida ele exemplifica dizendo que no caso de um cavalo ser duas vezes mais forte que um outro, significa que ele eleva uma nova quantidade de água, por exemplo, ao dobro da altura elevada pelo primeiro no mesmo tempo, ou uma quantidade dupla de água a uma mesma altura, também no mesmo tempo. É importante ressaltar que a definição de potência mecânica está aqui colocada de forma simples e no próximo capítulo voltaremos a este problema ao estudarmos Coriolis.

Uma outra questão extremamente importante por ele colocada e que é uma breve incursão no terreno da economia, é que a capacidade de elevar um peso a uma certa altura fornece a forma de avaliar o trabalho dos operários e a maneira utilizada para pagar os seus salários. Essa questão será retomada no próximo capítulo. O que Carnot supõe é que o conceito de trabalho da física também serve para calcular o valor do salário o que já foi discutido na *Introdução* e a ela mais uma vez retornaremos. De qualquer forma, fica registrada a preocupação de Carnot com as questões econômicas que se relacionavam diretamente com a mecânica <sup>11</sup>

É no contexto da discussão acima que ele enuncia o famoso princípio: *Em toda máquina em movimento, perde-se sempre em tempo ou em velocidade o que ganhamos em força*. Carnot passa a analisar o real significado desse princípio discutindo o efeito produzido por uma máquina em movimento. Chamando de  $P$  o peso a ser elevado a uma altura  $H$ , este efeito será representado por  $PH$ . Supondo que a força empregada para produzi-lo seja  $F$ ,  $V$  a velocidade estimada no sentido da força,  $T$  o tempo durante o qual se executa a operação e supondo ainda por uma questão de simplicidade que o movimento seja uniforme, teremos  $FVT = PH$ . Como sabemos, Carnot chama o trabalho da força, que é igual a  $FVT$ , de momento de atividade.

---

<sup>11</sup> O estudo das máquinas, mesmo aquele que é feito por Carnot com o objetivo de conhecer seus movimentos e relacioná-los com as forças, isto é, uma abordagem física do problema, dificilmente pode ser dissociado de sua finalidade precípua, a substituição do trabalho humano. Em outras palavras, uma problemática econômica está automaticamente subjacente.

Ainda no campo das definições, ele caracteriza  $F$  como uma força solicitante e  $P$  como uma força resistente. O que ele chama de força de inércia é  $\int mdV'/dt$ , onde  $m$  representa a massa de cada um dos corpúsculos dos quais a máquina é constituída. Como o movimento é uniforme,  $dV' = 0$ . Teremos então que os *momentos de atividade* (termo utilizado por Carnot para o trabalho) dessas duas forças  $F$  e  $P$ , devem ser iguais.

Como vimos,  $FVT = PH$ . Se tivermos outra força  $f$  com velocidade  $u$ , atuando durante um tempo  $t$ , teremos  $fut = PH$  ou  $fut = FVT$ . O efeito  $PH$  é independente do tipo de máquina e não pode jamais ultrapassar a capacidade da máquina.

Carnot volta a discussão daquilo que mais caracteriza a utilização de uma máquina ao afirmar: *A vantagem que apresentam as máquinas, não é de produzir grandes efeitos com pequenos meios, mas de possibilitar a escolha entre diferentes meios que podemos chamar iguais, aquele que melhor convém às circunstâncias presentes.* Isto significa que uma máquina não é um mero instrumento de multiplicação de forças, mas, principalmente, de um aparato que dispõe de uma determinada quantidade de trabalho que pode ser utilizado de formas as mais variadas possíveis. Ele completa essa discussão dizendo ser sempre necessário que o momento de atividade consumido pelas forças solicitantes seja igual ao efeito do movimento absorvido no mesmo tempo pelas forças resistentes. Essas reflexões parecem suficientes para encerrar de uma vez por todas a crença de que as máquinas possuindo arranjos de alavancas *misteriosamente* acopladas podem tornar um agente fraco capaz de produzir grandes efeitos, transpondo o raciocínio empregado no caso do repouso para o caso do movimento. Isto quer dizer que uma máquina em movimento está sempre limitada e não pode jamais ultrapassar o momento de atividade consumido pelo agente que o produz. A diferença está no fato que no caso do equilíbrio, trata-se de destruir, de impedir o movimento; no movimento o objetivo é fazê-lo nascer e de mantê-lo e isto exige uma consideração a mais que é saber a velocidade real de cada ponto do sistema <sup>12</sup>.

Carnot descreve em maiores detalhes, para as situações de equilíbrio e de movimento os processos internos a uma máquina relativos a dissipação do movimento pelos obstáculos que ela vai encontrando. Para o caso dinâmico, os pontos fixos e os obstáculos, quaisquer que eles sejam, são forças puramente passivas, que podem

---

<sup>12</sup> Esta discussão está no cerne da questão da conservação da energia e pode ser utilizada nas formas mais variadas possíveis, mas limitada a uma certa quantidade que estabelece um limite para sua capacidade de realizar um certo trabalho.

absorver um movimento, tão grande quanto ele seja, mas que não podem jamais fazer nascer um, por menor que seja, em um corpo em repouso. Além disso, não é por uma pequena potência que uma grande é destruída, mas pela resistência oferecida pelos pontos fixos. Uma pequena potência não destrói realmente senão uma pequena parte da grande e os obstáculos fazem o resto.

Carnot recoloca o problema da transformação do trabalho em movimento considerando todos os parâmetros dos quais o trabalho é constituído. Deste ponto de vista trata-se de fazer variar a vontade os termos da quantidade  $FVT$ , que compõem o momento de atividade, que como será visto no próximo capítulo será denominado de *trabalho* por Coriolis. Assim, se o tempo é o parâmetro mais importante e devemos minimizá-lo, o efeito deve ser produzido em um tempo muito curto. É possível generalizar esses raciocínios para o caso de um sistema de forças, como por exemplo: se tivermos as forças  $F, F', F''$  com velocidades  $V, V', V''$ , atuando durante tempos  $T, T', T''$ , respectivamente, então teremos:

$$FVT = F'V'T' = F''V''T'' = PH$$

Se o movimento de cada uma das forças for variável, tomaremos a quantidade:  $\int (FVdt + F'V'dt' + F''V''dt'')$ , ou se tivermos as direções das forças com relação às velocidades, tomaremos:

$$\int [FVdt \cos(\hat{F} \hat{V}) + F'V'dt' \cos(\hat{F}' \hat{V}') + F''V''dt'' \cos(\hat{F}'' \hat{V}'')] ]$$

que é a própria definição de trabalho de todas as forças.

A quantidade  $PH$ , o efeito a ser produzido pela máquina, é por ele chamado de força viva latente. Chamando  $M$  a massa do peso  $P$ , e  $V$  a velocidade devido a altura  $H$ , teremos:

$$PH = 1/2MV^2$$

Esta relação é sempre válida por mais variado que seja o efeito. Ao apresentar a equação acima, Carnot cita Leibniz, como sendo o autor da mesma e acrescenta que somente após Leibniz é que a força dos corpos em movimento passa a ser calculada de forma diferente da situação de repouso.

Com a citação seguinte, Carnot antecipa a importância da relação trabalho-forças vivas, e que como veremos no próximo capítulo será o assunto preferencial dos engenheiros politécnicos das primeiras décadas do século XIX: *Mas quaisquer que sejam as denominações que tenhamos adotado, a consideração do que chamamos de forças vivas será sempre muito importante na teoria das máquinas em movimento, pois são elas que devem servir para apreciar o trabalho dos homens, dos animais, e de outros agentes que podemos comparar.*

Em seguida as preocupações de Carnot se voltam para o problema da eficiência das máquinas. Esta é uma questão central não só para a mecânica de então, pois ao envolver preocupações de natureza econômica está na base do desenvolvimento da mecânica aplicada ou, posteriormente, de uma mecânica industrial. Ele lembra que nas considerações feitas anteriormente a respeito do movimento das máquinas, todos eles se faziam sem nenhum choque nem variações bruscas entre os componentes da máquina. Isto significa variações por graus insensíveis, pois de outra forma teríamos uma perda maior das forças vivas. É o que depreendemos quando ele afirma: *Para se obter das máquinas o maior efeito possível, é muito importante que elas sejam construídas de maneira que o movimento não varie senão por graus insensíveis. Devemos somente excetuar aqueles que por sua natureza mesma são passíveis de suportar diferentes percussões, como são a maior parte dos moinhos. Mas mesmo nesse caso, é evidente que deve ser evitada toda variação brusca que não seja essencial à constituição da máquina.*

Carnot conclui a discussão de como se obter o maior efeito possível em uma máquina hidráulica movida por uma corrente de água, negando que seja adaptar uma roda d'água, à máquina, pois suas pás receberiam uma grande quantidade de choque proveniente do fluido. Duas razões principais impedem que o máximo efeito aconteça: a própria percussão do fluido e quando esse choque ocorrer, deve sempre existir uma velocidade residual reservada a pura perda, e que em alguns casos pode ser empregada para produzir ainda um novo efeito que se somará ao primeiro. Para se projetar uma máquina hidráulica mais aperfeiçoada, isto é, capaz de produzir o maior efeito possível, devemos buscar atingir os dois objetivos seguintes:

- 1) Fazer com que o fluido perca absolutamente todo o seu movimento pela sua ação sobre a máquina, ou pelo menos que lhe reste precisamente a quantidade necessária para escapar após sua ação.

- 2) Que ele perca todo o seu movimento por graus insensíveis sem que ocorra nenhuma percussão nem da parte do fluido nem de qualquer componente da máquina. Isto independente do tipo de máquina.

A máquina que melhor preencher as condições acima produzirá sempre o maior efeito possível. Sendo muito difícil atingir os objetivos acima, principalmente no caso das rodas hidráulicas, que apresentam muitos choques e percussões em seu funcionamento, é possível tentar se aproximar pelo menos da segunda condição.

Quando Carnot discute a seguir qual deve ser o meio de se produzir o maior efeito possível, ele afirma que este problema depende de circunstâncias particulares e que não comporta uma solução geral a ser aplicada a todos os casos.

Se observarmos bem, o efeito produzido por uma máquina é uma força viva real ou latente, sempre comparável ao produto  $PH$  de um peso  $P$  por uma altura  $H$ ; chamemos de  $q$  este efeito. Por outro lado para produzi-lo é necessário que todas as forças moventes consumam um momento de atividade  $Q$ , que não pode ser menor do que  $q$ ; isto é, que nada se perdeu no momento de atividade que deve consumir a força movente, ou que se tenha justamente  $Q = q$ . Mas o momento  $Q$  de atividade consumido pela força  $F$  em um tempo  $T$ , movendo-se com velocidade  $V$ , é supondo de forma simplificada,  $F$  e  $V$  constantes, e ainda que o ângulo entre  $F$  e  $V$  seja designado por  $(F \wedge V)$ , teremos que  $F \cos(F \wedge V)$  é então a quantidade que deve ser maximizada.

A equação acima é, evidentemente o chamado momento de atividade ou o trabalho realizado pela força movente. Ele depende de quatro quantidades:  $F$ ,  $V$ ,  $T$  e  $(F \wedge V)$ ; uma forma de maximizar esse produto é fazer com que a direção da força coincida com a da velocidade, ou seja, que a força esteja em fase com a velocidade, como dizemos atualmente. Com relação às quantidades força, velocidade e o tempo durante o qual a força atua, é mais difícil determinar de forma absoluta suas intensidades. Se for possível calculá-las de maneira aproximada, o problema da otimização deve ser tentado.

Carnot chama a atenção para o caso do trabalho realizado por um homem e que está sujeito a fadiga. O conhecimento de sua constituição física passa a ser fundamental. Geralmente esses dados somente podem ser obtidos pela experiência. Voltaremos a esta questão ao tratarmos da contribuição de Coulomb no próximo capítulo.

Dentro do estudo do trabalho realizado pelo homem, visto como uma máquina, e que dá origem a ergonomia e fisiologia, Carnot ressalta a importância de estudos anteriores como o de Daniel Bernoulli: *Resultat de plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier, suivant les différentes manières dont ils emploient leurs forces* ; cita a *Mécanique* de Bossut como contendo reflexões muito importantes sobre o assunto além de mencionar uma memória de Euler intitulada: *De Machinis in genere*.

Dentro do problema da maximização do efeito obtido pela máquina, é importante minimizar o efeito das forças passivas, tais como o atrito, a rigidez das cordas, a resistência do ar, etc. Devido a impossibilidade de eliminar todas essas resistências e forças passivas, cujo efeito é a diminuição progressiva da velocidade da máquina, é que também é impossível o moto perpétuo. Se existir percussão o movimento se extinguirá mais rapidamente e a soma das forças vivas diminui sempre que ela aparece. Neste sentido é interessante a consideração que Carnot faz sobre a impossibilidade do moto perpétuo. Ele afirma: *É evidente então que não podemos produzir absolutamente um moto perpétuo, se é verdade que todas as forças motrizes que existem na natureza não sejam outra coisa senão atrações e que esta força tenha por propriedade geral, como parece, de ser sempre a mesma a distâncias iguais, entre corpos dados, isto é, uma função que não varia senão no caso onde a distância desses corpos varia ela mesma*.

Encaminhando-se para o final do texto, Carnot conduz a discussão sobre a importância do conceito de trabalho na teoria das máquinas, fato que ele reconhece ao afirmar:

*Uma observação geral que resulta de tudo que foi dito, é que esta espécie de quantidade a qual chamamos de momento de atividade, joga um papel muito grande na teoria das máquinas em movimento: pois é em geral esta quantidade que é necessário economizar o máximo possível para obter de um agente todo o efeito que ele seja capaz*.

Em se tratando de uma máquina em repouso, não temos que vencer senão a inércia dos corpos, mas se queremos fazer nascer um movimento qualquer, o momento de atividade que temos que consumir será igual a meia-soma das forças vivas que vão nascer.

Como conclusão, se tivermos um sistema qualquer de corpos animados de forças motrizes quaisquer e que vários agentes exteriores, como, homens, animais, sejam empregados para mover este sistema de diferentes maneiras, Carnot enuncia então o teorema do trabalho e energia na seguinte forma: *Qualquer que seja a variação ocasionada no sistema, o momento de atividade, consumido durante um*



*tempo qualquer pelas potências exteriores, será sempre igual a metade da quantidade da soma que as forças vivas terão aumentado durante este tempo, no sistema de corpos aos quais elas são aplicadas, menos a metade da quantidade que terá aumentado esta mesma soma de forças vivas, se cada um dos corpos for movido livremente sobre a curva que ele descreve, supondo que então ele tenha passado por cada ponto desta curva, com a mesma força motriz que aquela que ele recebe realmente.*

Sendo que os *Princípios* de Carnot, o qual acabamos de analisar, está em grande parte centrado no conceito físico de trabalho, veremos no capítulo que se segue a forma como ele frutificou e foi o ponto de partida para os desenvolvimentos posteriores pelos engenheiros politécnicos. Uma observação que também julgamos essencial é que a teoria das máquinas formulada por Carnot está inteiramente integrada no quadro conceitual da mecânica racional, pois as ferramentas utilizadas são seus conceitos básicos inclusive o conceito de movimento geométrico que é uma versão modificada do princípio dos trabalhos virtuais. Além disso, a estrutura dos *Princípios* é uma revisão da mecânica em toda sua extensão com uma ênfase especial nos problemas de choques e variações bruscas que é aquilo que caracteriza a transmissão de movimento dentro de uma máquina. A originalidade da contribuição de Carnot está em fugir de um tipo de mecânica *Lagrangeana*, no sentido das variações contínuas, ou das formas insensíveis, como se dizia então, com um estilo simples, geométrico, ou talvez fosse melhor dizer trigonométrico, onde uma lei dos cossenos se transforma em uma equação de conservação de energia <sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Embora a diferença fundamental entre as mecânicas de Lagrange e de Carnot seja, que o primeiro estuda o movimento como variações contínuas de posição e o segundo através das variações bruscas, a quantidade conhecida como trabalho continua a ser central para ambos. Uma outra diferença entre Lagrange e Carnot diz respeito aos métodos de análise. Lagrange utiliza o cálculo variacional enquanto Carnot emprega uma matemática alternativa baseada na geometria e trigonometria, o que não deixa de ser uma renovação do ponto de vista das teorias físicas. Dessa forma, a geometria como uma matemática mais antiga encontra novas possibilidades pelas mãos de Carnot.

## **Capítulo 7: As Metamorfoses do Conceito Físico de Trabalho e sua Incorporação ao Pensamento Econômico**

*“Antes de tudo, o trabalho é um processo de que participam o homem e a natureza, processo em que o ser humano com sua própria ação impulsiona, regula e controla seu intercâmbio material com a natureza. Defronta-se com a natureza como uma de suas forças. Põe em movimento as forças naturais de seu corpo, braços e pernas, cabeça e mãos, a fim de apropriar-se dos recursos da natureza, imprimindo-lhes forma útil à vida humana”.*

*“No processo de trabalho, a atividade do homem opera uma transformação, subordinada a um determinado fim, no objeto sobre que atua por meio do instrumental de trabalho. O processo extingue-se ao concluir-se o produto. O produto é um valor de uso, um material da natureza adaptado às necessidades humanas através da mudança de forma”.*

(Karl Marx – O Capital, Vol I, Cap. V, Editora Civilização Brasileira, Rio, 1968)

### **7.1 DO PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DAS FORÇAS VIVAS AO TEOREMA TRABALHO - ENERGIA CINÉTICA**

Como vimos, Lazare Carnot utiliza em larga medida o princípio da conservação das forças vivas o que equivale a relacioná-las diretamente ao conceito de trabalho, mas também globalmente, ou seja, como um balanço sobre todo o sistema como um princípio mais geral de conservação. Digamos, em um sentido mais leibniziano. Sendo este princípio um dos mais férteis da mecânica geral, vejamos sua aplicação no âmbito da mecânica das máquinas.

Segundo Navier, o primeiro estudo onde encontramos o princípio da conservação das forças vivas aplicado à teoria das máquinas é a *Hidrodinâmica* de Daniel Bernoulli, publicado em 1738. É também a primeira vez onde a relação entre a hidrodinâmica e aquele princípio se estabelece. Daniel Bernoulli mostra que se fizermos a abstração dos atritos e perdas, o peso da água elevada, multiplicado pela altura que produz sua velocidade final, é igual a potência empregada para fazer a máquina funcionar. Inexplicavelmente, o ponto de vista de Bernoulli, expresso no balanço de energia que acabamos de mencionar, foi inteiramente negligenciado nas grandes obras de mecânica que visavam a uma aplicação prática, ou seja, mais destinada aos engenheiros daquela época. Entre elas podemos citar a *Física* de

Desaguliers e a *Arquitetura Hidráulica* de Bélidor. Os físicos e matemáticos que trabalhavam com a mecânica mais teórica também não lhe deram maior atenção. Euler, por exemplo, não faz nenhum uso dessas idéias de Bernoulli em seus estudos sobre a roda à reação, a roda centrífuga e o parafuso de Arquimedes. Somente com a memória de Jean-Charles Claude Borda denominada *Memória sobre as rodas hidráulicas*, publicada pela Academia de Ciências em 1767, é que o princípio da conservação das forças vivas começa a sair do anonimato e a ser aplicado às máquinas.

Borda foi o primeiro a aplicar este princípio às rodas hidráulicas. Ele adota o método de Bernoulli melhorando-o em um ponto. Enquanto Bernoulli supunha que a força viva perdida pelo efeito do choque era igual a  $m(v^2 - v'^2)$ , Borda afirmava que esta perda pelas leis do choque deveria ser  $m(v - v')^2$ <sup>1</sup>.

Alguns anos mais tarde, em 1781, Coulomb publicou uma memória sobre os moinhos de vento na qual utiliza o mesmo princípio para estudar este tipo de máquina além de abordar o problema das perdas devido aos choques. O texto de Coulomb se intitula *Observações teóricas e experimentais sobre o efeito dos moinhos de vento*, também publicada pela Academia de Ciências [160].

Para Navier, as contribuições de Borda e Coulomb marcam um progresso considerável em relação à *Hidrodinâmica* de Bernoulli embora continuem restritos a aplicações particulares do princípio da conservação das forças vivas. Navier também ressalta que após esses dois estudos acima mencionados era necessário criar uma teoria geral envolvendo o princípio com capacidade de calcular a eficiência das máquinas. É no contexto desta discussão que ele afirma que esta teoria foi criada por Lazare Carnot em seus *Ensaio sobre as máquinas* e nos *Princípios fundamentais do equilíbrio e do movimento*, os quais foram analisados em detalhes no Capítulo 5 e Capítulo 6, respectivamente. Navier atribui a Carnot a demonstração geral do teorema relativo ao cálculo da perda da força viva devido aos choques entre os corpos não elásticos (duros), fato que não foi observado nem por Borda nem por Coulomb, a não ser em casos muito particulares.

Essas observações de Navier já foram por nós constatadas nos dois capítulos anteriores, bem como as recomendações de Carnot com a finalidade de aumentar o rendimento das máquinas hidráulicas.

---

<sup>1</sup> Se  $V$  é a velocidade com que o fluido chega à roda d'água e  $V'$  a velocidade da roda d'água, a primeira expressão fornece o dobro das energias cinéticas entre o fluido e a roda d'água enquanto que a segunda expressão quantifica o dobro da energia cinética que o fluido pode fornecer à roda d'água.

Após os trabalhos citados, incluindo os de Lazare Carnot, quem traz uma importante contribuição ao desenvolvimento e à aplicação do princípio da conservação das forças vivas é o próprio Navier. Em uma nota publicada nos *Anais de Química e Física*, ele informa sua intenção de submeter à Academia umas notas e acréscimos preparados para uma nova edição da *Arquitetura Hidráulica* de Bélidor. É uma espécie de atualização dessa importante obra. Nela, Navier demonstra o princípio da conservação das forças vivas para uma massa pontual e generaliza o resultado para um sistema de pontos materiais através de uma aplicação clássica do princípio de d'Alembert.

O estudo é feito em termos de velocidades virtuais e Navier deduz em seguida o teorema de Carnot, a partir da conservação das forças vivas. Segundo ele, este teorema completa o princípio da conservação das forças vivas para o caso de uma mudança descontínua e é assim formulado: *A soma das forças vivas que têm lugar em um sistema após uma mudança brusca, é menor que aquela que tem lugar anteriormente, e o sistema perdeu uma quantidade de força viva igual aquela que teria lugar se os corpos estivessem animados de velocidades que são perdidas desde essa mudança*<sup>2</sup>.

Carnot como sempre, volta a utilizar a decomposição de velocidades proposta pelo princípio de d'Alembert antes de considerar o balanço das forças vivas.

Conforme será visto ainda neste capítulo, a grande evolução no princípio da conservação das forças vivas acontece com a publicação do livro de Coriolis - *Do cálculo do efeito das máquinas*, publicado em 1829 [161]. Esta obra é considerada uma das mais importantes no campo da engenharia mecânica no século XIX. Ela é também um marco na história do conceito de trabalho, pois é nela que o termo trabalho é proposto e passa a ser adotado pela literatura técnica<sup>3</sup>. Assim, a palavra *trabalho* vai paulatinamente substituindo as outras denominações anteriores como potência mecânica, quantidade de ação ou efeito dinâmico, entre outras. Como vimos, Carnot chamava o trabalho de momento de atividade.

---

<sup>2</sup> Este teorema de Carnot significa um balanço global de energia sobre todo o sistema onde todas as parcelas inclusive as de trabalho são convertidas em forças vivas.

<sup>3</sup> Na realidade o problema é um pouco mais complexo, pois a utilização do termo "trabalho" vai sendo feita por mais de um autor como, por exemplo, Poncelet. Vejamos como ele descreve em [162] este processo: "Esta expressão, trabalho mecânico, que se define de alguma maneira por ele-mesmo, eu me servi concorrentemente com a quantidade de ação, na redação litografada de meu Curso a Escola de Aplicação de Metz (edição publicada, no começo de 1826 e apresentada no mesmo ano à Academia de Ciências, que a reenviou para exame a uma Comissão composta por Arago e Dupin) ... mas eu não adotei esta expressão: trabalho mecânico, de uma maneira definitiva, senão exclusivamente em relação a toda outra, a não ser em minhas lições de 1827 aos operários, após ter sido encorajado verbalmente por Coriolis, que se serviu por seu lado em suas repetições na Escola Politécnica, em uma época onde ele não tinha ainda publicado sua obra de sábio intitulada "Du Calcul de l'Effet des Machines", que apareceu pouco depois desta"...

Coriolis, além do termo trabalho, também sugeriu que sua unidade se chamasse *dinamode*, mas ela não foi adotada. Ele propunha que um dinamode fosse igual a 1000 kg.m. O termo dinamode era a junção de duas palavras, *dinamis*, que significa potência e *hodos*, designando trajetória. Ele ainda acrescentou o termo  $\frac{1}{2}$  que faltava na definição de força viva e que era motivo de enormes confusões.

Se compararmos a famosa obra de Coriolis com os *Princípios* de Carnot, veremos que ela representa um enorme progresso em termos técnicos, bem como, do ponto de vista de sua completude, estilo e linguagem. Os vinte e cinco anos que separam esses dois livros fundamentais para a história da engenharia mecânica, não apresentam intermediários, excetuando as notas de Navier sobre Bélidor.

A este avanço no campo da mecânica e que significa também o desenvolvimento de uma mecânica aplicada às máquinas mais voltada para o progresso industrial, dedicaremos uma boa parte deste capítulo. Este processo, que tentamos caracterizar em suas linhas gerais em páginas anteriores, principalmente na *Introdução*, teve amplas repercussões no ensino da engenharia como forma de preparar os quadros técnicos para dar continuidade e suprir as necessidades da própria Revolução Industrial em franco desenvolvimento no continente europeu. E como é do nosso conhecimento, Coriolis ensinou na Escola Politécnica, Navier na Escola de Pontes e Estradas e Poncelet na Escola de Artilharia e de Engenharia de Metz.

O que será visto no próximo item, é que o conceito físico de trabalho vai ser usado não somente no campo da mecânica, mas vai adquirir outras utilidades no contexto das máquinas. Essas transformações vão significar que o conceito de trabalho assim estabelecido vai ser enriquecido com ingredientes econômicos no sentido em que Carnot a ele se referiu, ou seja, como norma de valor para o trabalho realizado pelas máquinas e pelos homens. Isto tem um importante significado epistemológico tanto para a mecânica como para a economia. Essas novas elaborações teóricas e os conteúdos novos incorporados ao conceito de trabalho podem ser considerados como uma obra coletiva dos engenheiros politécnicos, como veremos.

## 7.2 COULOMB E O TRABALHO COMO FORMA DE VENCER UMA RESISTÊNCIA PASSIVA.

Antes de analisarmos o contributo de Coulomb e sua importância para a constituição de uma mecânica aplicada, vejamos muito resumidamente alguns estudos e figuras mais representativas que marcaram a sua obra.

