



JOSÉ ROBERTO SERRA MARTINS

**A INTRODUÇÃO DA EXPERIENCIAÇÃO E DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA – A
TERMOQUÍMICA DO LANÇADOR TERMODINÂMICO DE PROJÉTEIS NO
ENSINO DE QUÍMICA**

**CAMPINAS
2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE QUÍMICA**

JOSÉ ROBERTO SERRA MARTINS

**A INTRODUÇÃO DA EXPERIENCIAÇÃO E DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA – A
TERMOQUÍMICA DO LANÇADOR TERMODINÂMICO DE PROJÉTEIS NO ENSINO DE
QUÍMICA**

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ DE ALENCAR SIMONI

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
AO INSTITUTO DE QUÍMICA DA UNICAMP PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM QUÍMICA
NA ÁREA DE FÍSICO-QUÍMICA.**

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA POR
JOSÉ ROBERTO SERRA MARTINS, E ORIENTADA PELO PROF.DR. JOSÉ DE ALENCAR
SIMONI.**

Assinatura do Orientador

**CAMPINAS
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Química
Simone Lucas Gonçalves de Oliveira - CRB 8/8144

M366e Martins, José Roberto Serra, 1965-
A introdução da experiencição e da história da ciência : a termoquímica do lançador termodinâmico de projéteis no ensino de química / José Roberto Serra Martins. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: José de Alencar Simoni.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química.

1. Ensino de Química. 2. Experiencição. 3. História da ciência. 4. Termoquímica. 5. Termodinâmica. I. Simoni, José de Alencar. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: The introduction of experiencing and the history of science : the thermochemistry of thermodynamics projectile launcher in the chemistry teaching.

Palavras-chave em inglês:

Chemistry Teaching

Experiencing

History of science

Thermochemistry

Thermodynamics

Área de concentração: Físico-Química

Titulação: Mestre em Química na área de Físico-Química

Banca examinadora:

José de Alencar Simoni [Orientador]

Rogério Custodio

Eugenio Maria de França Ramos

Data de defesa: 31-07-2014

Programa de Pós-Graduação: Química

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos que
acreditam na possibilidade de existir,
no Brasil, educação pública de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Venho aqui agradecer a todos aqueles que contribuíram, de um modo ou de outro, para o sucesso deste trabalho:

- Ao meu avô José Gonçalves Martins (Zeca) e à minha avó Blandina Silva Serra, pela chance de aprender sempre mais;
- Aos meus pais, Oneida e Roberto, por seu suporte de amor e afeto incondicional;
- À minha filha Maria Eduarda, por, desde sempre, me orientar no caminho da compreensão;
- Ao meu amor, Ana Cecília, por me ajudar com as correções necessárias, tanto na dissertação, quanto nos aspectos mais importantes de minha vida;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. José de Alencar Simoni (Cajá), por sua orientação e amizade;
- Aos membros da Qualificação, Prof. Dr. Pedro da Cunha Pinto Neto (FE-Unicamp) e Prof. Dr. Rogério Custódio (IQ-Unicamp), pela dedicação na leitura e pelas contribuições decisivas nesta etapa tão fundamental;
- Aos membros da banca de Mestrado, por estarem comigo em tão importante momento, notadamente ao Prof. Dr. Eugenio Maria de França Ramos (Unesp) por suas contribuições e pela percepção em transformar um brinquedo em um instrumento didático;
- Aos meus amigos Marcelo Eduardo Fonseca Teixeira e Guilherme Blasi Cruz, por acreditarem que um trabalho interdisciplinar pode, por sinergia, levar à formação de novas concepções científicas;
- Aos meus amigos das escolas em que trabalhei/trabalho, por fazer da sala dos professores, um excelente local para discussões sobre a Química e seu ensino;
- Aos alunos que participaram deste processo, por sua paciência em montar, alegria em fazer funcionar e seriedade ao responder as avaliações aqui analisadas;
- Aos meus antigos alunos; por acreditarem que, um dia, o LTP daria bons frutos;