Logo na introdução de sua *Théorie des Machines Simples* [160], Coulomb ao se referir a estudos anteriores sobre o atrito, afirma: *Amontons, nas Memórias da Academia de Ciências em 1699, parece ser o primeiro autor que procurou medir o atrito e a rigidez das cordas no cálculo das máquinas. Ele acreditou encontrar, por meio de suas experiências, que a extensão das superfícies não influíam em nada nos atritos, e que esta medida dependia unicamente da pressão das partes em contato: ele concluiu que, em todo caso, o atrito é proporcional às pressões.*

Coulomb ainda se refere aos trabalhos de Muschembroek, Camus, Bossut e Desaguliers, como tendo trazido contribuições significativas aos estudos do atrito nas máquinas.

É evidente que o estudo mais importante e que antecede o de Coulomb no cálculo da força de atrito é o de Guillaume Amontons (1663-1705). Muito embora os estudos de Amontons não tenham o rigor científico e a meticulosidade que têm os de Coulomb, no entanto, eles mudaram a forma de interpretar este fenômeno fundamental para uma mecânica das máquinas. Antes de Amontons não se sabia ao certo se o atrito era uma mera resistência a ser ultrapassada, uma resistência que ocorre no início do movimento relativo entre duas superfícies ou um tipo de aderência que caracterizava superfícies em contato. Ele ajudou a dissipar essas dúvidas e mostrou que o atrito era independente da extensão das superfícies e caracterizou muito bem o atrito como: *uma ação na qual um corpo sob pressão exercida por um outro pode se mover mantendo uma superfície comum entre eles.*

Vejamos alguns dados biográficos de Coulomb antes de analisar o seu estudo sobre o atrito nas máquinas. Charles Augustin de Coulomb era filho de Henry Coulomb e Catherine Bajet. Ele nasceu no dia 14 de Junho de 1736 em Angoulême e morreu em Paris em 23 de Agosto de 1806. Seus pais pertenciam a prestigiosas famílias e de reconhecida competência profissional em suas áreas de atuação. Seu pai vinha de importante família de juristas e administradores da região do Languedoc. Depois de alguns anos em Angoulême, onde cresceu, sua família mudou-se para Paris.

Em Paris, Coulomb frequentou o Colégio Mazarin, onde recebeu uma boa educação e formação clássica em línguas, literatura e filosofia. Também teve um

ensino de primeira qualidade em ciências naturais, voltado para a matemática, astronomia, química e botânica.

Devido a problemas financeiros seu pai mudou-se para Montpellier, mas sua mãe permaneceu em Paris. Coulomb acompanhou seu pai indo residir em Montpellier. Isto era em 1757, quando seu interesse voltava-se cada vez mais para a matemática e a astronomia.

Coulomb pretendia entrar para a Escola de Mézières, a mesma onde viria a estudar Lazare Carnot em 1771. Dessa forma é que Coulomb volta em 1758 para Paris, dedica-se com afinco aos estudos em especial ao *Cours de Mathematique* de Camus. Tendo sido aprovado nos exames ele ingressou na Escola de Mézières em fevereiro de 1760. Nesta prestigiosa Escola fez importantes amizades e foi aluno de Bossut e Borda. Sobre esses dois importantes nomes da ciência francesa, já tivemos oportunidade de nos referir anteriormente.

Coulomb graduou-se em 1761, e, nos vinte anos subseqüentes, esteve em diferentes lugares e se ocupou ou esteve envolvido com diversos ramos da engenharia. Em projetos estruturais, em fortificações, em mecânica dos solos, etc. No período que começa em 1772 ele passa a dedicar um tempo maior aos aspectos teóricos da mecânica.

Em 1773, Coulomb escreve seu primeiro artigo para a Academia de Ciências de Paris, tendo como título: *Sobre uma aplicação das regras de máximos e mínimos a alguns problemas de estática, relativos a arquitetura*. Nele Coulomb inova ao aplicar os métodos do cálculo variacional a esta área, como também apresenta uma grande preocupação com o problema do atrito e das ações internas nos sólidos. Em 1777 ele apresenta à Academia um novo artigo na forma de memória onde estão desenvolvidos os métodos e uma teoria para o problema da torção em cilindros. Isto vai fornecer aos físicos e experimentalistas o melhor método para medir forças de intensidade muito pequena <sup>4</sup>.

O ano de 1779 é particularmente importante para os estudos realizados por Coulomb sobre o atrito. Neste ano ele foi enviado para Rochefort com a finalidade de colaborar com o Marquês de Montalembert na construção de um forte. O Marquês tinha uma grande reputação como engenheiro militar na área de fortificações. Foi durante este período que Coulomb conduziu suas primeiras pesquisas sobre o atrito, usando o estaleiro de Rochefort como laboratório. Esta é a origem de sua obra mais

---

<sup>4</sup> Foi usando a balança de torção que Coulomb conseguiu importantes resultados em eletricidade e magnetismo. A lei da atração e repulsão de cargas, estudo de pólos magnéticos, distribuição de eletricidade sobre a superfície de corpos carregados, entre outros. Ver [116].

famosa: *Théorie des Machines Simples*, ganhadora de um prêmio da Academia de Ciências em 1781.

Como será visto, essas investigações abrangem o atrito estático e dinâmico de superfícies em contato, além do estudo da rigidez de cordas. Esta publicação trouxe uma enorme notoriedade científica para Coulomb, inclusive para sua carreira como militar e homem de ciência. Ele foi eleito para a seção de mecânica da Academia de Ciências, mudou-se em definitivo para Paris onde assumiu um posto permanente. Coulomb escreveu ainda sete estudos sobre eletricidade e magnetismo que também foram submetidos à Academia de Ciências entre 1785 e 1791. Neles, Coulomb obteve resultados importantes usando a balança de torção para estabelecer a lei de atração e repulsão entre cargas elétricas.

É importante também salientar, antes de analisarmos a investigação maior de Coulomb sobre o atrito, que no último período de sua vida, de 1781 a 1806, ele teve oportunidade de trabalhar com Bossut, Borda, Prony e Laplace. No final de sua vida, entre 1802 e 1806 ele ocupou o posto de inspetor geral de instrução pública tendo sido encarregado da criação dos Liceus em todo território francês.

As publicações de Coulomb sobre o atrito constam de duas memórias, a primeira conhecida como *Théorie des Machines Simples*, que conforme mencionamos foi submetida à Academia de Ciências e ganhou um prêmio em 1781. Esta memória consolida o conjunto de experiências que Coulomb realizou sobre o atrito entre superfícies planas, sobre a força necessária para flexionar cordas, sobre o atrito de rolamento e sobre o atrito de eixos em uma polia e outros tipos que aparecem em uma máquina em rotação. A segunda memória intitula-se *O atrito de pontos de um pivô*, que foi apresentada à Academia de Ciências em 1790.

Essas memórias de Coulomb serviram como fonte de referência fundamental sobre o atrito por uma gama muito grande de investigadores durante um longo período.

Como vimos logo no início deste item, Coulomb atribui a Amontons o mérito de ter realizado o melhor estudo sobre o atrito entre todos que o antecederam. Ele também faz um resumo das principais contribuições de outros geometras, como ele os designava. É assim que na introdução de sua *Théorie des Machines Simples*, ele afirma: *A maior parte dos cientistas seguiram os resultados de Amontons; entretanto Muschembroek encontrou, em diversas experiências, que os atritos não dependiam unicamente da pressão, e que a extensão das superfícies também influía. Camus, em seu Tratado das forças moventes, e Desaguilliers, em seu Curso de Física, se aperceberam que o atrito de um corpo em movimento era menos considerável que o de um corpo que devia sair do estado de repouso: mas nem um nem outro procuraram determinar a relação que poderia existir entre essas duas espécies de atrito. Bossut,*



*em seu excelente Tratado de mecânica, debruça-se sobre o sistema de Amontons. E Coulomb conclui esta breve revisão dos trabalhos anteriores acrescentando: Veremos, pelas reflexões que precedem o cálculo do atrito nas máquinas na mecânica de Bossut, que este célebre autor previu, como poderemos nos convencer por meio de nossas experiências, o que acontecerá relativamente à extensão das superfícies, às pressões e às velocidades nas experiências que restam ainda fazer.*

O título completo da memória de Coulomb que passaremos a analisar é: *Teoria das máquinas simples, levando em conta o atrito de suas partes, e a rigidez das cordas*. Ela está dividida em duas partes, em um total de 368 páginas. A que mais nos interessa é a primeira, que compreende 99 páginas e tem o subtítulo: *Do atrito de superfícies planas que deslizam uma sobre a outra*. Esta primeira parte, por sua vez está dividida em dois capítulos:

Capítulo I: Do primeiro esforço necessário para vencer o atrito ou para fazer deslizar uma superfície depois de um tempo dado.

Capítulo II: Do atrito das superfícies em movimento.

Em suma o que Coulomb se propõe é fazer o estudo dos dois tipos de atrito e estabelecer suas relações. Ao referir-se ao atrito estático logo no início da primeira parte, ele afirma:

*No primeiro caso, ou, se queremos fazer deslizar uma superfície sobre a outra, saindo do estado de repouso, o atrito pode depender de quatro causas:*

- 1) Da natureza das superfícies em contato e de seus acabamentos superficiais;*
- 2) Da extensão das superfícies;*
- 3) Da pressão que as superfícies exercem;*
- 4) Da duração de tempo decorrido depois que as superfícies estão em contato.*

Como podemos observar, Coulomb introduz o tempo que as superfícies ficam em contato como um parâmetro importante, o que normalmente não é feito. Além disso, ele reintroduz o problema da extensão das superfícies como uma forma de tentar submetê-la a uma prova dos nove e abre a possibilidade de existir uma quinta causa, ao conjecturar: *A essas quatro causas, podemos acrescentar talvez uma quinta, que é a situação úmida ou seca da atmosfera. Acreditamos que as partículas úmidas contidas no ar aderem às superfícies em contato, e formam uma camada que*

*as modifica. Mas como esta última causa não parece influir de uma maneira sensível nos resultados, nós não a temos colocado em nossas experiências.*

Neste primeiro capítulo, o estudo de Coulomb, fundamentalmente experimental, consiste em testar diversos pares de materiais, fazendo-os deslizar uns sobre os outros em uma bancada de testes, onde controlando um sistema de pesos passando através de uma polia ele produz o deslizamento de uma superfície sobre a outra. A bancada é bastante rígida para evitar interferências do meio que a cerca. Nos experimentos o tempo de repouso de uma superfície sobre a outra passa a ser medido.

Ao concluir as três primeiras experiências, Coulomb faz as seguintes considerações:

*Temos constantemente observado, nas três experiências precedentes, que a resistência do atrito foi menor depois de um segundo de repouso que depois de um ou dois minutos; mas que após um ou dois minutos, o atrito adquiriu todo o aumento que parece suscetível. Temos, após esta observação, procurado determinar a relação da pressão e do atrito, logo que o último atingiu seu limite ou o máximo de seu crescimento; temos para esta relação:*

<i>1ª Experiência</i>	<i>74/30</i>	<i>2,46</i>
<i>2ª Experiência</i>	<i>874/406</i>	<i>2,16</i>
<i>3ª Experiência</i>	<i>2474/1116</i>	<i>2,21</i>

*Como essas três experiências mostram, para a relação da pressão e do atrito, uma quantidade aproximadamente constante, apesar da grande diferença que temos entre as pressões, eu quis ver se diminuindo, tanto quanto é possível, as superfícies em contato, se esta relação se mantém ainda a mesma.*

É interessante observar que a relação medida por Coulomb é sempre entre o que atualmente chamamos de força normal e a força de atrito, de sorte que este quociente é o inverso do coeficiente de atrito. Em outras palavras, Coulomb usa sempre a relação inversa o que tem como resultado um número sempre maior do que um <sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Se medisse a relação inversa, Coulomb teria medido o que é hoje conhecido como coeficiente de atrito, que como sabemos é uma quantidade positiva e maior que um. Quem introduziu esta quantidade na mecânica foi Euler. Ver [163].

Com relação às experiências com a finalidade de medir o atrito cinemático ou dinâmico, ele utiliza os mesmos dispositivos dos experimentos anteriores. A diferença é que nelas ele reduz as superfícies em contato, de forma a obter as menores possíveis. Assim ele realiza nove experimentações e tira algumas conclusões: *Temos duas observações a fazer: desde que as superfícies sejam estendidas relativamente às pressões, então o atrito parece aumentar com as velocidades. Mas, desde que as superfícies sejam muito pequenas relativamente às pressões, o atrito diminui a medida que as velocidades aumentam; assim, na última experiência, é necessário uma força menor de tração para continuar a ter movimento...*

Com o acúmulo e sistematização das experiências, Coulomb chega a conclusão que em todos os casos práticos o atrito é independente da velocidade <sup>6</sup>. Na página 60 ele também conclui que a extensão das superfícies de contato não tem nenhuma influência sobre o atrito. A análise dos resultados desse conjunto extremamente variado de experiências é feita no Capítulo III cujo título é: *Ensaio sobre a teoria do atrito*. Suas principais conclusões são:

- 1) O atrito de madeira deslizando a seco sobre madeira, opõe após um tempo suficiente de repouso, uma resistência proporcional às pressões: esta resistência aumenta sensivelmente nos primeiros instantes do repouso; mas após alguns minutos ela chega ordinariamente a seu máximo ou a seu limite.
- 2) Desde que madeira deslize a seco sobre madeira com uma velocidade qualquer, o atrito é ainda proporcional às pressões; mas sua intensidade é muito menor que aquela que ocorre ao tirar do repouso as superfícies após alguns minutos de repouso.
- 3) O atrito de metais deslizando sobre metais sem lubrificação, é igualmente proporcional às pressões; mas sua intensidade é a mesma, qualquer que seja a maneira de tirá-las do repouso, depois de um certo tempo de repouso.
- 4) As superfícies heterogêneas, tais como as madeiras e os metais, deslizando uma sobre as outras sem lubrificação, fornecem para os seus atritos resultados diferentes; a intensidade dos atritos, relativamente ao tempo de repouso, cresce lentamente, e não atinge seu limite senão após quatro ou cinco dias.

---

<sup>6</sup> Trata-se de medir o coeficiente de atrito cinemático que como sabemos é menor que o coeficiente estático e permanece praticamente invariável com a velocidade, a menos que esta seja muito grande e passe a modificar as propriedades dos materiais em contato e em movimento relativo.

Nos casos de madeira deslizando sem lubrificação sobre madeira, e nos metais deslizando sobre metais, a velocidade não influi senão minimamente sobre o atrito. Em todos os casos estudados, o atrito é aproximadamente proporcional às pressões e independente da extensão das superfícies <sup>7</sup>.

Uma avaliação, mesmo que superficial da obra de Coulomb, pode confirmar sua importância na criação da mecânica aplicada às máquinas. Seu estudo realizado sobre a força de atrito era essencial naquele momento para que essa ciência pudesse progredir. Neste sentido sua contribuição tem uma importância semelhante a de Lazare Carnot para a teoria das máquinas. Assim como a ausência de uma teoria geral das máquinas era um problema sério a ser resolvido para que se pudesse estudar uma máquina qualquer, o desconhecimento das perdas por atrito nas máquinas era uma preocupação fundamental e, como vimos, os estudos nesse sentido já vinham sendo tentados pelo menos cem anos antes de Coulomb. Além disso, Coulomb resolve uma série de problemas específicos do que hoje conhecemos como mecânica aplicada, como é o caso da balança de torção, dos moinhos de vento, etc. <sup>8</sup>

É muito importante voltar a mencionar a memória de Coulomb intitulada: *Memória sobre a força dos homens*. Nela Coulomb estuda o corpo humano como se fosse uma máquina. Seu objetivo era calcular o dispêndio de energia de um homem trabalhando durante uma jornada diária. Ao realizar essa investigação, Coulomb funda a fisiologia, a ergonomia e ao fazer essa analogia tentando reduzir o corpo humano a uma máquina, Coulomb avança significativamente no campo das preocupações econômicas no mesmo sentido que Carnot também iria sugerir. Em outras palavras, tanto as máquinas como os homens em sua jornada diária realizam trabalho e o mesmo pode ser calculado usando métodos semelhantes. Como vimos, para atribuir um valor ao trabalho humano o caminho não é exatamente este sugerido por Coulomb, mas este problema somente vai ser resolvido muito mais tarde com as teorias do valor-trabalho. No entanto, tanto Coulomb quanto Lazare Carnot são peças-chave na fundação da mecânica aplicada, podemos dizer seus fundadores.

Com Coulomb, o conceito de trabalho adquire uma significação mais marcadamente econômica. É o que podemos inferir do que ele afirma na obra supracitada: *Existem duas coisas a distinguir no trabalho dos homens e dos animais: o efeito que pode produzir o emprego de suas forças aplicadas a uma máquina, e a*

---

<sup>7</sup> Essas conclusões a que Coulomb chegou após uma investigação bastante rigorosa do fenômeno do atrito resumem o que conhecemos hoje por leis do atrito seco ou de Coulomb.

<sup>8</sup> Não podemos também esquecer a questão da eficiência das máquinas que era uma preocupação geral da época e que as perdas por atrito constituíam parte essencial delas. Com o estudo das leis do atrito, Coulomb dá um passo significativo no sentido de encontrar o melhor regime de funcionamento das máquinas, pois o atrito está presente em todas elas.

*fadiga que eles suportam ao produzir este efeito. Para tirar todo o partido possível da força dos homens, é necessário aumentar o efeito sem aumentar a fadiga; isto é, supondo que tenhamos uma fórmula que represente o efeito, e uma outra que represente a fadiga, é necessário, para tirar o maior partido das forças animais, que o efeito dividido pela fadiga seja um máximo*<sup>9</sup>.

Finalmente, Coulomb utiliza o conceito de trabalho para medida do efeito de uma máquina, como era comum a todos os cientistas do século XVIII. Ele afirma: *O efeito de um trabalho qualquer tem seguramente por medida um peso equivalente a resistência que ele vai vencer, multiplicado pela velocidade e pelo tempo que durar a ação; ou, o que dá no mesmo, o produto desta resistência multiplicado pelo espaço que esta resistência terá percorrido com um tempo dado.*

### **7.3 NAVIER E O TRABALHO COMO “MOEDA MECÂNICA”.**

Louis-Marie-Henri Navier, oficial da legião de honra, membro do Instituto Real da França e inspetor de divisão do Corpo Real de Pontes e Estradas, nasceu em Dijon, em 15 de Fevereiro de 1785. Aos quatorze anos ficou órfão de pai e encontrou na figura de um tio, M. Gauthey, um segundo pai. Sendo Gauthey engenheiro de projeção na sociedade francesa e tendo ele assumido a educação de Navier, seus progressos logo se fizeram sentir.

Em 1802, Navier estava pronto para se submeter aos exames para admissão à Escola Politécnica, tendo sido um dos primeiros a ingressar com mérito. Após dois anos de estudos na Politécnica onde se destacou pela inteligência e brilhantismo, resolveu ingressar na Escola de Pontes e Estradas. Em 1808 obteve o grau de engenheiro. Os cursos nas duas escolas de engenharia deram a Navier uma grande habilidade teórico-prática.

Em 1819, Navier foi nomeado professor suplente de mecânica aplicada na Escola Real de Pontes e Estradas e em 1831 foi nomeado professor titular. No ano anterior ele havia se tornado professor de análise e mecânica na Escola Politécnica.

A contribuição de Navier à elaboração do conceito físico-econômico de trabalho, faz parte de um pequeno texto intitulado: *Sobre os princípios do cálculo e do estabelecimento das máquinas e sobre os motores*. Este estudo também pertence ao conjunto de notas e acréscimos por ele redigido para a reedição em 1819 da *Arquitetura Hidráulica* de Bélidor. Este livro de Bélidor, publicado inicialmente entre

---

<sup>9</sup> Ao utilizar uma analogia mecânica para tentar medir o trabalho físico de um homem durante uma jornada diária, Coulomb coloca de volta para o caso de uma máquina real a questão de seu rendimento.

1737 e 1739, tornou-se o manual de referência mais importante dos engenheiros hidráulicos da época. Pela data de sua publicação podemos ver que desde muito tempo o manual apresentava conceitos já ultrapassados. Sabemos que em 1781, Coulomb tencionava revisá-lo, mas foi Navier quem retomou o projeto de Coulomb.

Navier redige praticamente um segundo livro como uma espécie de anexo ao original de Bélidor, submetendo-o a uma revisão completa. O método adotado por ele foi adicionar notas e acréscimos ao invés de ir discutindo os conceitos. Disto resultou que sobre pontos importantes, Navier escreveu verdadeiros tratados que puderam ser aproveitados como artigos independentes. Os conceitos que mais nos interessam examinar estão contidos em um desses acréscimos.

Primeiramente Navier utiliza o conceito de trabalho como uma medida da produção das máquinas, ao qual ele denomina de *moeda mecânica*. Em seguida ele retoma a problemática da eficiência e da maximização do rendimento das máquinas, no mesmo sentido no qual Coulomb já havia feito. No fundo essa problemática, com a qual se defronta Navier é também semelhante a enfrentada por Carnot. Trata-se de elaborar princípios e métodos para avaliar a eficiência das máquinas e motores. A diferença básica entre Navier e seus antecessores é que ele coloca o problema das máquinas em um contexto e uma forma mais ampla, ou seja, em termos econômicos<sup>10</sup>.

O que se colocava para ele naquele momento era dispor de um instrumento de medida para a produção de um sistema mecânico. Para Navier e os engenheiros politécnicos, uma máquina era um sistema utilizado para transmissão de forças em oposição a um motor que era um agente produtor de forças. Com a finalidade de alcançar seu objetivo mais facilmente, Navier restringe seu campo de investigação somente às máquinas que estão *submetidas à ação permanente de um motor, produzindo um trabalho contínuo, com suas diferentes partes animadas de um movimento uniforme ou movimentos variáveis, mas periódicos nos quais a velocidade tem um valor médio constante*. Esta forma de classificar uma máquina pela complexidade de seu movimento já tinha sido utilizada por Carnot em seus *Ensaio*s, como vimos anteriormente<sup>11</sup>.

Como será visto, o conceito de trabalho não se apresenta como um conceito físico claramente definido, mas mais como uma noção próxima do senso comum que é de onde provém sua significação econômica. O trabalho neste sentido significa o

---

<sup>10</sup> Na realidade, a contribuição maior de Navier é recolocar a questão do trabalho como uma preocupação nitidamente econômica, onde sua designação de trabalho como "moeda mecânica" é perfeitamente adequada e significativa. Do ponto de vista físico ele não traz nenhuma contribuição mais relevante e o conceito físico é utilizado tal qual se apresentava pela física de então.

<sup>11</sup> Esta simplificação faz com que o trabalho motor seja aproximadamente igual ao trabalho resistente e o espaço percorrido pela força igual ao produto da velocidade pelo tempo.

produto, a obra, ou seja, aquilo que resultou de uma determinada produção. Segundo Navier: *A comparação entre diversas máquinas para o negociante e o capitalista se faz naturalmente depois que a quantidade de trabalho que eles executam e o preço deste trabalho se estabelece. Para estimar os valores respectivos de dois moinhos de trigo, por exemplo, examinaremos qual quantidade de farinha cada um pode moer em um ano. E para comparar um moinho de trigo com um de serrar, estimaremos o valor do primeiro depois que a quantidade de farinha fornecida anualmente e o preço da moedura for estabelecido, e o valor do segundo depois que a quantidade de madeira que ele produzirá no mesmo tempo e o preço da serragem ficarem definidos.*

Para certos casos mais complicados, Navier percebe que uma medida econômica ordinária não é suficiente para que se possa estabelecer uma comparação satisfatória. Ele discute um desses casos da seguinte forma: *Suponhamos que uma pessoa que possua um moinho de trigo, e que deseja por meio de algumas modificações em seu mecanismo transformá-lo em um moinho de serrar. Ela não poderá julgar a vantagem ou desvantagem desta operação a não ser que ela saiba avaliar depois que a quantidade de farinha seja produzida por um moinho, a quantidade de madeira que ela terá. Ou esta avaliação é uma coisa absolutamente impossível, a menos que seja encontrada uma medida comum para os dois trabalhos de natureza diferentes.*

O problema claramente colocado por Navier é o de encontrar um instrumento ou uma medida que permita calcular *a priori*, esta equivalência entre os dois tipos de trabalho, no caso do exemplo acima o equivalente em madeira da farinha produzida e vice versa. O que se busca medir é a capacidade de trabalho de uma máquina no contexto da produção, independentemente da natureza de seu trabalho para que assim se tenha a disposição uma medida comum e que não passará pelo preço de mercado. Usando as palavras de Navier: *Estabelecer uma sorte de moeda mecânica, se podemos exprimir assim, com a qual se possa estimar as quantidades de trabalho empregado para efetuar toda espécie de fabricação.*

É assim que neste momento do desenvolvimento de sua análise que ele recorre à teoria mecânica. Navier considera que a ciência mecânica pode fornecer a medida comum que estava faltando à análise econômica. Segundo uma visão corrente nesta época e que podemos encontrar em outros autores, ele acredita que toda produção consiste em vencer uma resistência mecânica, ou seja, deslocando uma força ou deformando um corpo. E como um complemento necessário a esta idéia, que, além disso, era possível adotar o modelo geral da elevação de um corpo pesado, como Carnot já havia feito. Assim Navier afirma: *Há sempre na ação de uma máquina, um esforço ou pressão exercida contra um ponto, enquanto que um espaço é*

*percorrido por este ponto. Esta observação conduz naturalmente a reconhecer que o gênero de trabalho o mais adequado para servir de avaliação de todos os outros é a elevação vertical dos corpos pesados. Com efeito, independentemente de que ele seja suscetível de uma expressão numérica precisa, invariável e isenta de arbitrariedades, podemos sempre, qualquer que seja a natureza do trabalho executado por uma máquina dada, não somente no pensamento e por uma abstração do espírito, mas na realidade, substituir este trabalho pela elevação de um peso... A elevação de pesos representará então o trabalho da máquina e, uma máquina será considerada como tendo realizado mais trabalho se ela puder elevar pesos maiores a uma altura maior*<sup>12</sup>.

Navier adotou então para sua *moeda mecânica* o trabalho mecânico, conceito já claramente definido no século XVIII, embora sem usar esta designação. Ele adota para o trabalho a mesma expressão usada por Coulomb, ou seja, quantidade de ação.

Mas se o problema colocado por Navier parecia resolvido do ponto de vista físico, do ponto de vista econômico continuava inteiramente em aberto. Neste sentido é importante assinalar que Navier também simplifica o problema a ser resolvido ao considerá-lo independente do tempo. Se isto era possível fisicamente, ou seja, fazer abstração do tempo na definição de trabalho, do ponto de vista econômico isto é impossível, pois o tempo joga um papel fundamental. Estava colocado então um problema mais ou menos nos seguintes termos: como então comparar duas máquinas que podem elevar o mesmo peso a uma mesma altura, mas com o tempo de operação de uma delas sendo o dobro da outra?<sup>13</sup>

Como será visto, Coriolis é quem vai aprofundar o estudo desta questão.

Após enfrentar a primeira parte do problema, que era estabelecer uma medida de equivalência entre trabalhos diferentes ao propor sua *moeda mecânica*, Navier vai analisar agora o problema de sua eficiência. É assim que ele afirma: *A ação exercida pelos motores sobre as máquinas para colocá-las em movimento e fazê-las trabalhar deve se estimar em mecânica da mesma maneira e na mesma espécie de unidade que o trabalho efetuado pelas máquinas. Com efeito, o motor age sobre as máquinas como ele age sobre uma resistência: tem sempre no ponto de aplicação do motor como uma resistência, pressão exercida e espaço percorrido.*

---

<sup>12</sup> Novamente é recolocado, como seus antecessores, o problema da capacidade de realizar trabalho de uma determinada máquina. Isto retoma a questão da energia e a discussão feita por Carnot na parte final de seus "Príncipes".

<sup>13</sup> Do ponto de vista econômico, ou seja, com a finalidade de comparar o trabalho das máquinas, a variável tempo é essencial, pois custos de uma maneira geral e principalmente a produtividade do trabalho está diretamente relacionada com a economia de tempo. Também como vimos na introdução deste estudo, a economia de tempo impõe uma desvalorização no custo do trabalho humano.



É então, que ao fazer esta discussão, Navier coloca o problema do trabalho em um contexto inteiramente econômico: *Não será inútil, para mostrar com qual razão a quantidade de ação consumida em um trabalho é considerada como fornecendo a medida verdadeira, de observar aqui que é sempre proporcionalmente a esta quantidade de ação que se estabelecem os preços em dinheiro pagos pelas diferentes espécies de trabalho.*

*Com efeito, quando pagamos um trabalho, é verdadeiramente o tempo do operário que pagamos; somente este tempo se estima mais ou menos caro, segue-se que o trabalho exige da parte do operário mais ou menos vigor, inteligência, ou conhecimentos adquiridos. Ou se, como deve ser, concebemos um operário empregando suas forças de uma maneira constante e regulada, ele exercerá constantemente um mesmo esforço atuando com uma velocidade constante, e conseqüentemente produzirá quantidades de ação que serão iguais em tempos iguais. Então o preço de um trabalho é proporcional ao tempo que ele exige, é também a quantidade de ação que ele representa.*

Para que ficasse clara a noção de efeito útil, era necessário superar as ambigüidades existentes em face da relação entre trabalho motor e trabalho resistente. É então que ele retoma a hipótese já feita anteriormente de uma máquina com movimento uniforme. Neste caso, se desprezarmos os tempos de partida e parada, podemos admitir que o trabalho motor é igual ao trabalho resistente, pois que a velocidade sendo constante, não há perda de força viva. Visto de outra forma, a produção é igual ao gasto ou dispêndio. E então é que se coloca, como teremos um efeito líquido? Navier vai então precisar melhor as noções de trabalho resistente, distinguindo-o de trabalho útil e de trabalho perdido. Ao fazer isto, aparece a noção de perda e desaparecem as ambigüidades que eram comuns em todos os textos. Senão vejamos: *É necessário agora examinar de uma maneira mais particular a idéia que devemos agregar a palavra resistência empregada mais abaixo. Ela se apresenta naturalmente e é um obstáculo ao movimento da máquina, resultando em trabalho que ela deve efetuar. Mas é muito importante observar que não existe nenhuma máquina e que não podemos conceber nenhuma, que não tenha vários obstáculos ao movimento, independentemente de qual deles, se venha a falar... É necessário então em toda máquina, conceber a pressão exercida pelo motor e compartilhada em duas partes, onde uma produz o equilíbrio, a resistência propriamente resultando em trabalho a efetuar, e a outra as resistências que provêm da máquina; e quantidade de ação que o motor gasta em seu ponto de aplicação compartilhado também em duas partes, onde uma é consumida em pura perda pelas últimas resistências e o outro produto que denominamos ordinariamente de efeito útil da máquina.*

Com as parcelas de trabalho devidamente definidas, é possível definir o rendimento e comparar a eficiência das máquinas. Usando as próprias palavras de Navier: *Podemos ver então que a quantidade de trabalho efetuado por uma máquina, ou seu efeito útil, é uma parte da quantidade de ação fornecida pelo motor, e que muito longe de poder ultrapassar essa quantidade de ação, ela não pode mesmo igualar. Uma máquina é tanto mais perfeita quanto seu efeito útil se aproximar da quantidade de ação que ela consome, e é principalmente em direção a este ponto de perfeição que seu funcionamento deve ser dirigido. O meio de realizar é em geral de tornar o mecanismo simples e de evitar todo choque entre corpos duros e toda mudança brusca de velocidades*<sup>14</sup>.

Como é fácil de observar, a última frase da citação acima reproduz a recomendação já feita por Lazare Carnot no sentido de minimizar as perdas nas máquinas.

Navier recoloca o problema da eficiência das máquinas no contexto da produção econômica ao afirmar: *O verdadeiro objetivo que nos propomos no estudo de uma máquina é que o retorno em dinheiro que ela procura, o qual é proporcional a seu efeito útil, seja o maior possível em relação ao gasto que o motor ocasiona. Ou o efeito útil, sempre menor que a quantidade de ação fornecida pelo motor, aumente e diminua com ele. É necessário então proceder de sorte que a quantidade de ação fornecida pelo motor custe o menos possível, ou de retirar do motor a maior quantidade de ação possível.*

O texto de Navier do qual retiramos algumas citações, não apresenta nem aponta nenhum elemento novo do ponto de vista físico. Ele também não tem o objetivo de definir o conceito de trabalho no quadro da mecânica racional, mas de fazer uso deste conceito como um legado já estabelecido pela mecânica do século XVIII. Seu objetivo central é mostrar que *a quantidade de ação*, isto é, o trabalho é o conceito fundamental para medir tanto o produto como os dispêndios nas máquinas. E é neste sentido que Navier avança em relação a Carnot, ou seja, aprofundando a utilização do conceito de trabalho, eliminando ambigüidades e, principalmente colocando a mecânica das máquinas no quadro da produção econômica. Com isto ele é um dos responsáveis pelo processo de incorporação do conceito físico de trabalho ao pensamento econômico.

---

<sup>14</sup> O problema da eficiência das máquinas ou o cálculo de seu rendimento mecânico é desenvolvido e fica também claro como uma problemática proposta por Coulomb quando estudou o corpo humano como uma máquina levando em conta a fadiga associada. A forma que Navier propõe para melhorar o rendimento das máquinas é de natureza física e muito semelhante ao que era sugerido por Carnot, como vimos.

## 7.4 CORIOLIS E O TRABALHO COMO MEDIDA DA AÇÃO DAS MÁQUINAS.

Gaspard-Gustave Coriolis, nasceu em Paris em 1792, filho de um capitão da guarda de Luis XVI, que arruinado financeiramente e ameaçado pela Revolução, teve que se refugiar em Nancy, onde se tornou comerciante. O jovem Coriolis desde cedo mostrou rara aptidão para a matemática. Com doze anos levou a seu professor uma demonstração nova do teorema de Pitágoras. Um pouco mais tarde, descobriu uma propriedade ainda desconhecida da parábola, e tentou estabelecer a fórmula do desenvolvimento de uma potência qualquer de um polinômio.

Coriolis entrou para a Escola Politécnica aos dezesseis anos em 1808 e foi classificado em segundo lugar na lista de admissão. Ao deixar a Escola Politécnica suas notas o distinguiam por sua excelência em matemática, física e arquitetura. Entre outras aptidões deve ser acrescentado que ele desenhava muito bem, além de possuir conhecimentos excepcionais em literatura e ter apresentado durante o curso uma conduta exemplar. Em 1810 ele entrava como aluno-engenheiro na Escola de Pontes e Estradas. Anteriormente ele já havia chamado a atenção de Cauchy por um estudo sobre a conhecida *curva do cão*. Foi dessa forma que o grande matemático pediu-lhe em 1816 que ele fosse seu adjunto<sup>15</sup>. A oferta foi aceita, pois o aspirante a engenheiro apesar de uma carreira promissora, como tudo levava a crer, devia ainda suprir as necessidades familiares de sua mãe e irmã.

Ao sair da Escola Politécnica, Coriolis passa a ter problemas de saúde que o acompanham até sua morte relativamente prematura por volta dos cinqüenta anos de idade.

Em 1829 ele publicou *Sobre o cálculo do efeito das máquinas*, sua obra mais importante e que seria reimpressa depois de sua morte, mais precisamente um ano após, em 1844, com um título novo: *Tratado da mecânica dos corpos sólidos*. Este livro causou grande impacto nos meios científicos, devido a forma como o trabalho mecânico é abordado.

Outro fato importante na vida de Coriolis é que durante a Revolução de 1830, Cauchy teve que se ausentar momentaneamente da França para seguir com a família real e, Coriolis foi nomeado professor em seu lugar. Apesar dos novos encargos ele continuou com suas funções anteriores e sua saúde frágil representava um grande problema para ele. Seus alunos o apelidaram de *engana morte*.

---

<sup>15</sup> Cauchy é realmente o sábio e personalidade marcante e que domina o panorama científico na França de 1815 a 1830. Toda a escola matemática e físico-matemática francesa do século XIX é em grande medida influenciada por seus estudos, métodos e até seu estilo.

Em 1832, Coriolis se tornou adjunto de Navier no curso de *Mecânica Aplicada*, da Escola de Pontes e Estradas. Ele também inaugurou o ensino de Mecânica na Escola Central, mais tarde Escola Politécnica. Em 1836 ele substituiu Navier na Escola de Pontes e Estradas, posição que assumiu simultaneamente com um posto na seção de mecânica da Academia de Ciências.

Em 1838, Coriolis se tornou diretor de estudos da Escola Politécnica e passou a dedicar-se muito mais a esta atividade. Como professor e pesquisador Coriolis caracterizava-se por um devotamento extremado a suas atividades, por um conhecimento excepcional no campo da mecânica, da matemática e das questões de ensino além de ser um extraordinário professor. Os alunos o veneravam por sua bondade e simplicidade.

Infelizmente sua saúde continuava problemática e em 1843, acreditando não poder mais cumprir suas obrigações ele pediu demissão de suas funções, mas seu pedido foi negado. Algumas semanas depois ele veio a falecer, pelo menos cercado de toda afeição que a Escola Politécnica, alunos e professores lhe devotavam.

Além de seu estudo mais conhecido e já citado anteriormente, outros adquiriram importância e merecem destaque. Sua *Teoria matemática do jogo de bilhar*, publicado em 1835 é um deles [164]. Sua finalidade principal era determinar a influência do choque sobre o modo de rotação e de translação de uma bola de bilhar, além de tentar prever o movimento complexo que ocorreria em virtude do atrito do solo e das reações entre elas.

Coriolis descobriu a força que leva seu nome em 1831, depois de uma feliz inspiração que lhe preocupava como engenheiro<sup>16</sup>. Estamos nos referindo a aplicação do princípio da conservação das forças vivas ao movimento relativo das máquinas, em especial às rodas e turbinas hidráulicas. Ele descreve a aplicação deste princípio da seguinte forma: *O princípio das forças vivas, estendido aos movimentos relativos, fornece muito facilmente uma teoria exata das rodas hidráulicas como aquelas de Borda ou as turbinas de Burdin. Para as rodas com palhetas curvas de Poncelet, ele mostra que todas as vezes que a água sai da palheta da mesma distância do eixo de rotação onde ela entrou, se desprezarmos os atritos, ela não pode ter adquirido ou perdido senão a velocidade relativa devido à ação da gravidade, relacionada com a roda considerada como imóvel; de sorte que depois da forma ordinária das palhetas, a velocidade relativa da água é maior ao sair do que ao entrar.*

---

<sup>16</sup> Para uma descrição detalhada de como Coriolis encontrou o efeito que leva seu nome, ver além do texto original [156], o trabalho de Teun Koestier [166], no qual ele mostra que Coriolis estudava uma roda d'água vertical com palhetas curvas. O efeito de Coriolis aparece ao se fazer um balanço de energia cinética (forças vivas), considerando-se o movimento relativo da água entrando verticalmente na roda d'água pelo diâmetro maior e saindo pelo diâmetro menor.

Dando continuidade ao nosso estudo do conceito físico de trabalho, retornaremos a obra principal de Coriolis, na qual concentraremos nossa análise. O *Sobre o cálculo do efeito das máquinas* aparece dez anos depois da reedição do manual de Bélidor feito por Navier. Ele foi concebido independentemente do trabalho de Navier, pois sua origem se baseia nas notas que foram redigidas desde 1819. Apesar disto, sua redação final em 1829 se assemelha ao quadro de argumentação técnico-econômica nitidamente inspirado no texto de Navier. No entanto, Coriolis tenta ultrapassar as debilidades apresentadas pelo seu importante predecessor. Uma das diferenças marcantes entre Coriolis e Navier é que o primeiro tem como objetivo central uma espécie de aprofundamento do projeto de Carnot, ou seja, desenvolver uma teoria das máquinas com base na mecânica racional de Newton e Lagrange. Assim, diferentemente do que faz Navier, Coriolis introduz desde o início o conceito de trabalho com todo seu formalismo matemático, antes de abordar aspectos de sua significação econômica. Dessa forma, o texto de Coriolis se apresenta extremamente claro para o leitor moderno, sem que ele renuncie à discussão da problemática físico-econômica suscitada por Coulomb e Navier.

O que Coriolis trata de fazer é separar a argumentação física da economia já que a questão de fundo, por ele identificada, é que o trabalho é de fato a justa medida da ação das máquinas e o rendimento mecânico expresso em termos de trabalho útil lhe parece a melhor medida da eficiência das máquinas.

Na realidade o texto de Coriolis publicado um ano depois de sua morte, está dividido em duas partes, formando por assim dizer dois livros diferentes. A primeira parte denominada de *Mecânica dos corpos sólidos e considerações sobre os atritos*, está dividida em três capítulos como se segue:

**Capítulo primeiro:** Noções sobre a velocidade, a força, o peso, a massa, e sobre o movimento de um ponto material.

**Capítulo II:** Do movimento de um corpo sólido.

**Capítulo III:** Considerações gerais sobre as máquinas servindo para transmitir o trabalho de um motor.

A segunda parte intitulada: *Do cálculo do efeito das máquinas*, a qual temos um interesse maior por se tratar do desenvolvimento de uma mecânica das máquinas, posterior ao trabalho de Lazare Carnot, está também dividida em três capítulos, sem subtítulos. O livro contém 367 páginas e sua estruturação lembra a dos *Princípios* de

Carnot, ao também fazer inicialmente uma revisão dos princípios e conceitos fundamentais da mecânica, para em seguida aplicar esses conhecimentos às máquinas. Carnot considera as máquinas como sistemas ou dispositivos para comunicação do movimento e Coriolis como um sistema para transmitir trabalho.

Logo nas páginas introdutórias Coriolis afirma: *Eu me proponho nesta obra a esclarecer as questões sobre a economia do que chamamos comumente de força ou potência mecânica, e de fornecer os meios de reconhecer facilmente quais são as vantagens e os inconvenientes de certas disposições na construção das máquinas.*

Referindo-se aos estudos anteriores ele afirma: *Não existe, que seja do meu conhecimento, sobre o assunto senão as obras de Carnot e de Guéniveau; mas ao mesmo tempo em que eu me ocupei desta teoria, Pétit inseriu nos Anais de Física, uma memória sucinta sobre o emprego do princípio das forças vivas, e um pouco após Navier publicou suas adições e notas sobre a “Arquitetura Hidráulica” de Bélidor.* Coriolis também faz referência ao curso de máquinas de Poncelet em Metz e menciona explicitamente as novas denominações que faz ao longo do texto, inclusive a de trabalho: *Eu empreguei nesta obra algumas denominações novas: eu designo pelo nome de trabalho a quantidade que chamamos muito comumente potência mecânica, quantidade de ação ou efeito dinâmico, e eu proponho o nome de dinamode para a unidade desta quantidade. Eu me permiti uma ligeira inovação ao chamar força viva ao produto do peso pela altura devido à velocidade. Esta força viva não é senão a metade do produto que temos designado até o presente por este nome, isto é a massa pelo quadrado da velocidade.*

Como vemos, as duas citações acima esclarecem dois fatos importantes de serem levados em conta. O primeiro é que Coriolis tem plena consciência da importância do trabalho de Lazare Carnot para tratar do problema das forças vivas além de traçar uma trajetória a ser seguida no sentido de acompanhar a história do conceito de trabalho, que é no fundamental a nossa. O segundo descrito na segunda citação, que é, como já havíamos anunciado, a adoção do termo trabalho para substituir os termos anteriores, bem como, a introdução do  $\frac{1}{2}$  na quantificação da força viva. Alguns autores atribuem impropriamente a Poncelet a utilização e adoção do termo trabalho na mecânica <sup>17</sup>.

No Capítulo primeiro, Coriolis revê os conceitos fundamentais da mecânica e é fácil de se observar que nele já não existe mais nenhum resquício das antigas polêmicas envolvendo o conceito de força. A conhecida polarização entre Newton de um lado e d’Alembert e os Cartesianos do outro já não existe mais. As idéias de

---

<sup>17</sup> Conforme já discutimos em nota de pé de página anterior, a utilização do termo “trabalho” na literatura técnica, deve-se a Coriolis embora alguns autores como René Taton e outros atribuam tal fato à Poncelet.

Newton estão plenamente vitoriosas. Isto fica claro quando Coriolis afirma: *Toda causa que tende a modificar o movimento de um corpo, ou de movê-lo se ele está em repouso, é o que chamamos de força.* É praticamente o enunciado da segunda lei de Newton tal qual está nos *Principia*.

Não somente na citação acima, mas também nos exemplos que ele utiliza para ilustrar o conceito de força, diferem fundamentalmente dos de d'Alembert e Carnot. Coriolis considera a primeira idéia que temos de força aquela que experimentamos ao suportar a ação de um corpo pesado ou de empurrá-lo em uma determinada direção de maneira a imprimir a ele uma certa velocidade. Em outras palavras, Coriolis considera a força como algo atuando do exterior, ou seja, agindo de fora sobre o corpo. Também a força não é mais pura e simplesmente identificada como quantidade de movimento como era próprio dos Cartesianos e a noção de equilíbrio não é somente o resultado da destruição do movimento no choque entre os corpos.

Na revisão que Coriolis faz em seu livro de praticamente toda a mecânica racional, vamos encontrar pela primeira vez a formalização do conceito de trabalho na página 35, no item *princípio da transmissão do trabalho no movimento de um ponto material*, que é o que denominamos hoje de teorema do trabalho e da energia cinética. É também nesta altura do texto que ele introduz várias definições, como a de força movente e força resistente, dependendo se a força aumenta ou diminui a velocidade do corpo. Como vimos anteriormente essas definições já haviam sido utilizadas por Carnot. Ele define ainda quantidade de trabalho, como a integral da componente tangencial da força multiplicada pelo elemento de arco da trajetória da partícula, trabalho motor e trabalho resistente.

Ele enuncia o que era denominado de equação das forças vivas e que ele passa a chamar de equação da transmissão do trabalho, na seguinte forma: *Durante um movimento qualquer, a diferença entre o trabalho motor e o trabalho resistente, devido às forças aplicadas ao ponto material, é igual ao crescimento que tem a força viva do móvel durante este tempo.* Este é, como sabemos o teorema do trabalho-energia na sua forma moderna <sup>18</sup>.

Antes de aplicar este princípio às máquinas, ele define sucintamente uma máquina: *Designamos em geral sob o nome de máquina a um sistema de corpos sólidos em contato, destinado a transmitir o trabalho das forças.* Com relação à aplicação do referido princípio às máquinas ele acrescenta: *O trabalho perdido no atrito entre dois corpos fazendo parte de uma máquina, se calculará por uma integral, se estendendo durante o movimento que se considere, e então o elemento será o*

---

<sup>18</sup> É importante ressaltar que também na nomenclatura como nos conceitos, a carga metafísica que lhes acompanhava até Carnot vai aos poucos desaparecendo.

*produto do atrito total para todos os pontos de contato que têm velocidades iguais e paralelas, multiplicado pelo elemento de comprimento de deslizamento de um corpo sobre o outro.*

Coriolis observa, no entanto, que tal cálculo só poderá ser feito através de experimentos e explica em linhas gerais como montar tal experimento.

O outro problema por ele tratado, e que já foi exhaustivamente estudado por Carnot é o do choque entre corpos, com vistas a aplicação a uma máquina qualquer em movimento. É importante ressaltar neste estudo, a aplicação do princípio de d'Alembert, cujo encadeamento lógico conduz ao teorema de Carnot. Ao usar o princípio de d'Alembert, Coriolis o faz associado ao princípio dos trabalhos virtuais<sup>19</sup>.

O enunciado feito por Coriolis do teorema de Carnot é na sua forma mais geral, válido inclusive para corpos não elásticos: *A diferença entre a força viva devido às velocidades antes do choque e aquela que se deve às velocidades médias após o choque, é igual a soma de dois termos: (1) a força viva devido às velocidades perdidas ou ganhas pelo efeito do choque, isto é, as velocidades que combinadas com aquelas que têm lugar após o choque, darão como resultado aquelas que têm lugar antes do choque; (2) a soma dos produtos das quantidades de movimento devido aos atritos durante o choque, pelas velocidades relativas do atrito ao fim do choque*<sup>20</sup>.

Para finalizar essas considerações sobre o que ele chama de princípio da transmissão do trabalho, Coriolis generaliza este princípio para o caso de uma máquina, especificando todas as parcelas envolvidas na equação:

$$T_m = T'_m + T_f + T'_f + T_c + \sum mv^2 - \sum mv_0^2$$

Onde:

$T_m$  = trabalho motor

$T'_m$  = trabalho motor transmitido pela máquina

$T_f$  = trabalho perdido pelo atrito nas partes exteriores a máquina

$T'_f$  = trabalho perdido pelo atrito nas partes internas da máquina

<sup>19</sup> É a forma mais moderna de aplicar o princípio de d'Alembert. Quando observamos a decomposição de velocidades proposta por ele, as velocidades que são destruídas nos choques são vistas isoladamente como um problema de equilíbrio.

<sup>20</sup> Trata-se como nas vezes anteriores de um balanço de energia, explicitando as duas fontes de perda de energia, os choques e os atritos. Isto fica mais claro com a equação que é apresentada no parágrafo posterior.



$T_c$  = trabalho perdido nos choques

$V_0$  = velocidade inicial

$V$  = velocidade de regime

No Capítulo 3, o último dedicado a uma revisão da mecânica racional e onde Coriolis inicia suas considerações de natureza econômica, ele volta a definir o que seja uma máquina: *Uma máquina, no sentido ordinário da palavra, é um conjunto de corpos em movimento, dispostos de maneira a formar uma espécie de canal por onde o trabalho toma seu curso para se transmitir, o mais integralmente possível, sobre os pontos onde temos necessidade dele. Ele se perde pouco a pouco devido aos atritos e devido às deformações dos corpos, ou bem ele vai se espalhar pela terra, onde se estendendo indefinidamente, ele torna-se logo insensível* <sup>21</sup>.

É importante notar a diferença nas concepções do que seja uma máquina para Carnot e para Coriolis. Carnot vê uma máquina como um sistema para a comunicação do movimento, como algo que vai se propagando em cadeia. Coriolis tem uma visão de máquina estreitamente associada ao conceito de trabalho e este como um fluido que vai escoando e ao longo deste fluxo também vai se perdendo até ficar imperceptível e desaparecer. Deve ser registrado, pois isto tem conseqüências epistemológicas significantes para a história da mecânica, que em nenhum momento nem Carnot ou mesmo Coriolis aventaram a possibilidade das perdas de movimento ou trabalho serem transformadas em calor <sup>22</sup>.

Em seguida Coriolis afirma: *Nós não produzimos nada do que é necessário a nossas necessidades, senão deslocando os corpos ou mudando sua forma; o que não pode se fazer na superfície da terra senão deslocando resistências, e exercendo certos esforços no sentido do movimento. É então uma coisa útil que a faculdade de produzir assim o deslocamento acompanhado da força no sentido do deslocamento, isto é, que a faculdade de produzir a quantidade que chamamos de trabalho.*

Assim, Coriolis fundamenta sua análise econômica em uma concepção de produção análoga a de Navier, ou seja, toda produção pode se reduzir a uma ação mecânica que se opõe às resistências dos corpos, consistindo de deslocamentos ou de deformações, ou seja, realizando um trabalho no sentido físico do termo. Segundo Vatin, Coriolis está em perfeita sintonia com o pensamento econômico clássico e

---

<sup>21</sup> É muito interessante a imagem que Coriolis utiliza para uma máquina. O trabalho que as partes da máquina comunicam entre si é uma espécie de "fluxo vital" que a alimenta e põe em movimento. As perdas devido às resistências, ao atrito ou às deformações, são vistas como furos por onde este fluido escoaria.

<sup>22</sup> Embora o trabalho se degrade no interior das máquinas e se transforme parcialmente em calor, para que se passasse do trabalho mecânico a outras fontes de energia era necessária uma nova síntese na física, que como vimos foi feita com a descoberta da primeira lei da termodinâmica.

emprega com precisão os conceitos que parecem inspirados em Jean-Baptiste Say, mas é muito difícil dizer se ele leu este economista ou outros dos quais essas idéias podem derivar <sup>23</sup>.

Coriolis também constata que *a faculdade de produzir trabalho* está limitada no tempo e a um lugar determinado, e daí ele deduz que esta faculdade é uma mercadoria na forma como os economistas utilizam, ou seja, como um bem *útil e raro*. Dessa forma ele assinala: *Independente de como os movimentos, através de animais, da água ou do ar em movimento, da combustão do carvão, da queda dos corpos, ela é limitada em cada tempo, em cada lugar; ela não é criada pela vontade. As máquinas não fazem senão empregar e economizar o trabalho sem poder aumentá-lo; desde então a faculdade de o produzir se vende, se compra, e se economiza como todas as coisas úteis que não estão em extrema abundância.*

Além dessa consideração feita por Coriolis de que a mercadoria não é o trabalho e sim a capacidade de a produzir, a citação acima também deixa claro que do ponto de vista físico, existe a idéia de energia, que se manifesta na forma de trabalho, qualquer que seja o tipo de motor a produzi-la. Se a força dos homens, dos animais, do ar, do fogo ou qualquer outro tipo que se possa imaginar. Ao fazer essa distinção entre o trabalho e a faculdade de produzi-lo, Coriolis tende a eliminar a confusão que existe na obra de Navier entre os sentidos do que seja produto e gasto. Esta distinção é encontrada em Marx quando ele estabelece a diferença entre trabalho e sua potencialidade, ou seja, a força de trabalho. Esta distinção coloca um outro paralelo entre as construções teóricas de Coriolis e de Marx que é a que existe entre o trabalho físico e o trabalho abstrato, respectivamente <sup>24</sup>.

Este paralelo ou analogia continua com relação a norma de equivalência estabelecida por ambos os pensadores. Para Coriolis é o princípio da transmissão do trabalho quem fornece esta norma dentro da heterogeneidade dos processos concretos de produção e a existência das máquinas permite que se estabeleça a prática da medida da equivalência. Ele afirma: *Se não tivéssemos as máquinas a nossa disposição, dois deslocamentos diferentes seriam duas coisas de natureza diferente que não admitiriam em geral nenhuma base matemática na sua avaliação: seriam esses deslocamentos como muitas coisas úteis, onde os valores não são*

---

<sup>23</sup> Era natural que ao tempo de Coriolis a produção econômica fosse associada a uma ação mecânica, pois o que estava sendo feito no terreno da mesma era a substituição do trabalho humano, predominantemente físico pelo das máquinas. Ao final deste capítulo veremos uma síntese de alguns conceitos básicos empregados por Jean-Baptiste Say e que influenciaram sobremaneira os engenheiros politécnicos.