- A todos os meus amigos que, de um modo ou de outro, são verdadeiros irmãos, estando ao meu lado nas horas boas (e nas não tão boas): Marcão, Zé Antônio, Chiquinho, Roberto, Guilherme, Osvaldo, Carlson, Juliana, Saulo, Daniel e os saudosos Luís Coppi Júnior e Ronaldo Tuccori, além de tantos outros que, comigo, compartilharam saberes e risos;
- Aos amigos do Diretoria de Segurança do Trabalho do Instituto de Química da Unicamp, por sua dedicação em resolver as vicissitudes que apareceram na fase final deste trabalho (coleta de assinaturas, liberação de emissão de malote, ligar o projetor no teto do auditório etc.): Débora, Edson, Marcelo e Elisabeth; aproveito para estender este mesmo agradecimento aos amigos da Secretaria de Pós-Graduação: Izabel, Miguel e Gabriela.
- Aos atuais companheiros do Instituto Federal de São João da Boa Vista, Menoti, Glauber, Eduardo, Wilson, Viriato e Joel, pelo apoio e substituições decorrentes dos afastamentos para seminários e congressos;
- Aos meus amigos de infância, dos locais em que morei e do colégio em que estudei, pela melhor viagem que já fiz: a da minha vida.

CURRICULUM VITAE

JOSÉ ROBERTO SERRA MARTINS

Formação Acadêmica/Titulação

- 2011 – 2014 Mestrado em Físico-Química, na linha de pesquisa Ensino de Química.
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas – SP, Brasil
Título: A introdução da experientiação e da história da ciência – a termoquímica do lançador termodinâmico de projéteis no ensino de Química.
Orientador: Prof. Dr. José de Alencar Simoni
- 2011 – 2013 Especialização em Gestão de Organizações Públicas
Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos – SP, Brasil.
Título: A influência do terceiro espaço nas relações interpessoais em uma instituição pública de ensino.
Orientadora: Prof. Dra. Daniela Maria Xavier de Souza e Lima
- 2008 – 2010 Mestrado em História e Ensino de Ciências da Terra.
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas – SP, Brasil
Título: Plataforma continental jurídica: incorporação ao território nacional e ao ensino de Geociências
Orientador: Prof. Dr. Celso Dal Ré Carneiro
- 2007 – 2011 Bacharelado em Antropologia e Licenciatura em Ciências Sociais
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas- SP, Brasil
- 1998 – 2002 Licenciatura em Geografia
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas- SP, Brasil
- 1996 – 1997 Especialização em Administração Hoteleira
Grande Hotel SENAC, Águas de São Pedro – SP, Brasil.
Título: A implantação de um Hotel*** no Município de Limeira – SP.
Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Lopes Pontes Barreto
- 1993 – 1997 Licenciatura em Ciências Biológicas
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas- SP, Brasil
- 1985 – 1990 Bacharel e Licenciatura em Química
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas- SP, Brasil
- 1984 – 1991 Graduação em Engenharia Química
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas- SP, Brasil

Extensão Universitária

- 1986 – 1988 Monitor de Graduação de Química Geral (QG 101) e Termodinâmica I (EQ 314)
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas- SP, Brasil

Capítulos de livros publicados

MARTINS, J.R.S.; CARNEIRO, C.D.R. Fisiografia da margem continental. In: HASUI, Y; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. (org.) *Geologia do Brasil*. 1. ed. São Paulo: Beca, 2012. 900p. ISBN: 978-85-62768-10-1 (capítulo 27).

MARTINS, J.R.S. Construindo o conhecimento químico por meio de uma metodologia poscolonialista. In: PEREIRA, E.M.A.; CELANI, G; GRASSI-KASSISSE, D.M. (org.) *Inovações Curriculares: Experiências no Ensino Superior*. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2011. 565p. ISBN: 978-85-77131-36-5 (volume 1)

Artigo publicados

MARTINS, J.R.S.; CARNEIRO, C.D.R. Plataforma continental jurídica, recursos do pré-sal e ensino de Geociências. *Terrae*. (Campinas. Impresso), v. 9, p. 61-109, 2012.

MARTINS, J.R.S.; GONÇALVES, P.W.; CARNEIRO, C.D.R. O ciclo hidrológico como chave analítica interpretativa de um material didático em Geologia. *Ciência & Educação* (UNESP. Impresso), v. 17, p. 365-382, 2011.