<sup>24</sup> Embora seja possível traçar um paralelo entre o trabalho humano e o trabalho realizado por uma máquina, as diferenças são acentuadas e são exatamente elas que limitam a utilização de um modelo teórico proveniente da física para explicar os fenômenos da economia. Na sociedade capitalista o trabalho humano é uma mercadoria, mas uma mercadoria muito singular, pois é a única que cria valor. Além disso, o que o capitalista compra não é propriamente o trabalho operário, mas a sua utilização.

*estabelecidos em geral sobre cálculos matemáticos. Mas as máquinas, como vimos, fornecem o meio de colocar para os deslocamentos, bases de avaliação análogas a que temos para quantidades de uma mesma matéria.*

O princípio da transmissão do trabalho, que ocupa uma posição central na obra de Coriolis, está fundamentado na mecânica racional e é posteriormente reformulado do ponto de vista econômico permitindo a ele retomar a elaboração físico-econômica de Navier. Este último partiu da hipótese que o trabalho se conservava no movimento da máquina e daí deduziu que não podia calcular as perdas. Coriolis ao contrário, aplicou o princípio acima referido para montar um modelo teórico com a finalidade de calcular a produção e a despesa ou gasto.

Para que o princípio da transmissão do trabalho fosse aplicado de forma mais simples, Coriolis admitiu como hipótese simplificadora, mas suscetível de ser abandonada posteriormente, que o rendimento da máquina era igual a um. Isto significava que o trabalho resistente era igual ao efeito útil. Se aplicarmos este raciocínio à produção, o efeito útil quando traduzido em termos de trabalho é proporcional a qualquer medida física utilizada para mensurar a produção, como volume, peso, comprimento, etc. Em outras palavras, na idealização feita por Coriolis, com o rendimento da máquina igual a um e a máquina movendo-se com movimento uniforme, trabalho útil é igual a trabalho resistente que por sua vez é também igual a trabalho motor. E com isso o princípio da transmissão do trabalho fornece a medida comum no âmbito da produção.

Partindo da hipótese que o trabalho é a quantidade procurada e satisfatória no contexto da produção econômica para fazer a comparação entre os motores, é suficiente que se admita que uma máquina é suscetível de transformar o trabalho motor em um certo trabalho útil. Nas palavras do próprio Coriolis: *Se queremos comparar o conjunto de duas faculdades de produzir movimento, será suficiente conceber que temos construído máquinas com a ajuda das quais possamos assim aplicar essas faculdades a mesma fabricação, por exemplo a moagem de trigo... É claro que o valor das duas moagens será medido pelo número de litros de trigo moído; e como esses últimos são sensivelmente proporcionais às quantidades de trabalho motor produzido em cada máquina, segue-se que as duas faculdades de movimento terão valores proporcionais às quantidades de trabalho que elas podem produzir nessas máquinas.*

Fica claro da citação acima como Coriolis empregando o conceito de trabalho, fornecido pela mecânica racional consegue utilizá-lo como instrumento de comparação econômica entre motores e dessa forma pode retomar as conclusões de Navier, colocando-as em um contexto teórico completamente novo. O movimento

empreendido pelos dois pensadores é diferente. Para Navier o trabalho era de início uma grandeza econômica, uma *moeda mecânica*, conforme vimos, e a partir daí ele mostrou como o trabalho poderia ser fisicamente medido. A mudança teórica efetuada por Coriolis é que ele ressalta que uma definição, ou talvez melhor um conceito saído da física, o conceito de trabalho permite que seja feita uma comparação de natureza econômica, embora de forma aproximada <sup>25</sup>.

Um outro problema importante recolocado por Coriolis, é o problema do tempo para a realização de um certo trabalho. Do ponto de vista mecânico ele é medido pela potência, que por definição é o trabalho realizado na unidade de tempo. Como será visto, a este respeito existem algumas ambigüidades no texto de Coriolis por nós analisado. Inicialmente ele reconhece que o tempo empregado na realização de uma certa tarefa ou operação e que resulta em uma certa quantidade de trabalho é um dos critérios para comparação de motores: *Dois deslocamentos semelhantes, como o transporte de dois pesos, executados em tempos diferentes, são duas coisas úteis de natureza distinta, que sob a relação de tempo, não admitem comparação geométrica.* Mais adiante, no entanto, Coriolis tenta aprofundar essa visão, raciocinando de forma análoga a de Navier: *Observemos, contudo, que quando se trata de operar com uma máquina uma certa quantidade de deslocamentos semelhantes, como isso não custa mais em muitos casos de os operar simultaneamente, mas sucessivamente, nós podemos fazer entrar o tempo como elemento de valor dessas quantidades de deslocamento operado. Suponhamos, por exemplo, que se proponha a empregar dez homens para elevar pesos: se desejarmos em seguida operar prontamente esta elevação, poderemos sempre fazê-lo e empregar simultaneamente vinte homens; e sem que isto custe mais jornadas, o mesmo efeito será efetuado em um tempo médio pela metade. Esta diminuição do tempo, podendo assim ser obtida a vontade, não pode se pagar em geral.*

A análise que Coriolis faz do problema do tempo é muito semelhante a de Navier, que a *moeda mecânica*, ou seja, o trabalho é uma grandeza independente do tempo. Em outras palavras, o tempo consumido na realização de uma determinada operação, no caso de uma máquina, ou de uma certa tarefa, no caso do trabalho humano, não conta como um elemento de valor. Isto pressupõe que o tempo seja livre e que pode ser modificado a vontade sem que haja qualquer mudança no custo.

Evidentemente este é um ponto fraco da análise de Coriolis e seu pressuposto fundamental é que o tempo é um recurso infinito e está associado somente ao valor de

---

<sup>25</sup> Em Coriolis, o movimento, ou melhor dizendo, o descolamento do conceito de trabalho do campo da física indo em direção ao pensamento econômico é bem mais acentuado que nos outros engenheiros politécnicos e por isso deve ser ressaltado.

uso e não ao valor de troca. Essa análise de Coriolis não resiste a uma crítica mesmo superficial ou até baseada no bom senso.

Uma possível explicação para este fato até certo ponto surpreendente, é que Coriolis pode ter se prendido em demasia à definição física do trabalho, onde a variável tempo não aparece. Com isto, o argumento de Coriolis entra em contradição com seu objetivo final que é de legitimar economicamente o conceito de trabalho como um instrumento para a medida do valor. No entanto, conforme mencionamos, no último capítulo de seu livro, ele retoma a questão do tempo e desta vez assume uma posição praticamente contrária a da citação acima, que aparece no começo do livro. E assim Coriolis retoma o problema do tempo: *Nós repetimos o que temos dito no primeiro capítulo, que o trabalho, sendo o principal elemento daquilo que pagamos no movimento, e o único que seja do domínio das medidas exatas, não é, contudo somente o que constitui o valor do movimento. É assim que o volume, ainda que o principal elemento de valor das diversas matérias úteis, não é o único que se considera para estabelecer os valores dessas matérias.*

Com a citação acima, Coriolis muda de posição em relação ao começo do livro e ao final do mesmo, retoma as questões de natureza econômica e submete a uma crítica vigorosa o modelo físico-econômico que ele havia herdado de Navier. Seus comentários desta vez se concentram sobre o instrumento de medida comum tanto para o produto líquido (o efeito útil) como para a despesa (trabalho total). Seu objetivo, de natureza técnico-econômica era de otimizar o rendimento da máquina, como fizeram seus predecessores. E isto poderia ser obtido em termos de trabalho, pelo quociente entre o trabalho útil e o trabalho total. Neste modelo teórico está implícito que de uma parte o efeito útil, no sentido econômico, pode ser medido em trabalho e que se possa distingui-lo claramente do trabalho perdido. De outra parte, que o rendimento energético é o que constitui o objetivo prioritário do empresário. Ele então mostra que essas hipóteses não são sempre pertinentes do ponto de vista econômico ao afirmar: *Nos resta a considerar sob a relação da economia do trabalho, a terceira parte das máquinas, isto é aquilo que opera imediatamente o efeito útil...o que é isto? os efeitos mecânicos das máquinas consistem: 1) na elevação de pesos; 2) na quebra ou alteração da forma dos corpos; 3) nos atritos a vencer para operar o deslocamento lento dos corpos; 4) nos transportes rápidos, isto é, na produção de velocidade.*

Obviamente, os quatro tipos de efeitos-úteis acima citados são os que colocam os problemas mais graves. Os três primeiros podem perfeitamente ser analisados com o auxílio do modelo de Navier. Na prática algumas questões que se colocam, como, por exemplo, fazer uma distinção sem ambigüidades daquilo que é trabalho útil ou pura perda, adquire um caráter muito relativo devido à complexidade que pode

envolver o movimento de uma máquina. Assim, fica economicamente arbitrário se falar em trabalho perdido.

Ainda sobre os efeitos aos quais nos referimos na última citação, Coriolis observa: *Os três primeiros efeitos, absorvem completamente por eles mesmos uma certa quantidade de trabalho, que não pode mais reaparecer, ao menos pelo momento. Assim, os corpos quebrados ou deformados, os atritos vencidos, os corpos elevados tanto que eles, não repitam essa operação, são consumidas quantidades de trabalho que não pode se transmitir. Esta quantidade será responsável teoricamente por produzir esses efeitos; mas é necessário sempre consumir uma quantidade menor, por causa das velocidades comunicadas e das modificações que resultam nos corpos em sua volta...*

Podemos então voltar à questão do rendimento mecânico e da impossibilidade do rendimento de uma máquina ser igual a um. Isto repousa na própria termodinâmica. Se não quisermos entrar no campo desta ciência, e raciocinarmos simplesmente do ponto de vista mecânico, o rendimento igual a um significaria uma máquina perfeita, o que seria economicamente absurda ou até impossível. Isto implicaria em se construir uma máquina que transmitisse movimentos sem choques e o que é mais improvável, com variações de velocidade infinitamente lentas. Tal máquina nem seria desejável.

O que se coloca então é como maximizar o rendimento mecânico como uma busca pragmática, considerando a máquina idêntica a uma caixa preta, consumindo uma certa quantidade de trabalho, onde não é possível distinguir formalmente o que seja efeito útil de despesas. Com base neste tipo de análise é que o objetivo do empresário tem uma boa dose de empirismo. Ele deve reduzir as perdas que se manifestam claramente como provenientes das forças vivas, sem procurar atingir o máximo absoluto dessa maximização <sup>26</sup>.

Dentro deste quadro técnico-científico, Coriolis está consciente dos limites colocados ao projeto físico-econômico dos engenheiros politécnicos, o qual está fundado sobre o saber proveniente da mecânica do século XVIII. Quando se lança mão dos conceitos da mecânica racional no sentido de resolver o problema econômico das máquinas eles se tornam insuficientes e estão em vias de serem substituídos por uma nova ciência das máquinas, a termodinâmica, cujas bases já haviam sido lançadas por Sadi Carnot poucos anos antes <sup>27</sup>.

É o filho de Lazare Carnot quem vai possibilitar pensar a transformação da força viva em trabalho como um processo irreversível, uma transformação energética

---

<sup>26</sup> Percebe-se claramente o esgotamento do próprio modelo teórico usado e a necessidade de um novo que só vai ser fornecido pela termodinâmica.

<sup>27</sup> É desta forma e seguindo este curso dos acontecimentos que vai surgir a termodinâmica, inicialmente como uma ciência das máquinas e somente depois como uma ciência dos processos gerais da natureza.

que mesmo teoricamente não se fará sem perdas. Para se chegar a este ponto era necessário sair do quadro conceitual da própria mecânica racional e pensar o processo físico de um ponto de vista mais amplo e criar uma nova moeda para conversão dos processos físicos, a energia.

A importância da história do conceito de trabalho mecânico associado à ciência dos engenheiros politécnicos está em mostrar a gênese da termodinâmica, o esgotamento das possibilidades da mecânica racional em dar conta de todos os fenômenos que ocorrem nas máquinas.

Ao se analisar o processo de incorporação do conceito físico de trabalho ao pensamento econômico é fundamental levar em conta as correntes de pensamento econômico e as transformações no quadro socioeconômico do período. No campo da mecânica das máquinas é fundamental desenvolver uma ciência específica para elas. Como foi mostrado isto se inicia com Lazare Carnot, tem prosseguimento com os engenheiros politécnicos e o conceito de trabalho perpassa todas as construções teóricas desde o próprio Carnot. Os desenvolvimentos seguintes vão ocorrer com a termodinâmica que vai fornecer o quadro conceitual mais amplo necessário ao estudo das máquinas mesmo que essas máquinas sejam dotadas somente de movimento mecânico. Evidentemente, mesmo neste caso o movimento se degrada parcialmente em calor colocando inevitavelmente a termodinâmica como a nova ciência das máquinas neste período. Para os objetivos que nos propomos o desenvolvimento que analisaremos em seguida é aquele que resulta na consolidação da mecânica das máquinas como uma mecânica industrial.

## 7.5 PONCELET E A MECÂNICA INDUSTRIAL

Ao analisarmos as contribuições de Coulomb, Carnot e Coriolis, podemos observar nitidamente uma linha evolutiva no sentido da construção e consolidação de uma mecânica aplicada às máquinas <sup>28</sup>. Com Poncelet, a mecânica aplicada é elaborada, sistematizada e em suas mãos adquire o *status* de uma verdadeira disciplina acadêmica. Sua importância está também nas aplicações industriais que a mecânica vem a ter do que em algum progresso no campo teórico com a finalidade de sair das dificuldades encontradas por Coriolis.

---

<sup>28</sup> Como vimos, Coulomb e depois Carnot são os legítimos precursores da primeira geração dos engenheiros politécnicos. A Coulomb deve-se a criação de uma ciência do atrito, a Carnot a criação da primeira teoria geral das máquinas e a Coriolis a melhor sistematização e enquadramento da mecânica das máquinas à mecânica racional.

Jean-Victor Poncelet nasceu em Metz no dia primeiro de Julho de 1788. Filho de Claude Poncelet, um rico proprietário de terras e advogado, e de Anne-Marie Perrein. Ele fez seu curso secundário no Liceu de Metz onde ingressou com a idade de dezesseis anos, em 1804. Em 1807 entrou para a Escola Politécnica e teve como professores: Monge, Lacroix, Ampère, Poinsot e Hachette. Graduou-se aos vinte e dois anos, tendo em seguida sido admitido para o corpo de engenheiros militares. Sua primeira atividade como engenheiro militar foi em fortificações.

Poncelet serviu como engenheiro na campanha da Rússia e foi feito prisioneiro na batalha de Krasnov, em novembro de 1812. Em seguida foi enviado para um campo de prisioneiros no rio Volga, em Saratov onde permaneceu como refém por dezoito meses. Forçado pelas circunstâncias e sem livros para ler, começou a desenvolver algumas idéias originais relativas à matemática, especificamente sobre as cônicas.

Depois de seu retorno à França, em setembro de 1814, Poncelet foi promovido a capitão no corpo de engenharia em sua cidade natal Metz, onde pelos próximos dez anos trabalhou na organização de um arsenal de engenharia e em vários outros projetos de topografia e fortificação. Foi no trato com esses problemas que ele adquiriu um grande conhecimento de mecânica industrial. No campo da matemática desenvolveu um trabalho importante em geometria projetiva tendo sofrido forte influência de Monge. Devido a oposição que lhe moveu Cauchy na aceitação dessas idéias resolveu abandoná-las.

Poncelet tornou-se professor na *École de Génie*, onde Monge começou sua carreira e depois de um período, voltou para Metz onde cedo passou a dedicar-se a uma nova disciplina de mecânica aplicada. Em 1824 projetou e construiu uma roda d'água com palhetas curvas que operava com alta eficiência. Devido a este estudo, o artigo no qual descrevia o invento, ganhou um prêmio de mecânica da Academia de Paris, em 1825<sup>29</sup>.

Poncelet dedicava grande parte de seu tempo ao ensino, aperfeiçoando seus cursos na Escola de Engenharia. Em 1841 publicou a *Introdução à mecânica industrial física ou experimental*, que logo adquiriu grande notoriedade e tornou-se um texto de

---

<sup>29</sup> Na introdução de [167], encontramos um breve histórico dos trabalhos de Poncelet relativos às rodas hidráulicas. A primeira dessas memórias concorreu e obteve em 1825 o prêmio de mecânica da Academia Real de Ciências e já tinha sido publicada nos Anais de Física e de Química, anos 1825 e 1826. Uma segunda memória surgiu em 1826 onde anuncia o resultado de inúmeras experiências relativas a nova roda hidráulica.



referência fundamental neste campo <sup>30</sup>.

Poncelet faleceu em Paris em 22 de Dezembro de 1867 com setenta e nove anos de idade. Infelizmente muitos de seus manuscritos e outros documentos relativos a suas atividades científicas desapareceram durante a primeira guerra mundial e certamente fatos importantes que poderiam ser esclarecidos perderam seus registros definitivamente.

O estudo de Poncelet que dá origem a sua *Mecânica industrial* tem início em 1824, quando ele é encarregado por uma decisão do Ministro da Guerra de criar na Escola de Aplicação de Metz, um curso sobre a ciência das máquinas. Como ele não se considerava devidamente preparado para se desincumbir desta tarefa, começou a reunir todo o material disponível e fez um plano de dividir o curso em três partes. A primeira parte teria o título de *Curso de Mecânica Aplicada às Máquinas*. Esta parte, composta de quatro seções foi impressa para uso particular dos alunos da Escola de Aplicação em 1826. A edição que iremos utilizar foi impressa em 1836, mas antes teve uma impressão inicial e uma reedição em 1832. Vamos então analisar mais de perto as quatro seções que compõem a mecânica industrial de Poncelet. Elas são as seguintes:

**Seção I:** Considerações gerais sobre as máquinas em movimento.

**Seção II:** Principais meios de regularizar a ação das forças sobre as máquinas e de transmitir as velocidades em relações dadas.

**Seção III:** Cálculo das resistências passivas nas peças em movimento uniforme.

**Seção IV:** Influência das variações da velocidade sobre as resistências.

O livro tem 520 páginas, e de forma semelhante aos livros de Carnot e Coriolis, o conceito de trabalho ocupa uma posição de destaque, sendo uma espécie de fio condutor do estudo e um elemento estruturante da teoria e das considerações feitas pelo autor.

Logo no início do texto, na página 2, Poncelet discute a *escolha da unidade de trabalho*, afirmando: *Os trabalhos dos motores e das máquinas são infinitamente*

---

<sup>30</sup> A história dos cursos de mecânica aplicada de Poncelet começa em 1825 com sua entrada para a Escola de Metz. Em 1827 Poncelet fundou na prefeitura de Metz um curso profissional, público e gratuito destinado a operários que se intitulava: Lições da tarde sobre a Mecânica Industrial. Em 1838 ele foi chamado a Paris e encarregado de criar o Curso de Mecânica Física e Experimental. Esses são os fatos mais importantes da carreira didática de Poncelet.

*variados e para poder os comparar, os mecanicistas* <sup>31</sup> *adotaram uma unidade, de espécie particular, uma sorte de moeda mecânica, como disse Navier, que pôde servir anteriormente de medida a todos os gêneros de trabalho e não deixam absolutamente nada de arbitrário em sua avaliação em números. Isto expressa de forma inequívoca o caráter geral e a eficácia da utilização do conceito de trabalho como forma de comparar todos os tipos de trabalho. E prossegue, referindo-se à medida das forças: É aqui o lugar de destacar o que nós entendemos daqui por diante pela palavra força que a pressão, o esforço simples que é capaz um agente qualquer, em uma direção e um ponto determinado, pressão e esforço que são sempre comparáveis e podem ser medidos por pesos, com a ajuda de instrumentos de mola, tais como o dinamômetro de Régnier...*

Devemos observar que Coriolis já usa o conceito mais tarde corriqueiro de força, e Poncelet se refere ao instrumento para medi-la.

Prosseguindo nessas observações preliminares e que também estabelecem vínculos com os trabalhos anteriores ou mesmo contemporâneos, na página 4, ao discutir as *Denominações e valores diversos atribuídos a unidade de trabalho*, ele faz um breve, mas interessante histórico, o qual reproduzimos na íntegra: *O produto PH tem recebido dos mecanicistas diversas denominações, que importa conhecer: Smeaton, engenheiro inglês, ao qual devemos numerosas experiências sobre rodas hidráulicas, denominou de potência mecânica; Carnot, em seus “Princípios fundamentais do equilíbrio e do movimento”, o nome de momento de atividade; Monge e Hachette ( ver o Tratado das Máquinas deste último) a chamava simplesmente de efeito dinâmico, expressão que tem o defeito de ser um pouco vaga em sua generalidade; enfim Coulomb, seguido de muitos outros, a denominou de quantidade de ação, palavras expressivas até chegarmos muitas vezes a fazer uso concorrente com o trabalho, que se apresenta naturalmente ao espírito, mas que tem o inconveniente de se aplicar a uma outra espécie de quantidade já em uso na mecânica racional.*

Poncelet menciona Coriolis como tendo sido um dos primeiros a adotar, juntamente com ele, o termo trabalho para designar aquela distancia *PH* conforme ele se refere e a qual teria todas aquelas denominações também por ele citadas anteriormente <sup>32</sup>. Poncelet cita Coriolis ao falar da unidade de trabalho, que como sabemos foi denominada por Coriolis de dynamode. Demonstrando um conhecimento muito grande sobre a questão do trabalho ele acrescenta: *A notação empregada por*

---

<sup>31</sup> É evidente que o termo mecanicista da forma que é aqui utilizado, não é o mais adequado. Melhor seria usar os engenheiros e técnicos mecânicos, pois mecanicista se refere a uma visão de mundo mecanicista e até do universo.

<sup>32</sup> Isto é feito em sua Mecânica Industrial conforme vimos na nota (3) deste capítulo.

Navier (*Arquitetura Hidráulica de Bélidor, t1, adição ao livro I*) e que consiste em colocar o índice  $Kg \times m$  ou  $Kgm$  à direita e um pouco abaixo do produto do peso em kilogramas pela altura em metros, volta a tomar por unidade de trabalho um kilograma, elevado a um metro de altura, unidade que denominamos simplesmente kilogrâmetro...

Em outras palavras, independente da designação que fosse atribuída ao produto  $PH$ , a unidade de sua medida já estava definida.

Uma outra questão que continuava confusa na obra de Coriolis, que era o problema do tempo associado ao trabalho realizado, já se encontra devidamente esclarecida e definida em Poncelet. Podemos ler: *Como a ação dos motores e das máquinas é muitas vezes continuada e de maneira uniforme, os números que servem para calcular o trabalho podem tornar-se embaraçosos pela sua duração, e então é conveniente tomar para sua medida relacionada com a unidade de tempo, por exemplo, o segundo, o minuto, etc..*

*É assim que os mecanicistas são levados a introduzir, na noção de trabalho servindo de unidade, a idéia da duração, que é totalmente estranha e não pode se aplicar com exatidão senão ao trabalho ou a mesma quantidade de ação que é desenvolvida regularmente em cada unidade de tempo; ainda não se deve perder de vista a duração total e efetiva do trabalho e ter em conta, por conseqüência, de suas intermitências mais ou menos freqüentes, etc...*

*Os fabricantes de máquinas à vapor, entre outros, têm geralmente adotado uma unidade de ação desta espécie, denominada impropriamente por eles de força de cavalo, ou em inglês "horse-power", que será mais exato de traduzir por poder de cavalo, ou cavalo dinâmico, sendo que a palavra força tem um sentido bem determinado em mecânica...*

Dessa forma, apesar das incertezas em termos de nomenclatura e das hesitações na definição de sua unidade, uma nova quantidade aparece na mecânica: a potência mecânica que outra coisa não é senão a capacidade de realizar trabalho na unidade de tempo. É através dessa unidade que o parâmetro tempo vai ser introduzido e levado em conta no cálculo do valor econômico. Muito embora no caso de uma análise correta da questão do tempo na realização de um certo trabalho, Poncelet tenha resolvido o problema, no entanto, muitas vezes ele parte dos conceitos já estabelecidos ou que são de uso corrente por Coriolis. Este é o caso do princípio da transmissão do trabalho, como queria Coriolis e que hoje conhecemos como teorema do trabalho e da energia cinética. Antes de entrarmos propriamente neste teorema, vejamos sua definição de máquina: *Para aplicar o princípio da transmissão do trabalho ou das forças vivas à teoria das máquinas tais que as consideremos nas*

*artes, nós devemos observar que elas se compõem, em geral, de uma série de peças materiais, que comunicam o movimento de uma próxima a seguinte, e assim até aquela que está submetida a ação direta do motor, a qual chamamos de receptor, até aquela que opera imediatamente o trabalho útil e que denominamos ferramenta ou operador. Assim, tanto as peças extremas como aquelas que servem de intermediárias as quais denominamos de comunicadores do movimento, um grau de solidez, de rigidez, ou inextensibilidade suficiente para que, sob os esforços que elas têm de suportar, conservam uma forma sensivelmente invariável e transmitem velocidade, sem perda considerável de uma extremidade a outra da máquina, isto é por leis dependendo unicamente da constituição geométrica do sistema.*

A idéia que Poncelet tem de uma máquina é a de uma cadeia para comunicação do movimento o que não deixa de ter uma origem em Carnot mesmo que ele desenvolva e siga de perto os passos de Coriolis. Também sua visão geométrica do funcionamento de uma máquina é uma herança e um prolongamento das idéias desenvolvidas por Carnot em sua teoria geral das máquinas.

No sentido de dar o próximo passo para estabelecer as equações gerais de uma máquina, Poncelet analisa as perdas mais freqüentes a que as máquinas estão submetidas. Ele enumera os atritos, a aderência e rigidez de fios e cordas, bem como as resistências que normalmente aparecem como causa da diminuição do trabalho útil. Ele ainda acrescenta os choques de suas partes internas como influenciando no efeito geral da máquina e discute seus efeitos da seguinte forma:

- (1) Que a duração dos choques, tais como acontecem nas máquinas, é geralmente negligenciável com relação ao tempo que se considera o movimento da máquina.*
- (2) Que as peças que sofrem estes choques estão constituídas de maneira que as alterações de forma que elas sofrem são muito pequenas, o sistema reencontra após o choque sensivelmente as mesmas condições de vínculos geométricos que anteriormente, e a intensidade da velocidade absoluta de cada ponto permanece variada.*
- (3) Que enfim o resultado do choque foi simplesmente uma perda de força viva sofrida por diferentes corpos e que é medida pela diferença dessa quantidade que o sistema possui antes e depois do choque.*

Novamente é importante observar a influência de Carnot nessa discussão. Para a obtenção das equações gerais do movimento das máquinas, Poncelet faz um balanço dos trabalhos produzidos pelos diversos tipos de força e aplica o princípio da transmissão do trabalho, como era chamado por Coriolis:

$$2\sum \int Fdf - 2\sum Rdr - 2\sum \int Qdq \pm 2\sum \int mgdh = \\ \sum mv^2 - \sum mv'^2, \text{ onde:}$$

$F$  = força motriz

$R$  = resistências elementares

$Q$  = resistências úteis

$v$  e  $v'$  = velocidades da parte considerada em dois instantes quaisquer

Em uma forma simplificada, ao fazer-se as integrais e os somatórios:

$$2(Ff - Rr - Qq \pm PH) = mv^2 - mv'^2, \text{ onde:}$$

$P$  = peso total

$H$  = altura que o centro de gravidade é elevado

As equações acima são aplicadas em diversas situações e para os mais variados tipos de movimento. A classificação dos movimentos segue muito de perto a de Carnot.

As questões de natureza econômica aparecem de forma mais freqüente a partir da quarta parte da primeira seção, por ele denominada: *Estabelecimento das Máquinas Industriais*. Ao tratar das questões gerais logo no início deste item, podemos ler: *Nós já temos dito que as condições essenciais de um estabelecimento consistente que forneça um máximo efeito útil ou da quantidade da obra confeccionada é um mínimo de dispêndio em trabalho motor e dinheiro, de sorte que a unidade do trabalho de cada espécie seja fornecido ao menor preço possível. Para tratar desta questão em toda sua generalidade, seria necessário fazer variar por sua vez todos os dados dos quais ele depende, nas relações que ligam o efeito útil ao efeito dispendido; mas ao fazer abstração do preço em dinheiro, que varia seguindo os tempos e as localidades, não podemos abordar assim a questão do estabelecimento*

das máquinas<sup>33</sup>. E ele continua: *Nós nos contentamos em decompô-la em várias contas distintas para as tratar a parte: assim é que estudamos sucessivamente a ação dos motores sobre os receptores, das ferramentas ou operadores sobre a matéria a confeccionar, a deslocar, etc, e assim não vamos às peças materiais que servem simplesmente a comunicar o movimento.*

Esta citação por si só praticamente explica toda a estratégia de Poncelet em sua *Mecânica Industrial*. Ele entende que uma máquina é uma cadeia complexa de comunicação de movimento, que o trabalho é uma espécie de moeda mecânica como Navier havia proposto, e que a questão da otimização das condições de operação de uma máquina tendo em vista um menor custo é um problema complexo<sup>34</sup>. Sua estratégia é então atacar o problema global decompondo-o em partes e tendo em conta que o trabalho perdido nas resistências passivas e choques nos elementos de transmissão e comunicação de movimento é pequeno e que ele deve concentrar sua análise nos elementos extremos da cadeia de movimento, ou seja, no operador (acionamento) e receptor (dispositivo que realiza o trabalho). Dessa forma, ele prossegue sua análise discutindo uma série de condições e requisitos que devem ter o trabalho do motor e do operador no sentido de se obter um efeito útil mais favorável.

Toda a segunda seção de sua obra é dedicada aos *principais meios de regularizar a ação das forças sobre as máquinas e de transmitir as velocidades em relações determinadas*, dentro do objetivo maior que é a otimização da operação de uma máquina.

A terceira seção é inteiramente voltada para o cálculo das resistências passivas nas peças em movimento e que influem no cálculo do dispêndio das máquinas. Assim são estudados os mais variados tipos de deslocamento relativo entre as peças de uma máquina simples, em tudo semelhante ao de Coulomb, o qual foi objeto de nossa análise no início deste capítulo.

A quarta e última seção está centrada na *influência das variações da velocidade sobre as resistências*. Como já havíamos observado anteriormente, Poncelet utiliza um esquema classificatório do movimento das máquinas semelhante ao de Carnot e o seu estudo das resistências passivas segue de perto este esquema, indo do cálculo do atrito estático, ao do atrito para o caso de peças em movimento

---

<sup>33</sup> Nas equações apresentadas anteriormente, seja na forma de uma integral ou como parcelas integradas, podemos visualizar a parcela do trabalho útil e que vai definir o rendimento da máquina.

<sup>34</sup> Em sua segunda memória sobre as rodas hidráulicas, Poncelet otimiza a velocidade que a água deve ter para que seu efeito sobre a roda seja máximo. Considerando  $V$  a velocidade da água sobre a roda,  $H$  a altura de onde a água desce,  $m$  a massa d'água escoada durante 1 segundo,  $g$  a aceleração da gravidade e  $v$  a velocidade constante e que a roda adquire.  $V-v$  será a velocidade relativa com a qual a água se elevará,  $(V-v)/2g$  será a altura a qual ela atingirá. Assim  $(V-v)-v = v - 2g$  será a velocidade absoluta ao sair da roda hidráulica. Como esta velocidade deverá ser nula para um efeito máximo, teremos  $V - 2v = 0$  ou  $v = \frac{1}{2} V$ . Isto significa que a roda deverá adquirir a metade da velocidade do escoamento como também é previsto pela teoria das rodas hidráulicas em palhetas ordinárias.

uniforme e finalmente onde a velocidade varia desde um movimento alternativo até variações mais complexas. Os casos das perdas por choques entre as peças em movimento são tratados do ponto de vista da perda da força viva, também como já havia feito Lazare Carnot. Dito desta forma poderia parecer que o trabalho de Poncelet inova pouco sendo um mero prolongamento do de Carnot. Isto não corresponde a realidade, pois o tratamento dado a todos esses problemas é feito de forma muito semelhante ao de Coriolis, com uma formalização moderna, uma maneira de decompor a máquina com um objetivo em mente que é otimizar todos os elementos e processos com peso significativo nos dispêndios da máquina em operação. Essa decomposição também se faz através dos elementos constitutivos da máquina usando praticamente os mesmos elementos que hoje são utilizados nos manuais de mecânica aplicada <sup>35</sup>.

Muito embora seja nossa intenção retornar à Mecânica Industrial de Poncelet [168], nas conclusões, alguns comentários são necessários ao final desta seção voltada para estudar sua contribuição às mudanças operadas no conceito de trabalho transformando-o em um conceito físico-econômico. Nesta obra, que é talvez sua contribuição mais importante para os engenheiros industriais do século XIX, ele, ao lado de toda uma nova forma de apresentar os problemas da mecânica, também incorpora uma ciência dos materiais, sólidos e fluidos, mas continua a dedicar ao trabalho físico um lugar de destaque.

Finalmente alguns comentários sobre o que chamamos de processo de incorporação do conceito de trabalho à economia. O conceito de trabalho com ingredientes econômicos, ou o conceito físico-econômico de trabalho, aparece no momento em que a mecânica prática e a mecânica racional se encontram e quando a sua formalização já pode ser colocada a serviço da economia da máquina. Isto acontece em período extremamente rico no panorama social, científico e econômico da Europa, principalmente na França e Inglaterra. Além disso, este período é também contemporâneo do nascimento da economia política clássica, que não acontece justamente neste período por acaso <sup>36</sup>. É esta disciplina que vai fornecer os elementos e os conceitos que possibilitem esta passagem ou talvez este enriquecimento de um conceito que sai do campo da física e adquire outras dimensões no terreno da economia.

---

<sup>35</sup> Estamos nos referindo aos “elementos de máquinas” que são correntemente usados pela mecânica aplicada, tais como eixos, arvores, mancais, correias, etc., mecanismos os mais diversos e que são encontrados nos manuais de mecânica aplicada.

<sup>36</sup> À economia clássica ou escola clássica pertencem Adam Smith, Malthus, David Ricardo e Stuart Mill. Quem inaugura o período clássico na economia é Smith com a “Riqueza das Nações”, publicado em 1776. Superando a chamada escola fisiocrática, Smith toma como central para a atividade produtiva e como fonte de riqueza o trabalho. Como sabemos os fisiocratas tinham uma concepção exageradamente agrária.

Neste contexto, de pleno desenvolvimento da mecânica e de amplo progresso das idéias econômicas, o conceito de trabalho da física vai funcionar como um conceito ponte entre essas duas ciências, a partir de uma questão bastante concreta que se colocava aos engenheiros e economistas da época, que era, como medir a produção e o custo de máquinas e homens operando em conjunto e ainda de como otimizar todos esses fatores de produção.

Curiosamente as idéias que parecem ter exercido uma influência mais direta sobre os engenheiros politécnicos, segundo os trabalhos que analisamos neste nosso estudo, desde Carnot até Poncelet, foram as teorias de Jean-Baptiste Say (1767-1832). As idéias de Coulomb e principalmente as de Coriolis sobre produção se assemelham muito as de Say. A teoria da produção deste economista repousa em grande medida na noção de *utilidade* e na *faculdade que certas coisas têm de poder satisfazer às necessidades dos homens*. Para ele o valor é fixado sobre o mercado pela utilidade, pois ele exprime simultaneamente a oferta e a demanda de bens. A demanda é a medida da utilidade, pois se os homens *atribuem um valor a uma coisa é em razão de sua utilidade*. Esta noção de utilidade permite a Say articular uma análise físico-técnica com a análise econômica propriamente dita. Por outro lado, sua teoria econômica se apóia fortemente sobre o processo tecnológico e incorpora elementos da natureza no processo de produção, sendo de certa forma influenciada pelo pensamento fisiocrático <sup>37</sup>.

Para Say o trabalho das máquinas é análogo ao dos homens na medida em que podemos pensar na substituição de um pelo outro. O conceito de trabalho para ele é muito amplo e equivale a um *serviço produtivo*, exprimindo a produção pelo ângulo da oferta <sup>38</sup>. Dessa maneira, o conceito de trabalho mecânico dos engenheiros politécnicos do período que analisamos, se inscreve muito bem na economia política de Say, embora fosse necessário fazer um estudo a parte para afirmar com segurança

---

<sup>37</sup> Ao fazer a crítica de Adam Smith, Say explicita esses aspectos que são mais marcantes de sua teoria econômica. Em seu "Tratado de Economia Política" podemos ler: "Smith atribuiu somente ao trabalho do homem a capacidade de produzir valores. Uma análise mais completa demonstra, como veremos no decorrer desta obra, que esses valores se devem à ação dos agentes que a Natureza fornece ao homem e à ação dos capitais. Não tenho receio em afirmar que Smith não examinou em todos os seus aspectos o grande fenômeno da produção, atribuindo pouca importância à ação da terra e nenhuma aos serviços prestados pelos capitais, ele exagera a influência da divisão do trabalho, ou melhor, da separação das ocupações. Não que essa influência seja nula nem mesmo medíocre, mas suas maiores maravilhas nesse gênero não resultam da natureza do trabalho: devem-se ao uso que se faz das forças da Natureza. O desconhecimento desse princípio impediu-o de estabelecer a verdadeira teoria das máquinas em relação à produção das riquezas". Ver [169], pg. 54.

<sup>38</sup> Na página 93 de [169], lemos: "Permitam-me acrescentar que se, ao compararmos globalmente o emprego de braços com o emprego de máquinas – e mesmo na hipótese extrema em que as máquinas viessem a substituir quase todo o trabalho manual – nem por isso o número de homens se reduziria, uma vez que a soma das produções não diminuiria e, além disso, a classe dirigente e laboriosa teria, talvez, menos sofrimentos a temer. Nesse caso, com efeito, nas flutuações que, por momentos fazem sofrer os diversos ramos da indústria, seriam principalmente as máquinas, isto é, os capitais, que, mais do que os braços, mais do que os homens ficariam desempregados".



como se deu essa influência, se foi exercida diretamente através da leitura ou aconteceu mais em virtude do ambiente cultural e político do período. Não se tem elementos seguros para afirmar que Coulomb, Navier, Coriolis e Poncelet leram os trabalhos de Say. Contudo, seus ensinamentos foram largamente difundidos entre os engenheiros do período da Restauração. Além disso, em 1819 Say foi encarregado do ensino de economia industrial no CNAM (Conservatório Nacional de Artes e Ofícios), que como sabemos é até hoje uma das instituições mais conhecidas e prestigiosas, na formação de quadros técnicos franceses <sup>39</sup>. Isto simplesmente fortalece a suposição de uma influência mais direta e mais marcante do pensamento econômico de Say sobre os engenheiros politécnicos aos quais nos referimos.

---

<sup>39</sup> O CNAM (Conservatório Nacional de Artes e Ofícios), foi criado pelo decreto de 10 de Outubro de 1794, ou seja, no mesmo ano de criação da Escola Politécnica. Em 1819 é que são instaladas as primeiras cátedras de ensino. Assim foram criadas a cátedra de “mecânica aplicada às artes”, a cargo de Charles Dupin, a de “química aplicada às artes”, conduzida por Nicolas Clément- Desormes. A de “economia industrial” era dirigida pelo próprio Jean-Baptiste Say. Mais tarde, em 1829 foi incorporada a “física aplicada às artes” a cargo de Claude Panillet. Em 1839 novas cátedras foram criadas como a de “mecânica aplicada à indústria” a cargo de Arthur Morin, “geometria descritiva” dirigida por Théodore Olivier, “legislação industrial”, conduzida por Raymond Wolowski, “química aplicada à indústria” a cargo de Anselme Payeu e “agricultura” com Oscar Leclerc-Thonin na direção. Ver [170].

## Capítulo 8: Conclusão

*“Esta é a tendência da maquinaria: por um lado, a constante expulsão de trabalhadores, seja do interior daquela oficina já mecanizada, seja do interior dos ofícios; por outro, sua constante reintegração, posto que a partir de um certo grau determinado de desenvolvimento das forças produtivas, o aumento da mais-valia só se coloca com a elevação simultânea do número de trabalhadores ocupados. Esse movimento de atração e expulsão é característico e representa o constante oscilar da existência do trabalhador”.*

(Marx – Manuscritos de 1861-1863 – Fragmento de “a mais-valia relativa – Acumulação”).

Neste último capítulo, à guisa de conclusão, após as considerações gerais sobre toda a investigação realizada, abordaremos de forma sintética três questões estreitamente relacionadas com o tema central aqui tratado e que ora se encerra.

Inicialmente gostaríamos de observar que muito embora nossa investigação tenha se dado inteiramente no campo da história da ciência ela deve ser vista num contexto mais geral como uma contribuição à ontologia do trabalho. Isto equivale a se colocar em uma perspectiva na qual o trabalho, enquanto atividade, quer ele agregue valor ou não e independente de suas repercussões na economia, continuará a ser um tema fundamental de pesquisa tanto no campo das ciências naturais quanto no âmbito das ciências sociais.

Nosso objetivo maior ao trazer as reflexões contidas neste estudo é preencher pelo menos em parte uma grande lacuna. Trata-se da quase que total ausência de estudos sobre o conceito de trabalho como ação física, como elo de ligação entre o homem e a natureza sem a preocupação maior diante do fato que a partir de um determinado período histórico esta mediação seja responsável por um valor econômico agregado ao produto de seu trabalho e se chame mercadoria. A Parte I, denominada de *Gênese Conceitual*, se propõe a analisar as origens do conceito físico de trabalho, suas relações mais gerais com os conceitos da física e com a história da própria mecânica racional do ponto de vista de seus princípios fundamentais. A Parte II, intitulada *Gênese Instrumental*, acompanhou os desenvolvimentos e transformações sofridas pelo conceito saído da mecânica e aplicado às máquinas incluindo a fase onde ele adquiriu características econômicas. Vejamos algumas particularidades desses dois períodos investigados.

O primeiro começa com o nascimento da mecânica com Aristóteles, passa por uma longa elaboração até ela tornar-se conhecimento científico indo de Galileu a Newton, alcança seu apogeu com a formalização feita por Lagrange na penúltima década do século XVIII e termina na segunda década do século XIX com o fim de um virtuoso ciclo de discussões sobre o princípio dos trabalhos virtuais. O segundo período começa com a primeira aplicação do princípio das forças vivas às máquinas, feita por Daniel Bernoulli em 1738, passa pelo desenvolvimento de uma teoria geral para elas realizado por Lazare Carnot usando o quadro conceitual da mecânica de Newton e d'Alembert, e se encerra na terceira década do século XIX com as aplicações do conceito de trabalho às máquinas levadas a efeito pelos engenheiros politécnicos tendo como base a teoria de Carnot.

Existe uma diferença entre esses dois períodos que é necessário melhor explorar. Enquanto o primeiro período coincide em grande parte com a história da mecânica e atravessa muitos séculos onde as contribuições são múltiplas e variadas e advêm da criatividade de figuras geniais provenientes de muitos países, o mesmo não acontece com o segundo período. Além de concentrado no tempo ele se dá praticamente dentro do quadro da tradição analítica saída do racionalismo do século XVIII na França. Senão vejamos. Depois que Daniel Bernoulli usa o princípio das forças vivas no estudo das máquinas de forma pioneira, temos as investigações sobre as rodas hidráulicas utilizando este mesmo princípio por Charles Borda e Coulomb que também o aplicaram aos moinhos de vento. Em seguida vem Lazare Carnot e a geração de engenheiros politécnicos que lhe sucede. Todos esses desenvolvimentos acontecem na França e com exceção de Daniel Bernoulli que era suíço, todos os outros eram franceses. Poncelet como vimos se refere de forma muito superficial a Smeaton como tendo definido o conceito de potência mecânica e de sua unidade o *horse power (Hp)* que até hoje é usada para medir a capacidade de um motor.

Lazare Carnot é uma das figuras mais interessantes da ciência francesa do século XVIII. Sendo militar dos mais conceituados e tendo ocupado posições de destaque no governo republicano que sucede a queda da monarquia absoluta deu uma contribuição singular e original à mecânica e a matemática de seu tempo. Sua teoria das máquinas teve o grande mérito de apresentar uma solução para o que chamamos de *dilema da mecânica racional*, foi o ponto de partida e germinou nas mãos da geração seguinte de engenheiros saídos da Escola Politécnica também com um contributo fundamental para as ciências da engenharia. Além disso, Carnot empreende uma revalorização da matemática em especial da geometria como descrição das leis da mecânica, no melhor sentido galileano, de maneira diferente e até certo ponto oposto ao projeto de Lagrange eminentemente analítico, algébrico e

que dispensava o uso de figuras. Tudo isso é feito usando de forma sistemática e corrente o cálculo diferencial e integral.

Existe unanimidade entre os historiadores da ciência que do ponto de vista da construção de uma ciência das máquinas (teoria) não há intermediários entre Carnot e Coriolis. São, portanto, vinte e seis anos de interregno. Alguns apontam a atualização da *Arquitetura Hidráulica* de Bélidor feita por Navier (1819) nesse meio-tempo como uma contribuição importante ao empreendimento de Coriolis.

Esta particularidade de estarem concentrados na França os estudos mais importantes e que utilizam o conceito físico de trabalho para uma ciência das máquinas ainda com a condição de estarem inseridos no quadro conceitual da mecânica racional deve ser visto em um contexto mais amplo. Até o final da década de 20 do século XIX persiste uma forte tradição analítica na ciência francesa e que se reflete no surgimento da teoria matemática do calor, de Fourier, em 1822 [132] e nos estudos também analíticos de Ampère [171] sobre a propagação eletromagnética em 1823. Na década seguinte já podemos identificar na Inglaterra uma investigação de cunho analítico de suma importância para a mecânica e que segue a tradição francesa desta vez como uma reelaboração da mecânica de Lagrange a partir do legado de Maupertuis do princípio da mínima ação. Em 1834, Hamilton apresenta à British Association seu *On the Application to Dynamics of a General Mathematical Method Previously Applied to Optics* [172]. Na década de 40 aparecem as teorias mecânicas sobre o éter de George Gabriel Stokes (1819-1903) e na década de 50 têm início as teorias do eletromagnetismo de Maxwell cujo coroamento se dá no final da década de 70. Hamilton traria ainda uma contribuição fundamental ao cálculo vetorial além de ter ficado famoso pela criação dos *quaternions*, em 1843.

Para que possamos ter uma avaliação mais realista do significado que foi a incorporação de uma teoria geral das máquinas à mecânica racional façamos um breve retorno a Galileu. Do ponto de vista mais intuitivo e qualitativo as idéias de trabalho e energia são muito antigas. No que se refere a uma elaboração conceitual tendo a matemática como descrição do mundo físico essas idéias são bem mais recentes. Foram as pesquisas realizadas por Galileu que orientaram a ciência do movimento e nelas podemos identificar nitidamente duas direções. Bem antes de estabelecer uma dependência direta entre a velocidade adquirida por um corpo e a duração de sua queda, Galileu propôs primeiramente que ela era proporcional à distancia percorrida. Percebido o erro ele retoma a primeira proposição relacionando velocidade com o tempo e deslocamento na queda livre com o tempo elevado ao quadrado.

Foi adotando esta segunda via que Descartes propôs o conceito atual de quantidade de movimento e seguindo esta mesma via Newton chegou ao conceito de força. No entanto, a via inicialmente tentada por Galileu de relacionar a velocidade adquirida pela distância percorrida ainda iria se mostrar fecunda. Galileu fez uma revisão desta questão a luz de suas experiências com o pêndulo verificando que o corpo volta a adquirir a mesma velocidade de partida ao retornar a altura inicial. Huygens e Leibniz aprofundam as discussões em torno desta questão e colocam os fundamentos daquilo que será mais tarde chamado princípio do trabalho e da força viva (energia cinética). Dessa forma, para se estudar um dado problema de dinâmica podemos considerar a quantidade de movimento como determinada pela força (leis de Newton) ou, alternativamente, encontrar a força viva a partir do trabalho realizado sobre o corpo. Matematicamente é extremamente simples de mostrar que a segunda lei de Newton com uma pequena manipulação algébrica se transforma no princípio do trabalho e da energia cinética.

Essas duas formas de abordar um problema de dinâmica ficaram separadas por um longo período, gerou uma célebre polêmica a qual já nos referimos. A França e Inglaterra adotaram o caminho newtoniano até que os problemas dinâmicos suscitados pelas máquinas mudam o curso e a trajetória desses estudos. Uma grande parte deste esforço se deve a Lazare Carnot. O desenvolvimento dessa via pelos engenheiros politécnicos iria se mostrar frutífero na medida em que organizou uma nova disciplina de engenharia, a mecânica aplicada, mas seria incapaz de dar conta de toda complexidade que uma máquina em movimento representa com um novo tipo de intercâmbio agora entre trabalho e energia na forma de calor.

Uma última observação sobre a Parte II. Sendo ela mais voltada para uma história da mecânica aplicada onde os personagens principais são figuras conhecidas e que aparecem com frequência nos manuais de engenharia ela representa uma modesta contribuição à história da engenharia mecânica. Deve ser ressaltado que são também muito escassos os textos de história da ciência que tratam das ciências mais aplicadas. Normalmente eles acabam sendo uma história das disciplinas básicas como matemática, física, química e biologia.

Para finalizar estes comentários vamos tecer algumas considerações sobre uma espécie de contraponto que é feito em alguns trechos do texto sobre a filosofia positivista de Augusto Comte. Isto não poderia deixar de ser feito tendo em vista nossas discordâncias profundas com esta corrente de pensamento e que juntamente com o neopositivismo exercem uma grande influência na filosofia da ciência dos dias de hoje. Nossos pontos de divergência são muitos e estão explicitados ao longo do texto. Eles podem ser resumidos no posicionamento que o positivismo tem em relação

ao real, ou seja, no seu relativismo, na sua tentativa de reduzir as ciências sociais em uma física social e finalmente em sua perspectiva *evolutiva* e contínua do conhecimento e do desenvolvimento da ciência.

Obviamente seria impossível tratar aqui dessas questões na profundidade que elas merecem face ao encerramento de nossa investigação. No entanto a omissão seria pior.

Para Augusto Comte a ciência não é um conhecimento do mundo e todo esse acervo que dispomos de conhecimentos científicos, empíricos, etc., são formas aproximadas da ordem do mundo. O conhecimento humano é para ele, limitado e relativo e depende em grande medida de uma evolução coletiva que está por acontecer. Comte cai assim numa posição relativista. Segundo ele nenhuma filosofia, nenhuma lógica ou axiomática geral pode garantir um sistema de conhecimentos de um real unificado. Somente indiretamente, *a posteriori*, pela coerência interna de diferentes métodos é que o real se revela na história das ciências particulares <sup>2</sup>.

Os marxistas também consideram o conhecimento uma forma de aproximação do real, mas devido a sua natureza histórica. O papel da ciência é ir construindo os instrumentos teóricos, experimentais e empíricos como melhor maneira dele se acercar sem nenhum ceticismo metafísico.

Sobre o projeto de transformar a sociologia em uma física social a diferença entre marxismo e positivismo é abissal. Diante da dificuldade de se fazer qualquer análise histórica sem considerar as opiniões, os julgamentos de valor, o positivismo opta por uma espécie de quadratura do círculo, ou seja, busca o fato social e histórico em estado puro, asséptico, sem ideologia e destituído de juízos de valor. Isto é possível? Não será esta uma idéia precursora dos estruturalismos do século XX ?

Quanto ao caráter evolutivo, em sentido diferente do que usamos neste estudo, e que sempre alcança estágios superiores sucessivos de conhecimentos, como modelo para o progresso científico, devemos dizer que também esta idéia está na base das concepções que afirmam estarmos vivendo numa sociedade do conhecimento em direção a conquistas inimagináveis e irreversíveis. Recorramos mais uma vez a Enrique Leff [174]. Embora em um contexto diferente, mas criticando a civilização atual como sendo a era do conhecimento ele afirma: *Mas essa civilização do conhecimento é, ao mesmo tempo, a sociedade do desconhecimento, da alienação generalizada, da desertização do saber e do desencantamento do mundo (a*

---

<sup>2</sup> Em [173], pág. 79, podemos ler; " A ciência não é então conhecimento do mundo, e os conhecimentos aproximados que nós temos da ordem do mundo não revelam as leis, elas existem talvez, mas uma parte pequena nos é acessível. O conhecimento humano do mundo é limitado e relativo porque humano, ele depende de uma evolução coletiva e responde a necessidades de autoorganização social (a religião positiva)" .

*sociedade dos poetas mortos; uma sociedade sem propósito, sem imaginação, sem utopia, sem futuro).*

Em que sentido podemos dizer que vivemos em uma sociedade do conhecimento? Também em que sentido o conhecimento científico é cumulativo? O que temos certeza é que nunca na história houve tantos seres humanos que desconheceram tanto e que estiveram tão isolados, marginalizados e expropriados dos processos de decisão sobre suas condições de existência; nunca houve tantos saberes subjugados, tanto conhecimento desvalorizado e subutilizado pela precarização do trabalho e das condições de vida; nunca os conhecimentos e saberes tradicionais foram tão desenraizados de seus ambientes naturais e de seus territórios, tão desapropriados de suas culturas e identidades.