Trabalhos científicos apresentados em congressos internacionais:

CARNEIRO, C.D.R.; MARTINS, J.R.S. Plataforma continental jurídica no ensino de Geociências *Anais...* II Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa. Porto: Faculdade de Ciências, 18-24 jul. 2014.

MARTINS, J.R.S. Ensino de Geociências: uma experiência contra hegemônica para a construção da democracia. *Caderno de Resumos...* Colóquio Internacional de Epistemologias do Sul. Coimbra: Centro de Estudos Sociais, 10-12 jul. 2014.

MARTINS, J.R.S.; CARNEIRO, C.D.R. Teaching and learning in Geosciences for Citizenship: from the margins of knowledge to the central tasks of forming teachers. Athens: ATINER's Conference Paper Series, 19-22 maio 2014. No: EDU2014-1249. ISSN: 2241-2891

MARTINS, J.R.S.; CARNEIRO, C.D.R. Quando o céu é o limite: cinema catástrofe e ensino de Geociências. *Anais...* I Congresso Iberoamericano de Investigación en Enseñanza de las Ciencias – VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Campinas: FE/Unicamp, 5-9 set. 2011.

Trabalhos científicos apresentados em congressos nacionais:

MARTINS, J.R.S.; CARNEIRO, C.D.R. Geociências e interdisciplinaridade: hipóteses sobre o 'desaparecimento' de uma ilha em pleno Golfo do México. IV Seminário Inovações em Atividades Curriculares. Campinas, Unicamp, 21-22 out.2013

MARTINS, J.R.S.; SIMONI, J.A. Lançador termodinâmico de projéteis: a história das ciências e a interdisciplinaridade físico-química. IV Seminário Inovações em Atividades Curriculares. Campinas, Unicamp, 21-22 out.2013.

A INTRODUÇÃO DA EXPERIENCIAÇÃO E DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA – A TERMOQUÍMICA DO LANÇADOR TERMODINÂMICO DE PROJÉTEIS NO ENSINO DE QUÍMICA

José Roberto Serra Martins

Orientador: Prof. Dr. José de Alencar Simoni

Instituto de Química – UNICAMP – Caixa Postal 6154 – CEP 13083-970

Campinas – São Paulo – Brasil

RESUMO

Experimentos interdisciplinares constituem importante instrumento de ensino/aprendizagem. Partindo-se de um roteiro estruturado, realizou-se uma série de ensaios com o Lançador Termodinâmico de Projéteis (LTP); constatou-se, por meio desta, a necessidade de se transformar a experimentação em experiencição, de roteiro semiestruturado. Esta mudança poderia levar os estudantes a construir/compreender o conceito basilar de energia, os processos de transferência e as perdas de energia ocorridas durante os ensaios, tomando por fundamento princípios termoquímicos e termodinâmicos e estudando-os de modo conjunto. Realizando atividades no contraperíodo com os alunos, logo se percebeu a dificuldade destes em entender certos aspectos do procedimento semiestruturado, o que nos levou a iniciar o processo de experiencição com uma aula teórica sobre máquinas térmicas e outros aspectos relevantes da História das Ciências. Visando determinar se o processo de experiencição e a aula ministrada exerciam alguma influência sobre o processo de ensino/aprendizagem, dividiu-se o grupo de alunos em três: o primeiro grupo (G1) – de controle – não participou da experiencição nem da aula, respondendo à questão relativa ao assunto na avaliação bimestral dissertativa obrigatória a partir de saberes construídos/obtidos durante as aulas regulares; o segundo grupo (G2) que, de todo o processo, apenas não participou da aula teórica no contra-período e o terceiro grupo (G3) que cumpriu todas as etapas do processo. Constatou-se que a aula teórica e a mudança do tipo de roteiro propiciaram a ampliação dos elementos de cognição, constituindo-se, assim, em fatores facilitadores para a aprendizagem, o que pode ser sugerido pelo desempenho médio dos alunos de cada um dos grupos.