A história da ciência tem mostrado exatamente o contrário e nossa investigação reforça o ponto de vista de um desenvolvimento da ciência descontínuo, aparentemente errático onde o historiador tem que investigar os movimentos gerais que impulsionam o conhecimento científico, os fluxos e refluxos secundários que se misturam ao caudal principal, identificar o quadro geral, os interesses e motivações particulares para poder apreender o real em sua complexidade e a partir daí construir um discurso coerente e racional de sua evolução. Não é por acaso que os três mais eminentes epistemólogos e historiadores da ciência do século XX, Alexandre Koyré, Thomas Kuhn e Gaston Bachelard têm uma visão de desenvolvimento científico descontínuo. A Koyré, já nos referimos anteriormente, e de Kuhn podemos dizer que seu modelo de progresso da ciência afirmando que uma teoria científica é substituída por outra através de uma Revolução científica na qual a ciência normal dá lugar a um novo paradigma científico não tem nada de contínuo nem gradual, muito pelo contrário. Bachelard [175] propõe a construção de um conhecimento aproximado também descontínuo: *Assim, até na evolução histórica de um problema específico aparecem verdadeiras rupturas, mutações bruscas, que derrubam a tese da continuidade epistemológica.*

Passemos então as três questões que prometemos abordar de forma sucinta logo no início deste capítulo. A primeira diz respeito às mudanças culturais que ocorreram a partir do século XV, ou um pouco antes na Europa, no sentido da aceitação das artes práticas e do trabalho manual como estágio importante da Revolução Científica do século XVII. O livro de Paolo Rossi, *Os Filósofos e as Máquinas*, analisa com muita propriedade o tema e preenche parcialmente esta lacuna<sup>3</sup>. A segunda questão é o problema da técnica, muito embora existam inúmeros

---

<sup>3</sup> Rossi, P., "Os Filósofos e as Máquinas", Editora Schwarcz Ltda., 1989, S. Paulo. [176]

textos importantes e já consagrados sobre o assunto. A sugestão para o aprofundamento deste tema foi dada pela primeira vez por Lucien Fèvre, em um artigo da revista que ele fundou com Marc Bloch em 1929, os *Anais de História Econômica e Social*, nº. 36 de 30 de Novembro de 1936, com o título: *Reflexões sobre a História das Técnicas*<sup>4</sup>.

Fèvre sugere que uma história das técnicas seja abordada sob três pontos de vista distintos: 1) o que ele chama de uma *história técnica da técnica* e que englobaria o estudo técnico dos procedimentos, dos instrumentos, das atividades técnicas diversas ligadas às suas épocas; 2) um estudo desses conjuntos de procedimentos, de ferramentas, de atividades de fabricação, e de como eles são afetados por uma história que ele chama *evolutiva*, e de como o progresso coloca problemas relativos a sua realização, que ele caracteriza como problemas de relação entre *teoria e prática*, entre *ciência e invenção técnica*, entre *acaso e necessidade*; 3) um estudo das relações entre a atividade técnica e as outras atividades humanas (tais como religião, arte, política, etc.).

A terceira questão suscitada pelo nosso texto é o estudo da máquina como artefato social, seguindo a sugestão de Harry Braverman e que foi destacada em epígrafe na *Introdução*. Mas não somente por esta razão, mas principalmente porque o *contexto das máquinas* requer o seu aprofundamento. Essa discussão tentaria responder a indagações do tipo: Quais as causas fundamentais da expansão do maquinismo? Como e por que a máquina substitui o trabalho humano? Quais os reflexos da expansão do maquinismo nas relações de trabalho? Ainda que nossas preocupações não se restrinjam a este breve questionário tentaremos complementar o nosso texto com algumas reflexões. Devido a sua importância para a investigação que se encerra, daremos um tratamento privilegiado ao terceiro tema.

Entre os séculos XV e XVI ocorre na Europa uma transformação radical na forma como são avaliadas as artes mecânicas e o trabalho manual. Isto pode ser constatado pelos trabalhos de Leonardo da Vinci<sup>5</sup> e posteriormente pelos de Benedetti (1530-1590)<sup>6</sup>, de Galileu e outros, onde a mecânica passa a ser considerada a mais nobre das ciências. Alguns historiadores denominam esta mudança de *um retorno à Arquimedes*. No bojo deste processo está em marcha uma verdadeira revolução cultural com reflexos variados na vida econômica e social do período.

---

<sup>4</sup> Citado por Gilbert Simondon em seu "L'invention dans les Techniques", pg. 32, Editions du Seuil, 2005, Paris. [177]

<sup>5</sup> Ver o livro de Carlo Pedretti, "Leonardo: The Machines", Editora Giunti, 1999, Florença. [178]

<sup>6</sup> Benedetti é, em alguns aspectos, um continuador de Leonardo da Vinci, sendo, além disso, um crítico da obra de Aristóteles. Seus trabalhos foram publicados com o título: "Diversarum Speculationum Mathematicarum et Physicarum", em 1585 e cobriam praticamente todos os ramos da mecânica de então. Ver René Dugas, "History of Mechanics", pg. 104, Dover Publications, Inc., 1988, New York.



Assim, a cultura européia era levada por esses acontecimentos a uma ruptura definitiva com a tese de uma inferioridade da técnica em relação à ciência e conseqüentemente de uma relação semelhante entre o trabalho manual e o trabalho intelectual, que foi uma característica que acompanhou toda civilização clássica, grega e romana. Esta oposição tinha origem na própria estrutura econômica da sociedade de tipo escravista e que contava com uma *abundância de máquinas vivas* além de dispensar e tornar supérflua a construção de máquinas que pudessem substituir o trabalho humano. Daí o desprezo que ela tinha pelo escravo ou qualquer um que executasse atividades manuais. Isto fica claro na forma como os dois maiores pensadores da antiguidade, Platão e Aristóteles tratavam o trabalho manual <sup>7</sup>.

Dessa forma, esta antítese que durou séculos vai ruir durante o Renascimento onde surgem formulações diversas no sentido de unir trabalho manual com o espírito da atividade científica em franca ascensão. Com o passar do tempo esse movimento vai adquirir formas diferentes em diversos países da Europa. Estamos nos referindo às distintas nuances que o Iluminismo vai assumir pelos países da Europa.

O interessante artigo de Hugo da Gama Cerqueira, intitulado *Adam Smith e seu Contexto: o Iluminismo Escocês* <sup>8</sup>, ao abordar o caso da Escócia, no entanto, ele se refere a novas formas como a historiografia mais recente tem visto o fenômeno do Iluminismo. Ele afirma: *Rejeitando os padrões monolíticos e anacrônicos deste tipo de abordagem, a historiografia mais recente sobre o Iluminismo tem se voltado para a diversidade de suas manifestações nacionais e para as particularidades destas diferentes expressões que, nas leituras convencionais, ficavam obscurecidas ou eram simplesmente tomadas como sinais de sua insuficiência, da ausência do “verdadeiro” Iluminismo. De fato, a presença das luzes na Inglaterra era plenamente sentida no século XVII: o florescimento da razão, o respeito à liberdade de expressão e a tolerância religiosa foram reconhecidos e celebrados pelos estrangeiros que a visitaram. Ainda no mesmo texto, Cerqueira ao se referir às particularidades do Iluminismo na Inglaterra, afirma: A busca incessante dos melhoramentos (improvements), a aplicação da ciência e das artes mecânicas a fins práticos, a crença no comércio como promotor da tolerância e da coesão social. Tudo isso conformou uma via britânica para o Esclarecimento, distinta das variantes seguidas no continente por seu acento marcadamente individualista e por seu “esforço não para subverter o sistema, mas para protegê-lo, de modo a alcançar a satisfação individual e a estabilidade coletiva no interior da estrutura pós-1688”.*

---

<sup>7</sup> Ver o livro de Joel Jung: “Le Travail”, Editora Flammarion, pg. 111 e pg. 143, 2000, Paris.[179]

<sup>8</sup> Ver Anais do Seminário de História da Ciência e da Tecnologia, Outubro de 2005, B. Horizonte.[180]

Luiz Carlos Soares em seu artigo *A Idéia de Ciência Aplicada na Inglaterra do Século XVIII: os Manuais Newtonianos*<sup>9</sup> também aborda a Ilustração inglesa de um ponto de vista original e pouco pesquisado que é o da difusão dos conhecimentos científicos advindos da mecânica de Newton<sup>10</sup> através de professores itinerantes. Segundo o autor: *A idéia de Ciência Aplicada relacionada às necessidades das atividades industriais e ao bem estar da população do país, constituiu-se num dos mais importantes aspectos da Ilustração inglesa e numa poderosa alavanca intelectual que possibilitou a emergência da Revolução Industrial, a partir dos anos 1780.*

Voltando às transformações culturais na Europa, vamos encontrar em Galileu a síntese daqueles dois movimentos que se opunham. Somente em sua obra vai acontecer a plena realização e convergência entre a experiência e a prática dos artesãos, técnicos e construtores de máquinas com a tradição teórica da ciência européia<sup>11</sup>. Isto é importante de ser ressaltado, pois alguns estudiosos da obra de Galileu<sup>12</sup> têm divulgado uma imagem distorcida do sábio pisano, apresentando-o como um racionalista e matemático puro e o que é pior, até mesmo como se opondo ao saber dos práticos e engenheiros renascentistas. Também é verdadeiro que Galileu tinha plena consciência do papel e da importância da elaboração de uma teoria científica na qual se superam os relatos, as observações e os registros empíricos e técnicos, conferindo-lhes um caráter de generalidade através da abstração<sup>13</sup>.

---

<sup>9</sup> Ver Anais do Seminário de História da Ciência e da Tecnologia, Outubro de 2005, B. Horizonte.

<sup>10</sup> O livro II dos "Principia" de Newton trata do movimento dos corpos em meio resistente, fornecendo a base teórica e sugerindo amplas possibilidades para a aplicação da mecânica newtoniana. Ele está dividido em 9 itens, onde os três primeiros estudam o movimento de corpos em meios resistentes nos quais as forças que se opõem a esses movimentos dependem de uma função da velocidade. O item IV estuda o movimento circular em meios resistentes, o item V estuda a hidrostática, o item VI estuda o movimento de pêndulos com resistência, o item VII estuda o movimento dos fluidos, o item VIII estuda a propagação de ondas em fluidos e finalmente o item IX estuda o movimento circular de fluidos.

<sup>11</sup> Galileu, em seu "Discorsi", no primeiro diálogo, da primeira jornada, expressando-se através de Salviati, que o representa, afirma: "Parece-me que a freqüente atividade do vosso famoso arsenal, Senhores Venezianos, oferece vasto campo filosófico às inteligências especulativas e, particularmente, naquela matéria que se denomina Mecânica, visto que neste lugar se constrói continuamente todo tipo de instrumentos e máquinas por numerosos artesãos, entre os quais é possível que existam, devido tanto às observações feitas pelos antepassados, como pelos que fazem continuamente por sua própria reflexão, alguns que aliam sua perícia a um raciocínio profundo". [181]

<sup>12</sup> Ver Alexandre Koyré em "Galileu e Platão", Editora Gradiva. Na página 12, ele afirma: "A ciência de Descartes – a fortiori, a de Galileu – não é mais (como já foi dito) do que a ciência do artesão ou do engenheiro. Esta explicação, não me parece, devo confessá-lo, inteiramente satisfatória. É verdade, bem entendido, que a filosofia moderna, tal como a ética e a religião modernas, põem a tônica na ação, na práxis, bem mais do que faziam o pensamento antigo e medieval. O mesmo é verdade acerca da ciência moderna: penso na física cartesiana, nas suas comparações em roldanas, cordas e alavancas. Contudo, a atitude que acabamos de descrever é muito mais a de Bacon – cujo papel na história das ciências não é da mesma ordem – que a de Galileu e Descartes. A ciência destes não é de engenheiros ou artesãos, mas de homens cuja obra raramente ultrapassou a ordem da teoria". [182]

<sup>13</sup> Ludovico Geymonat, em seu "Galileu Galilei", Editora Nova Fronteira, 1997, pg. 335, afirma: "Por mais importante que seja a função que Galileu atribui à matemática dentre as fases da pesquisa científica, examinadas nos dois parágrafos precedentes, indubitavelmente superior é aquela que ele atribui a ela na construção das teorias físicas: é tão relevante que fez surgir em diversos intérpretes a convicção de que Galileu pretendia reduzir as teorias científicas apenas a seu aspecto matemático". [140]

Outra figura importante no processo de transformações culturais ao qual estamos nos referindo é Francis Bacon (1561-1626), legítimo representante do movimento no sentido de substituir uma cultura retórico-literária por uma outra de tipo técnico-científica<sup>14</sup>. Ele também reconhece que para realizar tais mudanças é necessária uma reforma na sociedade a qual implica em uma ruptura com a tradição vigente e que isto pressupõe mudar não só o modo de pensar, mas também de viver dos homens. Além de tudo deve surgir uma nova atitude diante do mundo natural.

Bacon preconiza a superação do discurso filosófico elaborado no mundo clássico baseado na superioridade da contemplação sobre o fazer e da resignação diante da natureza e propõe sua conquista. Era essa a ruptura que ele desejava anunciar.

Paolo Rossi em seu livro anteriormente mencionado, cita mais algumas figuras eminentes do Renascimento e que contribuíram com suas obras para esta mudança de atitude no cenário cultural. Ele afirma: *Palissy, Norman, Vives e Rabelais – em diversos níveis e com diferentes intenções – haviam expressado a exigência, muito difundida na cultura do século XVI de um saber em que a observação dos fenômenos, a atenção às obras, a pesquisa empírica fossem mais importantes do que as digressões retóricas, as complacências verbais, as sutilezas lógicas, as construções apriorísticas*<sup>15</sup>.

Bernard Palissy, ceramista francês, afirmava que se aprendia mais filosofia natural acompanhando seu trabalho prático por algumas horas do que fazendo a leitura de livros filosóficos por centenas de horas. Robert Norman, marinheiro inglês, descreve seus conhecimentos sobre a agulha magnética e seus movimentos e confessa que se considera inteiramente incapaz de uma discussão com os lógicos, mas sua publicação e seus experimentos contribuirão para benefício da Inglaterra. Luis Vives, humanista espanhol, valoriza as técnicas e faz um apelo aos intelectuais de que estudem as técnicas agrícolas, de navegação e de construção das máquinas. Só assim eles poderiam saber como aplicá-las para o uso e benefício geral já que os filósofos construía era entidades metafísicas e imaginárias. Ele conclamava o homem culto a abandonar seu desprezo pelos conhecimentos vulgares e a passar a freqüentar as oficinas e fábricas para procurar aprender com os artesãos as artes práticas. Finalmente, o conhecido escritor francês François Rabelais (1494?- 1553) considera o conhecimento da prática artesanal como fundamental para a formação dos jovens. Seu personagem, Gargantua, deveria se preocupar com os estudos

---

<sup>14</sup> Ver o livro de Bernardo Jefferson de Oliveira: "Francis Bacon e a Fundamentação da Ciência como Tecnologia", Editora da UFMG, 2002, B. Horizonte.[183]

<sup>15</sup> Ver obra já citada de Paolo Rossi, pg. 25.[176]

tradicionais, mas também ver como trabalhavam os fundidores de metais, os ourives, os talhadores, os relojoeiros, os gráficos, etc.

Em suma, sem a ascensão do *status* cultural da filosofia experimental, dificilmente a ciência teria se desenvolvido, pois isto requeria o concurso dessas duas formas de conhecimento além do que a construção de instrumentos para testar as hipóteses que as teorias científicas postulavam era uma tarefa crucial e decisiva <sup>16</sup>.

Vejamos em linhas gerais algumas questões importantes relativas à técnica, a segunda questão suscitada no início do capítulo. Em 1955 foi publicado na França o livro de Jacques Ellul (1912-1994) intitulado: *La Technique ou l'Enjeu du Siècle*, somente publicado no Brasil em 1968, traduzido e prefaciado pelo saudoso Roland Corbisier (1914-2005). Com o tempo este livro tornou-se uma das referências mais conhecidas e citadas em se tratando de estudos sobre a técnica. Ellul combina uma análise original com comentários desconcertantes e muitas vezes coloca certos autores consagrados numa situação desagradável. Corbisier em seu longo prefácio chama a atenção do leitor para o fato do livro de Ellul ter promovido uma reviravolta considerável em seu pensamento e de ter abalado profundamente muitas de suas convicções já cristalizadas sobre a técnica.

Uma dessas certezas e que o livro de Ellul questiona é a identificação que muitos autores famosos ainda fazem entre a técnica e a máquina <sup>17</sup>. Ele fundamenta sua análise afirmando que embora a máquina seja *a técnica em estado puro*, pois a técnica tende a tudo mecanizar ou maquinizar, *é a máquina que atualmente em tudo depende da técnica*. Segundo ele a técnica é algo muito mais abrangente e seria uma exigência de racionalização, uma forma superior de *saber-fazer*, e que assume características importantes nos setores e nas atividades humanas em que a máquina não funciona.

Corbisier, analisando o livro de Ellul, ressalta uma outra questão que tem gerado muita discussão. Trata-se da afirmação, até certo ponto bastante difundida de que a técnica seja uma aplicação da ciência, o que Ellul considera falsa. Ele argumenta que a técnica antecede a ciência e a magia primitivas, que nada tem de científica e nem por isso deixa de ser uma técnica. Só muito recentemente é que essa relação se inverte e a ciência embora contribua de forma decisiva para o progresso tecnológico, acha-se totalmente subordinada e dependente do progresso técnico, tornando-se segundo Ellul um *instrumento da técnica*.

---

<sup>16</sup> Ver o interessante artigo de Pierre Thuillier: "Au Commencement Etait la Machine", La Recherche, Janeiro de 1976, pg. 47.[184]

<sup>17</sup> Ellul critica principalmente Lewis Mumford. Ver "La Technique ou l'Enjeu du Siècle", pg. 2.[185]

Ellul atribui à técnica as seguintes características: o automatismo, o auto-acréscimo, a insecabilidade ou a individualidade, o universalismo e a autonomia. Vejamos o que cada um desses conceitos significa. Por automatismo ele entende a impossibilidade de se recusar uma solução ou método envolvendo um maior grau de tecnicidade, ou seja, a técnica que se impõe é sempre a que contém uma maior racionalidade e eficácia. Assim, o homem, por esta característica da técnica, deixaria de ser o sujeito da escolha entre alternativas técnicas, sendo a própria técnica quem procede a escolha e dessa forma ela adquire um automatismo próprio.

No que se refere ao auto-acréscimo, Ellul observa que a técnica tende a desenvolver-se, a progredir, excluindo cada vez mais a intervenção humana, e as soluções técnicas vão engendrando umas as outras, em um processo em cadeia e que vai tornando-se mais e mais automático. É devido a isso, segundo ele, que as mesmas descobertas ocorrem simultaneamente em diferentes países que se encontram em níveis equivalentes de desenvolvimento tecnológico. Dessa forma, a mola propulsora do progresso técnico é a própria técnica, gerando um sistema com capacidade de se autoproduzir.

A terceira característica mencionada é por ele denominada de insecabilidade, individualidade, ou ainda unicidade. Qualquer que seja o nome escolhido significa que o fenômeno técnico, ao englobar o conjunto de técnicas, constitui, *ipso facto*, uma totalidade que se apresenta sempre e em qualquer parte com as mesmas características. Com isso fica difícil distinguir-se entre a técnica e o uso que dela se faz, pois a essência da técnica consiste no seu uso, que em princípio não é bom nem mau, justo ou injusto, pois sendo técnico, seria o único uso possível, não podendo ser julgado por critérios não técnicos.

Essa linha de argumentação desenvolvida por Ellul conduz a uma outra questão que é ser destituído de qualquer sentido tentar orientar as técnicas por padrões éticos ou subordiná-las a qualquer outro tipo de lógica, o que em outras palavras, leva a legitimação de seu uso qualquer que ele seja. Resumindo, técnica e uso que dela se faz coincidiriam. Caso contrário seria pretender que técnica deixasse de ser técnica.

A característica do universalismo é algo bem mais abrangente e se identifica com o próprio processo de universalização da tecnologia ocidental e pode ser vista sob dois aspectos diferentes, o geográfico e o qualitativo. O segundo aspecto sendo uma transformação que se opera sobre o primeiro. De uma maneira geral a técnica foi penetrando e se disseminando em todos os países, em todas as regiões do globo. Todos aqueles que não a desenvolveram nem a assimilaram na medida e na escala necessária só desejam e reivindicam fazê-lo. Esse processo levou todos os povos e

países a seguir um só caminho, embora existam enormes diferenças nos estágios seguidos por cada um deles. No entanto cada um segue a mesma trajetória.

Finalmente, examinemos a última característica da técnica que é a autonomia. Ela significa que a técnica tende a desvincular-se de todos os poderes, das forças ou instâncias tradicionais e tem suas próprias leis de desenvolvimento, sem nada respeitar que lhe seja estranho e hostil. Essa autonomia é algo prometeica em sua sede e exigência de poder infinito e dominação, torna-se uma força absoluta que se basta a si mesmo e independe de qualquer julgamento ético, estando situada além do bem e do mal. Não tolera o conflito com nenhum outro valor muito menos ser julgada por nenhuma instância. Torna-se assim um valor supremo. Todos os outros valores devem ser julgados em função dela e não ao contrário.

Tentamos reproduzir o mais fielmente que foi possível o núcleo central das idéias de Ellul contidas no livro acima mencionado. Embora seja avassalador o peso e o papel por ele atribuído à técnica na sociedade, ficamos sem saber que mecanismos internos e que contradições no interior dos objetos ou do fenômeno técnico movem este sistema. No entanto a obra de Ellul sobre a técnica deve ser estudada e principalmente respondida. Na realidade trata-se de uma trilogia. Além do livro citado, temos: *Le Système Technicien*, publicado em 1977 e *Le Bluff Technologique*, de 1988.

Em seu segundo livro sobre a técnica, de 1977, Ellul expande e aprofunda sua análise anterior feita mais de vinte anos atrás e passa a considerar a técnica como um sistema. Ele concorda que nos dias de hoje a técnica tem uma configuração que pode ser perfeitamente classificada como um sistema em sua acepção tradicionalmente aceita, muito embora tenha um conjunto de especificidades. Ao definir um sistema ele afirma: *Um sistema é um conjunto de elementos, uns em relação com outros de tal maneira que toda evolução de um deles provoca a evolução do conjunto e que toda modificação do conjunto repercute sobre cada elemento*<sup>18</sup>. Isto significa para ele uma rede de inter-relações. Além dessas considerações Ellul vê na composição desses elementos constituintes do sistema uma complexidade adicional. Alguns deles podem ser de natureza quantitativa e outros não. Assim, a rapidez nas mudanças de cada um dos fatores não é idêntica. Em outras palavras, o sistema possui seu processo e sua velocidade com relação às mudanças específicas que ocorrem entre suas partes. Uma outra característica que Ellul considera fundamental é que no interior do sistema técnico seus elementos apresentam uma certa aptidão preferencial a se combinarem entre eles antes de entrar em combinação com os fatores externos. Além de tudo, este

---

<sup>18</sup> Jacques Ellul, "Le Système Technicien", pg. 88, Editora le Cherche Midi, 2004, Paris.[186]

sistema se comporta nas inter-relações entre as partes diferentemente de muitos outros sistemas como os sistemas mecânicos, por exemplo, cuja dinâmica é repetitiva e inteiramente previsível. No sistema técnico as modificações que seus elementos sofrem modificam os outros elementos e, sua ação, nunca é repetitiva, mas constantemente inovativa. O sistema está em permanente evolução e nunca retorna a um estado no qual já esteve anteriormente <sup>19</sup>.

A terceira questão que passaremos a abordar é a que maior proximidade guarda com o estudo que fizemos. Trata-se de entender o processo de expansão do maquinismo, ou como também sugerimos no início deste capítulo de tentar responder aquelas indagações e que no fundo significa determinar as contradições e a dinâmica dessa expansão nos diversos contextos em que o conceito físico de trabalho foi se desenvolvendo. Como também já foi visto a expansão do maquinismo é o fato fundamental e característico da moderna sociedade capitalista industrial. Portanto faremos uso até o final deste capítulo das idéias desenvolvidas por Marx relativas ao tema e que aparecem principalmente no primeiro volume de sua obra fundamental: *O Capital*. Façamos, no entanto um breve parêntese.

Em 2005, Daniel Romero <sup>20</sup> publicou o livro: *Marx e a Técnica*, como resultado de uma dissertação de mestrado na UNICAMP, cujo principal mérito foi recolocar em discussão as idéias de Marx sobre as relações entre ciência, técnica, capital e relações de trabalho. Ele também faz um inventário meticuloso das obras de Marx dedicadas ao tema, da evolução de suas idéias e dos conceitos criados por Marx para estudar o problema. Uma contribuição interessante do livro de Romero é a *descoberta* e utilização dos manuscritos de Marx de 1861-1863.

Romero aponta, na obra mencionada, duas leituras feitas por Marx e que muito o influenciaram: *Somente em 1845, quando está em Bruxelas, é que Marx se aproxima do tema de uma forma que será fundamental para as suas concepções posteriores: inicia os estudos de “On the Economy of Machinery and Manufactures”, de Charles Babbage <sup>21</sup>, professor da Universidade de Cambridge, e de “Philosophy of Manufactures”, de Andrew Ure <sup>22</sup>, químico inglês. Ambos os livros são bastante*

---

<sup>19</sup> Ellul chama a atenção para o fato de um sistema técnico conter uma grande margem de probabilidade e de não se prestar a se fazer previsões de “invenções” técnicas, pois as previsões só serão possíveis em função de um estudo global, sendo um sistema muito mais difícil de se estudar do que os sistemas físicos, ecológicos, etc. Ele também adverte que não é útil fazer simulações em computador de um tal sistema sem antes construir uma teoria completa sobre ele.

<sup>20</sup> Daniel Romero, “Marx e a Técnica”, tendo como sub-título: “Um estudo dos Manuscritos de 1861-1863”, Editora Expressão Popular, 2005, S. Paulo. [187]

<sup>21</sup> Charles Babbage, “On the Economy of Machinery and Manufactures”. No presente estudo fizemos uso da tradução francesa: “Economie de Machines et des Manufactures”, Librairie du Dictionnaire des Arts et Manufactures, 1880, Paris. [188]

<sup>22</sup> Utilizamos também uma tradução francesa para o livro de Andrew Ure: “Philosophie des Manufactures et Economie Industrielle”, 1836, Bruxelas. [189]

representativos do período de expansão do maquinismo na Inglaterra. O livro de Babbage adquiriu enorme notoriedade não somente na Inglaterra e se relaciona diretamente com nosso tema e por isso faremos uma pequena incursão nele. Também teremos a oportunidade de verificar quais as discussões que nortearam os estudos de Marx além de podermos compará-las com o que vinha sendo desenvolvido pelos engenheiros politécnicos na França no mesmo período. O livro de Ure, embora contenha um longo capítulo dedicado inteiramente às questões da manufatura em geral, está praticamente voltado para a indústria têxtil britânica, mas também traz importantes informações sobre o parque industrial francês.

Charles Babbage, matemático inglês que inventou uma máquina de calcular, lançou em 1831, na Inglaterra, o livro já mencionado apresentando uma análise original sobre o desenvolvimento industrial na Inglaterra e também contém estatísticas e comparações entre as indústrias da Inglaterra e França. O livro com 460 páginas, escrito em linguagem simples e direta, é de fácil e agradável leitura, com capítulos curtos e objetivos, mas abrange um leque bastante amplo e bem variado de questões ligadas à manufatura, inclusive sobre a organização dos trabalhadores. Ele está dividido em duas partes: Economia das máquinas e Economia das manufaturas.

Na primeira parte, primeira página, Babbage resume seu objetivo com o livro afirmando que ele trata *do modo de ação das ferramentas e máquinas e, enfeixa um conjunto de considerações mecânicas próprias para que se possa avaliá-las*. Na segunda parte, ele *apresenta uma discussão aprofundada de várias questões de economia política e que estão ligadas ao sistema manufatureiro. Tratamos em seguida das condições de sucesso no emprego das máquinas e dos assuntos intimamente ligados com a organização interior e a existência dos grandes estabelecimentos industriais; finalmente estudamos suas relações com os interesses gerais da sociedade*. Ele encerra o livro analisando a influência da ciência no desenvolvimento futuro da indústria.

Obviamente não é nosso objetivo fazer um estudo em profundidade do livro de Babbage como fizemos com os *Princípios* de Lazare Carnot ou até mesmo com as obras de Navier, Coriolis e Poncelet. Objetivamos tão somente complementar nossa visão sobre as questões relativas ao conceito físico de trabalho, discutidas ao longo desta investigação, estendendo-as até a Inglaterra.

Um fato importante mencionado por Babbage é que a partir da queda de Napoleão (1815) as comunicações entre França e Inglaterra são restabelecidas após um longo período de guerras e somente assim seria possível fazer comparações entre seus parques industriais. Ele acrescenta que é justamente no período de 1820 a 1840 que se dá a generalização do parque manufatureiro na França e no continente. Alerta



ainda para a nascente América que dispõe de *imensos recursos e de um continente inteiro* e cuja posição já inquieta seus rivais na velha Europa. Deve ser lembrado que é no período que vai da virada do século XVIII para o XIX indo até as três primeiras décadas seguintes que se dá à incorporação do conceito físico de trabalho à economia conforme vimos no capítulo anterior. O livro de Babbage assume então uma importância muito grande e deve ser objeto de análise se quisermos aprofundar e enriquecer as conclusões a que chegamos nesta investigação.

Babbage trata especificamente do conceito físico de trabalho em uma máquina na pg. 17 quando afirma: *Se analisarmos as operações realizadas por uma fabricação industrial qualquer, vemos manifestamente que se trata sempre para o trabalhador e que ele não pode senão exercer um certo esforço ao longo de um caminho determinado, em razão da natureza desta operação. Estes dois elementos, esforço ao longo de um certo comprimento, caminho percorrido de uma natureza determinada, são precisamente eles que as máquinas têm por objeto efetuar mais economicamente do que pelo trabalho direto do homem, e de maneira a reduzir como conseqüência em uma proporção bem maior os custos de fabricação.* Sem definir ou mencionar o produto da força pelo deslocamento de seu ponto de aplicação como *trabalho* ele enfatiza que é esta quantidade que importa nas operações realizadas por uma máquina independente do trabalho humano na operação com a máquina. Também é esta mesma quantidade que deve ser otimizada do ponto de vista da redução dos custos de fabricação. Babbage não desenvolve nenhuma teoria de como esta otimização poderia ser feita, mas demonstra que é o conceito de trabalho o eixo em torno do qual giram as questões fundamentais da manufatura. Para ele o conceito de trabalho já está incorporado à economia.

Duas observações feitas por Babbage demonstram que ele estava a par do que ocorria na França e acompanhava as publicações dos engenheiros politécnicos franceses. Na pg. 18 ele referindo-se ao trabalho de uma máquina afirma: *tem sido provado pela experiência que na prática, tudo que se ganha em tempo é perdido em força*, proposição bastante conhecida na época e já enunciada por Lazare Carnot, como vimos anteriormente. No mesmo item, referindo-se aos grandes progressos no ensino da mecânica, ele cita os esforços de Poncelet neste sentido. Como vimos, Poncelet desincumbiu-se de uma tarefa a ele atribuída pelo governo francês de criar um curso de mecânica aplicada em Metz, sua terra natal.

No final do capítulo II, pg. 19, ele afirma: *Quando elevamos de um metro um peso de 1 kg, o esforço é, evidentemente, constantemente de 1 kg, também quando elevamos a dois metros; mas o efeito útil, o trabalho, aquilo que se paga, como dissemos, é evidentemente o dobro no segundo caso: é o produto do esforço pelo*

*caminho percorrido, pelo qual foi criada a unidade do quilômetro, todas as forças podendo ser calculadas em kilogramas e os comprimentos em metros.*

*É esta quantidade que permanece constante, exceto as perdas devidas aos atritos, de uma rodada a outra da máquina. O caminho percorrido e a força podem variar a cada instante, mas seu produto, o trabalho permanece sempre constante. São essas variações de esforços e de caminhos, que o braço do homem guiado por sua inteligência realiza sem quase se aperceber (após um longo aprendizado), que as máquinas têm por finalidade realizar de maneira a transformar quase gratuitamente as matérias primas em objetos úteis para nossas necessidades e nosso prazer. Algumas observações devem ser feitas. Em primeiro lugar Babbage em momento nenhum menciona a expressão força viva para designar o produto da força pelo deslocamento, apesar de ele estar se referindo à capacidade total da máquina em realizar trabalho. Isto significa que o trabalho já está separado da força viva e perfeitamente identificado como uma quantidade bem determinada o que não era verdade na mecânica de Lazare Carnot. Babbage também utiliza o mesmo esquema comum na época de medir a capacidade de uma máquina realizar trabalho fazendo-se o produto do peso que ela é capaz de elevar pela altura até a qual este peso é elevado. Finalmente, ele se refere a trabalho útil ou trabalho líquido. Em outras palavras, este trabalho dividido pelo trabalho total entregue à máquina vai fornecer o rendimento da mesma. Em suma, os conceitos, os esquemas comparativos, as preocupações com a eficiência e a redução dos custos de fabricação, são em tudo semelhantes tanto na Inglaterra quanto na França.*

Na segunda parte do livro de Babbage muitas questões que estiveram no centro de nossas discussões voltam ao debate. O capítulo XVIII que tem o sugestivo título: *Do preço em prata, considerado como medida do valor das coisas* podemos ler logo no início: *O preço em prata pago por um objeto qualquer, não pode nos oferecer senão uma comparação inexata dos diversos valores deste objeto, em diversas épocas e em diversos países; pois o ouro e a prata que servem para medir este preço estão sujeitos a variações como toda espécie de mercadoria e não oferecem de nenhuma maneira uma base constante que possa servir a comparações semelhantes. Esta base invariável, havíamos acreditado encontrar no preço médio de certas espécies de produtos brutos ou manufaturados.* Em seguida, e continuando a discussão da questão do valor a ser atribuído a uma dada mercadoria, ele enumera uma série de dificuldades em considerar o preço médio de alguns produtos brutos como quantidade invariável e que traduziria o valor procurado. Babbage acrescenta: *Após minhas próprias observações, que de todas as causas que podem influir sobre a*

*diminuição dos preços, a mais enérgica, sem nenhuma dúvida é a invenção de procedimentos de fabricação mais econômicos*<sup>23</sup>.

O problema que se colocava para Babbage era o mesmo com que se defrontaram na França os engenheiros politécnicos. Tratava-se de encontrar uma forma, material como algum tipo de mercadoria ou imaterial como o conceito de trabalho e que pudesse fazer a equivalência entre as mercadorias e conseqüentemente permitisse estabelecer um processo de troca no mercado. Os engenheiros politécnicos, como vimos, tentaram através dos conceitos da mecânica. Babbage continuará a procurá-lo na economia. Deve ser ressaltado que neste estágio de desenvolvimento já não tem muito sentido fazer-se a distinção entre o conceito físico de trabalho e o conceito econômico de trabalho. O conceito físico ao ser aplicado na economia adquire e incorpora características econômicas. Poderíamos então chamá-lo de conceito físico-econômico de trabalho. A questão central continua sendo como encontrar a equivalência. Para nós, no entanto, entender como isto aconteceu e que o conceito de trabalho saído da mecânica esteve no centro dos debates, é fundamental.

Babbage também percebe a relevância e o papel da técnica como o fator mais importante na diminuição dos preços. Ele continua em busca de uma forma que possibilitasse comparar as mercadorias e afirma: *De toda esta discussão resulta que não existe nenhuma matéria, nem mesmo nenhuma combinação feita com diversos produtos da indústria, que possa fornecer uma unidade invariável para estabelecer uma escala de comparações entre os valores de uma mesma mercadoria em diversas épocas. Malthus propôs tomar o trabalho feito em um dia por um trabalhador, para esta unidade a qual nós deveríamos referir todos os outros valores.* E ele continua: *Para comparações semelhantes, existe ainda um elemento que não é rigorosamente necessário, mas lança uma grande luz sobre a questão; é uma apreciação exata da quantidade de substâncias nutritivas consumidas ordinariamente pelo operário, comparando a quantidade indispensável para seu sustento diário com aquela que o pagamento de suas jornadas lhe permitirá comprar*<sup>24</sup>. As discussões sobre o problema do valor continuavam e Babbage recorrendo a Malthus traz para o debate o tempo de trabalho em uma jornada diária. Além disso, embora explore um viés energeticista, entra na questão central que é a remuneração do tempo de reprodução da força de trabalho. Marx desvendaria o mistério falando de um sobre-trabalho realizado pelo trabalhador o qual não é remunerado.

---

<sup>23</sup> Obra de Babbage já citada, pg. 188.

<sup>24</sup> Obra de Babbage já citada, pg. 190.

Outra questão relevante e que Babbage discute é a divisão do trabalho: *De todos os princípios da economia manufatureira, a mais importante talvez, é a divisão do trabalho entre os indivíduos que concorrem a confecção do produto manufaturado*<sup>25</sup>. E continua: *As causas primeiras das vantagens gerais que resultam da divisão do trabalho têm sido objeto de grande discussão entre os autores que se ocupam de economia política; contudo não me parece que a importância relativa da influência dessas diversas causas tenha sido apreciada em todos os casos, com a precisão necessária. Eu vou então oferecer uma exposição rápida dessas causas primeiras*<sup>26</sup>. Não entraremos no mérito desta discussão, mas tão somente registraremos a importância que Babbage atribui a ela.

Finalizando esta breve apreciação do livro de Babbage, devemos destacar que como os economistas clássicos ele também acreditava que a substituição dos trabalhadores por máquinas não aumentava o desemprego, pois ao baixar o preço das mercadorias haveria sempre a necessidade de um novo contingente deles para suprir este aumento de demanda<sup>27</sup>.

Esta era a situação e a pauta dos debates travados quando Marx entra em cena. Ele havia escrito os *Manuscritos Econômicos e Filosóficos*, publicados em 1844 e lido além dos livros de Babbage e Ure, já mencionados, a obra de Engels, principalmente *A Situação das Classes Trabalhadoras na Inglaterra*, que saiu em 1845 e se debruçou sobre os escritos econômicos de Jean Baptiste Say e Adam Smith.

Marx analisa a questão da ciência e da tecnologia dentro do quadro de contradições advindas da relação capital-trabalho, o que significa estudar a exploração dos trabalhadores pelos capitalistas, bem como, um método específico e aprimorado de extração de mais-valia relativa. A expansão do maquinismo é para ele uma forma de desvalorização do trabalho na medida em que reduz o preço das mercadorias em geral inclusive o da força de trabalho, como também consegue impor um ritmo e um controle maior sobre a produção. Em suma, a máquina impõe um tipo de racionalização capitalista visando a exploração e o domínio da produção. O tipo de racionalização imposta pela entrada da máquina na produção ganha na fase de industrialização acelerada do capitalismo uma forma específica de valorização do capital.

Essas observações preliminares significam chamar atenção para o fato que Marx recusa uma história geral ou universal da tecnologia que teria como objetivo

---

<sup>25</sup> Obra de Babbage já citada, pg. 198.

<sup>26</sup> Obra de Babbage já citada, pg. 199.

<sup>27</sup> Ver Cláudio Napoleoni: "Smith, Ricardo, Marx", Edições Graal, 6<sup>a</sup>. Edição, 1988, Rio de Janeiro. [190]

entender o seu desenvolvimento para além das formações sociais de cada época. Caso essa história geral existisse, acabaria por determinar em grande medida o próprio desenvolvimento histórico. Uma inversão e um equívoco que a nosso ver é cometido por Jacques Ellul e que compromete as brilhantes análises que ele faz sobre as técnicas. Outros autores também compartilham deste ponto de vista e que pretende encontrar no progresso tecnológico a causa do desenvolvimento geral da sociedade. Todas essas perspectivas diante do avanço científico e tecnológico partem da hipótese que existe uma neutralidade das forças produtivas em relação às relações de produção. Daí decorre uma outra concepção segundo a qual o desenvolvimento em geral e o progresso no campo da ciência e da tecnologia consistiriam em um contínuo aprimoramento das técnicas de produção independente das formações econômicas. Já a análise empreendida por Marx subordinando o desenvolvimento científico e tecnológico às formas específicas de produção econômicas significa que a superação do atual modo de produção capitalista implica em uma outra base material para a sociedade e conseqüentemente em uma outra forma de desenvolvimento tecnológico.

A análise de Marx sobre a maquinaria encontra-se no primeiro volume de *O Capital*, capítulo XIII, pg. 425. Ele começa com uma citação de John Stuart Mill: *É duvidoso que as invenções mecânicas feitas até agora tenham aliviado a labuta diária de algum ser humano* e observa que Mill teria dito de *algum ser humano que não viva do trabalho alheio* e completa: *as máquinas aumentaram certamente o número dos abastados ociosos*. Marx complementa seu raciocínio afirmando que quando o capital expande o maquinismo ele o faz com a finalidade de baratear as mercadorias e dessa forma diminuir a parte da jornada de trabalho dedicada pelo trabalhador a si mesmo. Ao proceder desta maneira ele estará ampliando a outra parte dessa mesma jornada a qual ele dá gratuitamente ao capitalista. A introdução e expansão do maquinismo é o meio mais eficiente de produzir e extrair mais-valia dos trabalhadores.

Do que foi visto, chegamos a conclusão que o método empregado por Marx para analisar a expansão do maquinismo na produção industrial pressupõe a existência de formas e relações específicas para as diferentes formações sociais sendo esperado e até natural que ele apresente essas especificidades durante as diversas fases do desenvolvimento industrial. Assim, ele analisa em detalhes em *O Capital*, a transição da manufatura para a indústria moderna e suas nuances deste processo. Ele sublinha que na manufatura o ponto de partida para revolucionar a produção é a força de trabalho enquanto que na indústria moderna é o instrumental de trabalho que se transforma de ferramenta manual em máquina e aproveita para estabelecer a diferença entre máquina e ferramenta. Antes, porém, ele define o que é uma máquina.

De forma semelhante aos engenheiros politécnicos franceses, a Babbage e muitos outros, Marx considera uma máquina como constituída de três partes: o motor, a transmissão e a máquina-ferramenta ou máquina de trabalho. Obviamente, o que ele chama de máquina-ferramenta não deve ser confundido com máquina-operatriz, mas simplesmente é a parte da máquina diretamente responsável pelo trabalho mecânico e que cumpre a finalidade para a qual ela foi projetada.

A partir do desenvolvimento da máquina Marx vai fazer uma análise original das diversas fases da Revolução Industrial. Segundo ele é a partir da ferramenta que tem início a Revolução. Além disso, a ferramenta é também responsável pela transformação de um ofício ou manufatura em exploração mecanizada. Isto é até certo ponto surpreendente, pois a maioria dos historiadores coloca no motor a transformação inicial ao substituir o esforço humano ou animal por uma fonte natural de suprimento de energia, com um lugar de destaque para a máquina a vapor<sup>28</sup>. Marx afirma: *Quando a ferramenta propriamente dita se transfere do homem para um mecanismo, a máquina toma o lugar da simples ferramenta. A diferença salta aos olhos mesmo quando o homem continua sendo o primeiro motor. O número de ferramentas em que o homem pode operar ao mesmo tempo é limitado pelo número de seus instrumentos naturais de produção, seus órgãos físicos.* E continua: *O número de ferramentas em que opera simultaneamente a máquina-ferramenta emancipa-se, desde o início da barreira orgânica que a ferramenta manual de um trabalhador não podia ultrapassar*<sup>29</sup>.

Sobre o papel da máquina a vapor Marx escreve: *A própria máquina a vapor na forma em que foi inventada no fim do século XVII, durante o período manufatureiro, e em que subsistiu até o começo da década dos 80 do século XVIII, não provocou nenhuma revolução industrial. Foi ao contrário, a criação das máquinas-ferramentas que tornou necessária uma revolução na máquina a vapor. Quando o homem passa a atuar apenas como força motriz numa máquina-ferramenta, em vez de atuar com a ferramenta sobre o objeto de trabalho, podem tomar seu lugar o vento, a água, o vapor, etc. e torna-se acidental o emprego da força muscular humana como força*

---

<sup>28</sup> T. S. Ashton em sua "Revolução Industrial", Publicações Europa-América, 2ª. Edição, pg. 93/94, referindo-se a máquina a vapor: "A nova forma de energia e os maquinismos de transmissão, pelos quais aquela fazia trabalhar máquinas antes acionadas pela força muscular, foram a via pela qual a indústria entrou na idade moderna. Outro autor e historiador conhecido é Paul Mantoux, que escreveu: "A Revolução Industrial no Século XVIII", Editora da Unesp/ Editora Hucitec. Ele afirma, na página 333: "Até então, a máquina a vapor não passava de uma bomba de fogo aperfeiçoada. Como tal era utilizada nas minas ou no serviço de águas. Com a invenção do movimento circular, tornou-se uma máquina motriz: seus usos, doravante, podiam multiplicar-se indefinidamente; todo o campo da indústria se abria para ela". E na página 339: "Esse fato capital, o advento da máquina a vapor, abriu a última e mais decisiva fase da revolução industrial. Liberando a grande indústria dos entraves que ainda pesavam sobre ela, o vapor possibilitou seu imenso e rápido desenvolvimento".[191,192]

<sup>29</sup> "O Capital", pg. 427.

motriz <sup>30</sup>. E continuando sua análise, Marx afirma: *A máquina da qual parte a revolução industrial substitui o trabalhador que maneja uma única ferramenta por um mecanismo que ao mesmo tempo opera com certo número de ferramentas idênticas ou semelhantes aquela, e é acionado por uma única força motriz, qualquer que seja sua forma. Temos então a máquina, mas ainda como elemento simples da produção mecanizada* <sup>31</sup>.

Na análise de Marx a própria máquina a vapor é revolucionada pelas constantes mudanças que ocorrem no sistema de ferramentas da máquina e que é impropriamente chamado de máquina-ferramenta, e, como vimos, é responsável pela parte operacional propriamente dita da máquina. Isto é que vai exigir um acionamento (motor) mais possante tendo que superar a capacidade humana em fazê-lo. Acrescente-se a isso a irregularidade própria do acionamento manual em termos das necessidades de um movimento uniforme e contínuo. A evolução nos sistemas de ferramentas leva a sua forma mais desenvolvida quando ele passa a compor um todo orgânico, e Marx o descreve da seguinte forma: *A produção mecanizada encontra sua forma mais desenvolvida no sistema orgânico de máquinas-ferramentas combinadas que recebem todos os seus movimentos de um autômato central e que lhes são transmitidos por meio do mecanismo de transmissão. Surge então, em lugar de uma máquina isolada, um monstro mecânico que enche edifícios inteiros e cuja força demoníaca se disfarça nos movimentos ritmados quase solenes de seus membros gigantescos e irrompe no turbilhão febril de seus inumeráveis órgãos de trabalho* <sup>32</sup>.

Para que houvesse uma expansão do maquinismo era necessário revolucionar a própria máquina e sua forma de utilização, antes constituindo uma unidade isolada movida por um único homem. Forma-se então um sistema de máquinas que se desenvolveu e cuja origem está na revolução ocorrida na ferramenta, mas que não pode atingir esse estágio antes da máquina a vapor substituir as forças motrizes encontradas. Essa é a verdadeira revolução provocada pela máquina a vapor, ou seja, ela propicia a entrada em cena de um sistema de máquinas. Marx caracteriza este processo da seguinte forma: *Além disso, em certo estágio de desenvolvimento, a indústria moderna entrou tecnicamente em conflito, com a base que possuía no artesanato e na manufatura. Ampliação crescente das dimensões do motor, do mecanismo de transmissão e das máquinas-ferramenta* <sup>33</sup>.

Essa é a dinâmica interna do processo de expansão do maquinismo, ou seja, quando ele é analisado do ponto de vista da fábrica ou de uma unidade de produção.

---

<sup>30</sup> "O Capital", pg. 428.

<sup>31</sup> "O Capital", pg. 429.

<sup>32</sup> "O Capital", pg. 435.

<sup>33</sup> "O Capital", pg. 436.

Quando observamos este processo e sua difusão pelos diversos ramos industriais vamos constatar que o mesmo induz uma revolução nos sistemas de transporte, comunicação e outros, promovendo com o tempo mudanças significativas não só na produção como um todo, mas em toda sociedade.

Para finalizar esta breve análise do terceiro tema proposto no início deste capítulo, voltemos à questão do valor, recorrendo pela última vez a Marx para que ele descreva como e quanto de valor uma máquina pode transferir ao produto. Ele afirma: *Do ponto de vista exclusivo de baratear o produto a aplicação da máquina deve conter-se dentro do limite em que sua própria produção exija menos trabalho que o que ela substitui com sua aplicação. Para o capital, entretanto, o limite é mais apertado. Uma vez que não paga o trabalho empregado, mas o valor da força de trabalho utilizada, a aplicação da maquinaria para o capital fica limitada pela diferença entre o valor da máquina e o valor da força de trabalho que ela substitui*<sup>34</sup>.

O modelo teórico desenvolvido por Marx para analisar o modo de produção capitalista, que é o objetivo central de sua obra maior continua tendo uma importância fundamental nos dias de hoje apesar das profundas transformações sofridas pelo capitalismo nestes quase cento e quarenta anos que nos separam da publicação de *O Capital*. Por uma razão muito simples. A base material sobre a qual o capitalismo repousa conserva as mesmas contradições da época de Marx além de lhe ter acrescentado outras tantas. O regime de exploração e apropriação do trabalho humano através do mecanismo da mais-valia, o sistema de apropriação individual (propriedade privada dos meios de produção) a despeito de uma produção socializada além de sua imensa capacidade destrutiva com relação à natureza e à vida no planeta.

As tentativas de atualizar as idéias de Marx, principalmente as que estão contidas em *O Capital*, consideram que o seu modelo teórico está baseado na existência de muitos capitais participando de um mercado concorrencial hipotético para onde eles afluem sendo por este fato que Marx afirma que a burguesia tem que revolucionar constantemente os meios de produção<sup>35</sup>. No capitalismo dito moderno o capital se concentrou, apareceram os trustes e cartéis e houve uma fusão do

---

<sup>34</sup> "O Capital", pg. 447.

<sup>35</sup> Cláudio Napoleoni, na obra já citada, pg. 141, afirma: "Isso significa que a multiplicidade de capitais, e daí a concorrência, constituem, na teoria de Marx, um traço essencial da realidade capitalista".



capital bancário com o capital industrial dando origem ao capital financeiro <sup>36</sup>. E no capitalismo globalizado deste último período o que salta aos olhos é o excessivo predomínio do capital financeiro a ponto de alguns economistas falarem em um novo modo de acumulação financeiro <sup>37</sup>. De qualquer forma a velha questão que tanto perseguia Marx continua a pairar sobre nossas cabeças não mais como um espectro que rondava a Europa, mas como uma necessidade de transformação da sociedade atual em escala planetária.

---

<sup>36</sup> V. I. Lênin em “Imperialismo Etapa Superior do Capitalismo”, Editora Centelha, Coimbra, 1974, pg. 24/25 afirma: “Há meio século, quando Marx escrevia o seu “Capital”, a livre concorrência aparecia à imensa maioria dos economistas como uma “lei da natureza”. A ciência oficial tentou matar, pela conspiração do silêncio a obra de Marx, a qual demonstrava, através de uma análise teórica e histórica do capitalismo, que a livre concorrência engendra a concentração da produção, a qual, atingindo um certo grau de desenvolvimento, conduz ao monopólio. Atualmente o monopólio tornou-se um fato”. E, referindo-se aos processos de fusão, Lênin observa na página 53: “Ao mesmo tempo desenvolve-se, por assim dizer, a união pessoal dos bancos e das grandes empresas industriais e comerciais, a fusão de uns com outros, pela compra de ações, pela entrada de diretores dos bancos nos conselhos fiscais (ou de administração) das empresas industriais e comerciais e vice-versa”. [193]

<sup>37</sup> François Chesnais, em seu livro “A Mundialização do Capital”, Xamã Editora, 1<sup>a</sup>. Edição, 1996, pg. 246, afirma: “O autor que, a partir dos fatos observados na década de 1860-1870, mais claramente percebeu a capacidade do capital monetário concentrado de viver às custas da esfera de criação de riqueza, foi Marx. Ele constata a formação de uma massa organizada e concentrada de capital-dinheiro que, ao contrário da produção real, está colocada sob controle dos banqueiros (livro III, Cap. XXV). Essa massa permite que esse capital deixe de ser simples elo da valorização do capital na produção industrial, para se constituir em força independente e ninho de acumulação de lucros financeiros”. [194]

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vatin F. **Le Travail: Économie et Physique 1780-1830**, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
- [2] Vatin F. **Le Travail, Sciences et Societé**, Éditions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 1999.
- [3] Vatin F. **Économie Politique et Économie Naturelle chez Antoine-Augustin Cournot**, Presses Universitaires de France, Paris, 1998.
- [4] Bowler P. J. **Evolution. The History of an Idea**, University of California Press, EUA, 1989.
- [5] Jaccard P. **História Social do Trabalho**, Vol I, Livros Horizonte, Coleção Movimento, Lisboa, 1974.
- [6] Barret F **Historia Del Trabajo**, Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina, 1975.
- [7] Anderson P. **Passagens da Antiguidade ao Feudalismo**, Editora Brasiliense, S. Paulo, 1991.
- [8] Labastida J. **Produccion, Ciência y Sociedade: de Descartes a Marx**, Siglo Veintiuno Edotores, México, 1978.
- [9] Alquié F. **Galileu, Descartes e o Mecanicismo**, Gradiva, Lisboa, 1987.
- [10] Marx K. **O Capital**, Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1968.
- [11] Bottomore T. **Dicionário do Pensamento Marxista**, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1988.
- [12] Friedmann G. **Problèmes Humains du Machinisme Industriel**, Gallimard, Paris, 1946.

- [13] Rosdolsky R. **Gênese e Estrutura de O Capital de Karl Marx**, Editoras Uerj e Contraponto, Rio de Janeiro, 2001.
- [14] Schimidt A **Le Concept de Nature chez Marx**, Presses Universitaire de France, Paris, 1994.
- [15] Leff E. **Epistemologia Ambiental**, Cortez Editora, S. Paulo, 2002.
- [16] Rubin I. I. **A Teoria Marxista do Valor**, Editora Polis, S. Paulo, 1987.
- [17] Vasquez A S. **Filosofia da Práxis**, Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1968.
- [18] Marx K, e Engels F. **Cartas sobre as Ciências de la Naturaleza y las Matemáticas**, Editorial Anagrama, Barcelona, Espanha, 1975.
- [19] Löwy M. **As Aventuras de Karl Marx contra o Barão de Munchhausen**, Editora Busca Vida, S. Paulo, 1987.
- [20] Löwy M. **Método Dialético e Teoria Política**, Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1975.
- [21] Marcuse H. **Razão e Revolução**, Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1978.
- [22] Benoit L. O **Augusto Comte: Fundador da Física Social**, Editora Moderna LTDA., S. Paulo, 2002.
- [23] Kolakowski L. **La Filosofia Positivista**, Ediciones Catedra S. A., Madri, 1988.
- [24] Hobsbawm E. J. **História do Marxismo**, 12 volumes, Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1980.
- [25] Anderson P. **Considerações sobre o Marxismo Ocidental**, Edições Afrontamento, Porto, Portugal, 1976.
- [26] Bodanis D.  **$E = m c^2$  : Uma Biografia da Equação que Mudou o Mundo e o que ela Significa**, Ediouro Publicações, Rio de Janeiro e S. Paulo, 2000.

- [27] Stachel J. **O Ano Miraculoso de Einstein**, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- [28] Lênin V. I. **Materialismo e Empirocriticismo**, Editorial Estampa, Lisboa, 1971.
- [29] Edição Especial da Scientific American, **O Passado e o Presente do Cosmos**, 2005.
- [30] Prigogine I. **Tempo, Caos e as Leis da Natureza**, Editora Unesp, S. Paulo, 1996.
- [31] Paraire P. **Autour d'Épicure**, Le Temps de Cérises, Paris, 1997.
- [32] Marx K. **Diferença entre as Filosofias da Natureza em Demócrito e Epicuro**, Editorial Presença, Lisboa, 1972.
- [33] Engels F. **Do Socialismo Utópico ao Socialismo Científico e Ludwig Feuerbach e o Fim da Filosofia Clássica Alemã**, Editora Fulgor, S. Paulo, 1962.
- [34] Marx K., e Engels F. **A Ideologia Alemã**, Editorial Presença, Lisboa, 1980.
- [35] Marx K. **Contribuição para a Crítica da Economia Política**, Editorial Estampa, Lisboa, 1971.
- [36] Cohen G. A **Karl Marx's Theory of History. A Defence**, Clarendon Press, Oxford, Inglaterra, 2000.
- [37] Marx K., e Engels F. **Manifesto Comunista**, Boitempo Editorial, S. Paulo, 1998.
- [38] Engels F. **Anti-Dühring**, Edições Afrodite, Lisboa, 1971.
- [39] Althusser L. **Análise Crítica da Teoria Marxista**, Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1967.
- [40] Fataliev K. **O Materialismo Dialético e as Ciências da Natureza**, Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1966.
- [41] Engels F. **Dialectics of Nature**, Progress Publishers, Moscou, 1966.

- [42] Gramsci A **A Concepção Dialética da História**, Editora Civilização Brasileira S. A, Rio de Janeiro, 1966.
- [43] Lefebvre H. **Le Materialisme Dialectique**, Quadrige/ Presses Universitaires de France, Paris, 1940.
- [44] Lukács G. **A Falsa e a Verdadeira Ontologia de Hegel**, Livraria Editora Ciências Humanas LTDA, S. Paulo, 1971.
- [45] Markus G. **A Teoria do Conhecimento no Jovem Marx**, Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1974.
- [46] Labica G. **As Teses sobre Feuerbach de Karl Marx**, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1990.
- [47] Lukács G. **Existencialismo ou Marxismo?**, Livraria Editora Ciências Humanas LTDA, S. Paulo, 1979.
- [48] Marx, K e Engels, F. **Selected Correspondence**, Progress Publishers, Moscou, 1965.
- [49] Piaget, J. **Biología y Conocimiento**, Siglo Veintiuno Editores, Madri, 1997.
- [50] Goldmann, L. **Ciências Humanas e Filosofia**, Difusão Européia do Livro, S. Paulo, 1970.
- [51] Löwy, M. **Ideologias e Ciência Social: Elementos para uma Análise Marxista**, Cortez Editora, S. Paulo, 1988.
- [52] da Silva, R. F. **História da Historiografia**, Editora da Universidade do Sagrado Coração, Bauru, S. Paulo, 2001.
- [53] Tétart, P. **Pequena História dos Historiadores**, Editora da Universidade do Sagrado Coração, Bauru, S. Paulo, 2000.
- [54] Heródotos. **História**, Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1988.

- [55] Tucídides. **História da Guerra do Peloponeso**, Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- [56] Políbios. **História**, Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- [57] Voltaire. **Elementos da Filosofia de Newton**, Editora da Unicamp, Campinas, S. Paulo, 1996.
- [58] Goldmann, L. **Origem da Dialética: A Comunidade Humana e o Universo em Kant**, Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1967.
- [59] Matos, C. F. O. **A Escola de Frankfurt**, Editora Moderna, Coleção Logos, S. Paulo, 1993.
- [60] Slater, P. **Origem e Significado da Escola de Frankfurt**, Biblioteca de Ciências Sociais, Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1978.
- [61] Iggers, G. G. **La Ciência Histórica en el Siglo XX**, Idea Books, S. A., Barcelona, 1998.
- [62] Kragh, H. **An Introduction to the Historiography of Science**, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 1989.
- [63] Bernal, J. D. **História Social de la Ciência**, Ediciones Península, Barcelona, 1973.
- [64] Lefebvre, H. **Methodologie des Sciences**, Anthropos, Paris, 2002.
- [65] Darwin, C. **A Origem das Espécies e a Seleção Natural**, 5<sup>a</sup>. Edição, Hemus Editora Limitada, S. Paulo.
- [66] Blanché, R. **A Epistemologia**, Editorial Presença, Lisboa, 1983.
- [67] Mach, E. **The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development**, 9<sup>th</sup> Edition, The Open Court Publishing Company, Illinois, USA, 1960.
- [68] Ostwald, W. **Klassiker der Exakten Naturwissenschaften**, Leipzig, 1889.

- [69] Stern, F. **The Varieties of History**, Vintage Books, N. York, 1973.
- [70] Os Pensadores. **Augusto Comte, Vida e Obra**, Editora Nova Cultural, S. Paulo, 1991.
- [71] Fédi, L. **Comte**, Le Belles Lettres, Figures du Savoir, Paris, 2000.
- [72] Solis, C. **Alexandre Koyré**, Ediciones Paidós, Instituto de Ciências de la Educacion, Barcelona, 1994.
- [73] Bouveresse, R. **Le Rationalisme Critique de Karl Popper**, Ellipses Édition Marketing S.A., Paris, 2000.
- [74] Kuhn, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**, Editora Perspectiva, S. Paulo, 1975.
- [75] Kuhn, T. S. **A Revolução Copernicana**, Edições 70, Lisboa, 1957.
- [76] Kuhn, T. S. **La Tension Esencial**, Editora Fondo de Cultura Economica, México, 1996.
- [77] Paty, M. **Le Caractère Historique de l'Adéquation des Mathématiques à la Physique**, Encontro franco-espanhol sobre história das matemáticas, Madri, 1991.
- [78] Paty, M. **La Notion de Grandeur et la Légitimité de la Mathématisation en Physique**, Segunda Jornada de Filosofia das Ciencias Jean Largeault, Paris, 1999.
- [79] Petitot, J. **Idealités Mathématiques et Réalité Objective**, Seminário de Epistemologia das Matemáticas, Paris, 1990.
- [80] Newton, I. **La Méthode des Fluxions et des Suites Infinies**, traduzido para o francês por M. de Buffon, Livraria Científica e Técnica Albert Blanchard, Paris, 1994.
- [81] Newton, I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural**, Livro I, Edusp, Editora da Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 2002.

- [82] Truesdell, C. **Essays in the History of Mechanics**, Springer-Verlag Editora, Berlim, 1983.
- [84] Edição especial da Scientific America dedicada às **Fronteiras da Física**.
- [85] d'Espagnat, B. e Klein, E. **Regards sur la Matière**, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1993.
- [86] Nussenzveig, H. M. **Complexidade & Caos**, Editora UFRJ/COPEA, Rio de Janeiro, 1999.
- [87] Mlodinow, L. **A Janela de Euclides**, Geração Editorial, S. Paulo, 2004.
- [88] Nidditch, P. H. **El Desarrollo de la Lógica Matemática**, Ediciones Cátedra, S. A., Madri, 1995.
- [89] Nagel, E. et alli. **Le Théorème de Gödel**, Éditions du Seuil, Paris, 1989.
- [90] Heath, T. L. **The Thirteen Books of the Elements**, Dover Publications, Inc., N. York, 1956.
- [91] Descartes, R. **Principes de la Philosophie**, Vol. 9, p. 1-362.
- [92] Descartes, R. **La Geometrie**, Éditions Jacques Gabay, reimpressão autorizada pelas Edições Hermann, Paris, 1991.
- [93] Jullien, V. **Descartes: La Geometrie de 1637**, Presses Universitaires de France, Paris, 1996.
- [94] Parkinson, G. H. R. **Philosophy and Logic**, The Cambridge Companion to Leibniz, pp. 199-223, Cambridge University Press, California, EUA, 1995.
- [95] Ross, G. M. **Leibniz**, Edições Loyola, S. Paulo, 2001.
- [96] Thuiller, P. **De Arquimedes à Einstein**, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1994.



- [97] Cohen, I. B. e Westfall, R. S. **Newton - Textos, Antecedentes, Comentários**, Contraponto Editora LTDA e Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 86, Rio, 2002.
- [98] Thom, R. **Parábolas e Catástrofes: entrevista sobre matemática, ciência e filosofia**, Publicações Don Quixote, Lisboa, 1985.
- [99] Conche, M. **Lucrèce et l'Épreuve**, Éditions de Mégare, Paris, 1981.
- [100] Drake, S. **Galileo at Work: His Scientific Biography**, Dover Publication, Inc, N. York, 1978.
- [101] Leopold, J. H. **L'Invention par Christiaan Huygens du Ressort Spiral Régulant pour les Montres**, artigo publicado em "Huygens et la France", Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1982.
- [102] Paty, M. **A Matéria Roubada**, Edusp, Editora da Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 1988.
- [103] Forti, A. et alli. **La Mort de Newton**, artigo de Ilya Prigogine intitulado "Irréversibilité et Instabilité des Systèmes Complexes", p. 107, Maisonneuve et Larose, Paris, 1996.
- [104] Harman, P. M. **Energy, Force and Matter: The conceptual development of Nineteenth-Century Physics**, Cambridge University Press, UK, EUA, 1982.
- [105] Leibniz, G. W. **Escritos de Dinâmica**, Editorial Tecnos, S. A., Madri, 1991.
- [106] d'Alembert, J. L. **Traité de Dynamique**, 2 Vol., Gauthier-Villars et Cie Éditions, Paris, 1921.
- [107] Oliveira, A. R. E. **Revisitando o Princípio de d'Alembert**, COBEM 2001, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG., 2001.
- [108] da Vinci, L. **Anotações de da Vinci por ele mesmo**, Madras Editora, S. Paulo, 2004.

- [109] Kahane, E. **Lavoisier, Pages Choiesies**, Éditions Sociales, Paris, 1974.
- [110] Blondel, C. **Histoire de l'Électricité**, p. 116, Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris, 1994.
- [111] Lindsay, R. B. **The Concept of Energy and its Early Historical Development**, pp. 12, Brown University, Pennsylvania, EUA, 1975.
- [112] Dugas, R. **A History of Mechanics**, Dover Publications, Inc., N. York, 1988.
- [113] Aristote. **La Physique**, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1999.
- [114] Duhem, P. **Les Origines de la Statique**, 2 Vol., pp. 5-121, Paris,
- [115] Huygens, C. **Horologium Oscilatorum**, traduzido do latim por Jean Peyroux, Librairie Albert Blanchard, Paris, 1673.
- [116] Oliveira, A. R. E. **The Contribution of Coulomb to Applied Mechanics**, Proceedings HMM 2004 Symposium, Kluwer Academic Publishers, p. 217-226.
- [117] Witkowski, N. **Uma História Sentimental das Ciências**, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 2004.
- [118] Séris, J. P. **Machine et Communication: Du Théâtre des Machines a la Mécanique Industrielle**, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1987.
- [119] Fourier, J. B. P. **Memoire sur la Statique Contenant la Démonstration du Principe des Vitesses Virtuelles et la Théorie des Moments**, Journal de l'École Polytechnique, 5ème cahier, Paris, 1798.
- [120] Poincot, L. **La Théorie Générale de l'Équilibre et du Mouvement des Systèmes**, Édition Critique et Commentaires par Patrice Bailhache, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1975.
- [121] Heath, T. L. **The Works of Arquimedes**, Dover Publications, Inc., N. York, 2002.

- [122] Lagrange, J. L. **Mécanique Analytique**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1989.
- [123] Gueroult, M. **Leibniz, Dynamique et Métaphysique**, Aubier Editions Montaigne, Paris, 1967.
- [124] **Actes de la Journée Maupertuis**, Creteil 1973, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1975.
- [125] de Maupertuis, P. L. M. **Accord des Différents Lois de la Nature qui Avaient Jusqu'ici Paru Incompatibles**, Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris, 1744.
- [126] Moreira, I. C. **Maupertuis e o Princípio da Mínima Ação**, Publicação do Instituto de Física da UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.
- [127] Planck, M. **A Survey of Physical Theory**, Dover Publication, Inc., N. York, 1993.
- [128] Atkins, P. **Galileo's Finger**, Oxford University Press, U.K., 2003.
- [129] Locqueneux, R. **Prehistoire & Histoire de la Thermodynamique Classique, (Une Histoire de la Chaleur)**, No. 45, Decembre 1996, Librairie A. Blanchard, Paris, 1996.
- [130] Faraday, M. **A História Química de uma Vela**, Editora Contraponto, Rio de Janeiro, 2003.
- [131] Taton, R. **La Science Contemporaine**, Quadrige, PUF, Paris, 1995.
- [132] Fourier, J. B. P. **Théorie Analytique de la Chaleur**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1988.
- [133] Carnot, S. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1990.
- [134] Les Genies de la Science: **Einstein**, Maio 2002- Agosto 2002, Edições do CNRS.

- [135] Colin, L. G. **De la Maquina de Vapor al Cero Absoluto**, Fondo de Cultura Economica, México, D. F., 2003.
- [136] Poincaré, H. **La Valeur de la Science**, Flammarion, Paris, 1970.
- [137] Russel, B. **História da Filosofia Ocidental**, 3 Vol., Companhia Editora Nacional, S. Paulo, 1967.
- [138] Corbisier, R. **Introdução à Filosofia-** Tomo II- Parte Segunda, Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1988.
- [139] Kuhn, T. S. **A Revolução Copernicana**, Edições 70, Ltda., Lisboa, 1957.
- [140] Geymonat, L. **Galileu Galilei**, Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1997.
- [141] Ronan, C. A. **A Ciência no Século XX**, IV Volume de História Ilustrada da Ciência, Universidade de Cambridge, 1987.
- [142] Einstein, A . **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**, Contraponto, Rio de Janeiro, 1999.
- [143] Mason, S. F. **La Ciencia del Siglo XX**, Aliança Editorial, Madri, Espanha, 1986.
- [144] Brennan, R. **Gigantes da Física**, Jorge Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1998.
- [145] Dalmenico, A. D. **Mathematisations: Augustin-Louis Cauchy et l'Ecole Française**, Editions du Choix, Librairie Scientifique Albert Blanchard, Paris, 1992.
- [146] Dalmenico, A. D. e Peiffer, J. **Une Histoire des Mathématiques**, Éditions du Seuil, Paris, 1986.
- [147] Eves, H. **Introdução à História da Matemática**, 2ª. Edição, Editora da Unicamp, Campinas, S. Paulo, 1997.
- [148] Leibniz, G. G. **Oeuvre Concernant le Calcul Infinitesimal**, Traducido do latim para o francês por Jean Peyroux, Librairie Albert Blanchard, Paris, 1983.

- [149] Fraser, C. G. **Lagrange's Analytical Mathematics, its Cartesian Origins and Reception in Comte's Positive Philosophy**, *Stu. Hist. Phil. Sci.*, Vol. 21, No. 2, pp. 243-256, 1990.
- [150] Koetsier, T. & Blauwendraat, H. **The Archimedean Screw-pump: a note on its invention and development of the theory**, HMM200 Symposium, Cassino, Itália, 2004.
- [151] Gama, R. **História da Técnica e da Tecnologia**, Editora da Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 1985.
- [152] Lilley, S. **Hombres, Maquinas y Historia**, Editorial Ciencia Nueva S. L., Madri, 1965.
- [153] Vadée, M. **Marx Penseur du Possible**, Meridean klinchsieck, Paris, 1992.
- [154] Mota, C. G. **A Revolução Francesa**, Editora Àtica S. A., S. Paulo, 1989.
- [155] Fridberg, A. **Sadi Carnot, Physician et les "Carnot" dans l'Histoire**, La pensée universelle, Paris, 1978.
- [156] Rashed, R. **Sciences a l'Epoque de la Revolution Française (Recherches Historiques)**, Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard., Paris, 1988.
- [157] Gillispie, C. C. et Youschkevitch, A. P. **Lazare Carnot Savant et sa Contribution a la Théorie de l'Infini Mathématique**, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1979.
- [158] Charnay, J. P. **Lazare Carnot ou Le Savant-Citoyen**, Presses de l'Université de Paris-Sorbonne, Paris, 1990.
- [159] Locke, J. **Ensaio Acerca do Entendimento Humano**, Coleção Os Pensadores, Abril Cultural, S. Paulo, 1973.
- [160] Coulomb, C. A. **Théorie des Machines Simples**, Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard, Paris, 2002.

- [161] Coriolis, G. G. **Du Calcul de l'Effet des Machines**, Carilian-Goeury, Librairie, Paris, 1829.
- [162] Poncelet, J. V. **Introduction a la Mécanique Industrielle**, troisième édition, Gauthier-Villars, Imprimeur- Librairie, Paris, 1870.
- [163] Merlet, J. P. **A Note on the History of Trigonometric Functions and Substitutions**, Proceedings HMM 2004, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [164] Coriolis, G. G. **Théorie Mathématique des Effets du Jeu de Billard**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1990.
- [165] Coriolis, G. G. **Sur le Principe des Forces Vives dans le Mouvements Relatifs des Machines**, Journal de l'École Polytechnique, vingt-unième cahier, tome XIII, Paris, 1832.
- [166] Koetsier, K. **A Note on Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843)**, Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China, 2003.
- [167] Poncelet, J. V. **Mémoire sur les Roues Hydrauliques a Aubes Courbes**, Second Mémoire, Librairie de Me. Ve. Thiel, Place St. Jacques, No. 4, Metz, 1827.
- [168] Poncelet, J. V. **Notice sur l'Introduction à la Mécanique Industrielle et sur le Cours de Mécanique Appliquée aux Machines**, Gauthier-Villars, Paris, 1874.
- [169] Say, J. B. **Tratado de Economia Política, Coleção Os Economistas**, Editor Victor Civita, S.Paulo, 1983.
- [170] **Revista do CNAM**, No. 42, Dezembro de 2004, Paris.
- [171] Ampère, A. M. **Théorie Mathématique des Phénomènes Electro-Dynamiques Uniquement Déduite de l'Éxperience**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1823.
- [172] Crowe, M. J. **A History of Vector Analysis**, Dover Publications, Inc., N. York, 1993.

- [173] Grange, J. **La Philosophie d'Auguste Comte**, Presses Universitaires de France, Paris, 1996.
- [174] Leff, E. **Complexidade, Interdisciplinaridade e Saber Ambiental**, artigo publicado em "Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais", pg. 19, Signus Editora, S. Paulo, 2000.
- [175] Bachelard, G. **A Formação do Espírito Científico**, Editora Contraponto, 4ª. reimpressão, Rio de Janeiro, 1996.
- [176] Rossi, P. **Os Filósofos e as Máquinas**, Editora Schwarcz Ltda., S. Paulo, 1989.
- [177] Simondon, G. **L'Invention dans les Techniques**, Editions du Seuil, Paris, 2005.
- [178] Pedretti, C. **Leonardo: The Machines**, Editora Giunti, Florença, Itália, 1999.
- [179] Jung, J. **Le Travail**, Editora Flammarion, Paris, 2000.
- [180] Anais do Seminário de **História da Ciência e da Tecnologia**, B. Horizonte, 2005.
- [181] Galilei, G. **Discurso sobre as Duas Novas Ciências**, Museu de Astronomia e Ciências Afins, Rio de Janeiro, 1988.
- [182] Koyré, A. **Galileu e Platão**, Editora Gradiva, Portugal.
- [183] de Oliveira, B. J. **Francis Bacon e a Fundamentação da Ciência como Tecnologia**, Editora da UFMG, B. Horizonte, 2002.
- [184] Thuillier, P. **Au Commencement Etait la Machine**, La Recherche, pg. 47, Janeiro de 1976.
- [185] Ellul, J. **A Técnica e o Desafio do Século**, Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1968.

- [186] Ellul, J. **Le Système Technicien**, La Cherche Midi, Paris, 2004.
- [187] Romero, D. **Marx e a Técnica**, Editora Expressão Popular, S. Paulo, 2005.
- [188] Babbage, C. **Economie des Machines et des Manufactures**, Librairie du Dictionnaire des Arts et Manufactures, Paris, 1880.
- [189] Ure, A. **Philosophie des Manufactures et Economie Industrielle**, Bruxelas, 1836.
- [190] Napoleoni, C. **Smith, Ricardo, Marx**, Editora Graal, 6a. Edição, 1988.
- [191] Ashton, T. S. **Revolução Industrial**, Publicações Europa-América, 2ª. Edição, Lisboa.
- [192] Mantoux, P. **A Revolução Industrial no Século XVIII**, Editora UNESP.
- [193] Lênin, V. I. **Imperialismo Etapa Superior do Capitalismo**, Editora Centelha, Coimbra, 1974.
- [194] Chenais, F. **A Mundialização do Capital**, Xamã Editora, 1ª. Edição, 1996.



## BIBLIOGRAFIA PRIMÁRIA

- [54] Heródotos. **História**, Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1988.
- [55] Tucídides. **História da Guerra do Peloponeso**, Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- [56] Políbios. **História**, Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- [65] Darwin, C. **A Origem das Espécies e a Seleção Natural**, 5<sup>a</sup>. Edição, Hemus Editora Limitada, S. Paulo.
- [80] Newton, I. **La Méthode des Fluxions et des Suites Infinies**, traduzido para o francês por M. de Buffon, Livraria Científica e Técnica Albert Blanchard, Paris, 1994.
- [81] Newton, I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural**, Livro I, Edusp, Editora da Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 2002.
- [90] Heath, T. L. **The Thirteen Books of the Elements**, Dover Publications, Inc., N. York, 1956.
- [91] Descartes, R. **Principes de la Philosophie**, Vol. 9, p. 1-362.
- [92] Descartes, R. **La Geometrie**, Éditions Jacques Gabay, reimpressão autorizada pelas Edições Hermann, Paris, 1991.
- [93] Jullien, V. **Descartes: La Geometrie de 1637**, Presses Universitaires de France, Paris, 1996.
- [105] Leibniz, G. W. **Escritos de Dinâmica**, Editorial Tecnos, S. A., Madri, 1991.
- [106] d'Alembert, J. L. **Traité de Dynamique**, 2 Vol., Gauthier-Villars et Cie Éditions, Paris, 1921.
- [108] da Vinci, L. **Anotações de da Vinci por ele mesmo**, Madras Editora, S. Paulo, 2004.

- [113] Aristote. **La Physique**, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1999.
- [115] Huygens, C. **Horologium Oscilatorum**, traduzido do latim por Jean Peyroux, Librairie Albert Blanchard, Paris, 1673.
- [119] Fourier, J. B. P. **Memoire sur la Statique Contenant la Démonstration du Principe des Vitesses Virtuelles et la Théorie des Moments**, Journal de l'École Polytechnique, 5ème cahier, Paris, 1798.
- [120] Poinsot, L. **La Théorie Générale de l'Équilibre et du Mouvement des Systèmes**, Édition Critique et Commentaires par Patrice Bailhache, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1975.
- [121] Heath, T. L. **The Works of Arquimedes**, Dover Publications, Inc., N. York, 2002.
- [122] Lagrange, J. L. **Mécanique Analytique**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1989.
- [125] de Maupertuis, P. L. M. **Accord des Différents Lois de la Nature qui Avaient Jusqu'ici Paru Incompatibles**, Mémoires de l'Academie des Sciences de Paris, 1744.
- [130] Faraday, M. **A História Química de uma Vela**, Editora Contraponto, Rio de Janeiro, 2003.
- [132] Fourier, J. B. P. **Théorie Analytique de la Chaleur**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1988.
- [133] Carnot, S. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1990.
- [142] Einstein, A. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**, Contraponto, Rio de Janeiro, 1999.
- [148] Leibniz, G. G. **Oeuvre Concernant le Calcul Infinitesimal**, Traducido do latim para o francês por Jean Peyroux, Librairie Albert Blanchard, Paris, 1983.

- [159] Locke, J. **Ensaio Acerca do Entendimento Humano**, Coleção Os Pensadores, Abril Cultural, S. Paulo, 1973.
- [160] Coulomb, C. A. **Théorie des Machines Simples**, Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard, Paris, 2002.
- [161] Coriolis, G. G. **Du Calcul de l'Effet des Machines**, Carilian-Goeury, Librairie, Paris, 1829.
- [162] Poncelet, J. V. **Introduction a la Mécanique Industrielle**, troisième édition, Gauthier-Villars, Imprimeur- Librairie, Paris, 1870.
- [164] Coriolis, G. G. **Théorie Mathématique des Effets du Jeu de Billard**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1990.
- [165] Coriolis, G. G. **Sur le Principe des Forces Vives dans le Mouvements Relatifs des Machines**, Journal de l'École Polytechnique, vingt-unième cahier, tome XIII, Paris, 1832.
- [167] Poncelet, J. V. **Mémoire sur les Roues Hydrauliques a Aubes Courbes**, Second Mémoire, Librairie de Me. Ve. Thiel, Place St. Jacques, No. 4, Metz, 1827.
- [168] Poncelet, J. V. **Notice sur l'Introduction à la Mécanique Industrielle et sur le Cours de Mécanique Appliquée aux Machines**, Gauthier-Villars, Paris, 1874.
- [169] Say, J. B. **Tratado de Economia Política**, Coleção Os Economistas, Editor Victor Civita, S.Paulo, 1983.
- [171] Ampère, A. M. **Théorie Mathématique des Phénomènes Electro-Dynamiques Uniquement Déduite de l'Éxperience**, Éditions Jacques Gabay, Paris, 1823.
- [181] Galilei, G. **Discurso sobre as Duas Novas Ciências**, Museu de Astronomia e Ciências Afins, Rio de Janeiro, 1988.

[188] Babbage, C. **Economie des Machines et des Manufactures**, Librairie du Dictionnaire des Arts et Manufactures, Paris, 1880.

[189] Ure, A. **Philosophie des Manufactures et Economie Industrielle**, Bruxelles, 1836.