THE INTRODUCTION OF EXPERIENCING AND THE HISTORY OF SCIENCE – THE TERMOCHEMISTRY OF THERMODYNAMICS PROJECTILE LAUNCHER IN THE CHEMISTRY TEACHING

José Roberto Serra Martins

Advisor: Prof. Dr. José de Alencar Simoni

Chemistry Institute – State University of Campinas – UNICAMP

P.O. Box 6154 – Zip Code 13083-970 – Campinas – São Paulo – Brazil

ABSTRACT

Interdisciplinary experiments are an important tool for teaching / learning. Beginning with a structured script, we carried out a series of tests with Projectile Launcher Thermodynamic (LTP); it was found by means of this, the need to transform the trial into experiencing of semi-structured. This could lead students to build / understand the basic concept of energy transfer processes and energy losses occurring during the tests, taking as basis thermochemical and thermodynamic principles and studying them in a joint manner. Performing activities in another period with students soon realized the difficulty in understanding these certain aspects of semi-structured procedure, which led us to begin the process of experiencing with a lecture on heat engines and other relevant aspects of the history of science. To determine whether the process of experiencing and classroom instruction exerted some influence on the process of teaching / learning, divided the students into three groups: the first group (G1) – control group - did not participate in class or experiencing, answering the question on the subject in compulsory Essay bimonthly review from knowledge built / obtained during regular classes; the second group (G2) that the whole process, not only participated only in the lecture period on the counter and the third group (G3) who fulfilled all stages of the process. It was noted that the theoretical class and change the type of script enabled the expansion of the elements of cognition, constituting thus on factors that facilitate learning, which may be suggested by the average performance of students in each group.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xix
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. SISTEMATIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	3
1.2. PROBLEMATIZAÇÃO DOS RESULTADOS	5
1.3. EXPERIENCIAÇÃO & HISTÓRIA	6
1.3.1. REQUISITANDO AUXÍLIO DA HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS	6
1.3.2. DA EXPERIMENTAÇÃO À EXPERIENCIAÇÃO	9
1.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA	11
CAPÍTULO 2 UMA BREVE HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS.....	15
2.1. AS MÁQUINAS TÉRMICAS	17
2.2. MÁQUINAS TÉRMICAS MODERNAS	19
2.2.1. PRÉ-REQUISITOS À COMPREENSÃO DAS MÁQUINAS A VAPOR	19
2.2.2. AS CONTRIBUIÇÕES DE PAPIN, SAVERY E NEWCOMEN	20
2.2.3. AS CONTRIBUIÇÕES DE WATT.....	22
2.3. A EVOLUÇÃO CONCEITUAL DE ENERGIA	26
2.3.1. AS CONTRIBUIÇÕES DO CONDE DE RUMFORD	26
2.3.2. AS CONTRIBUIÇÕES DE CARNOT	28
2.3.3. AS CONTRIBUIÇÕES DE JOULE	30
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O TEMA	32
CAPÍTULO 3 DA EXPERIMENTAÇÃO À EXPERIENCIAÇÃO.....	35
3.1. A EXPERIMENTAÇÃO.....	35
3.1.1. ROTEIRO ESTRUTURADO ORIGINAL	36
3.2. A EXPERIENCIAÇÃO	39
3.2.1. MODIFICAÇÕES AO ROTEIRO ORIGINAL	40
3.2.2. JUSTIFICANDO A MUDANÇA DO ROTEIRO	44
CAPÍTULO 4 NARRANDO AVALIAÇÕES	47
4.1. AVALIANDO AS CONCEPÇÕES DOS ALUNOS NO INÍCIO DO PROCESSO DE ENSINO/APRENDIZAGEM (PE/A)	48
4.2. AVALIANDO A CONSTRUÇÃO DE NOÇÕES AO LONGO DO PE/A	49
4.3. AVALIANDO AS NOÇÕES CONSTRUÍDAS AO “FINAL” DO PE/A	51
CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE AVALIAÇÃO	57
5.1. RESULTADOS OBTIDOS com O ROTEIRO SEMIESTRUTURADO	57
5.2. OS RESULTADOS OBTIDOS PELO ROTEIRO ESTRUTURADO	60
5.3. OS RESULTADOS OBTIDOS NA AVALIAÇÃO BIMESTRAL	67

CAPÍTULO 6 DISCUSSÕES CIENTÍFICO-PEDAGÓGICAS	71
6.1. SOBRE A AULA TEÓRICA.....	71
6.2. SOBRE A EXPERIMENTAÇÃO/EXPERIENCIAÇÃO.....	73
6.2.1. O FUNCIONAMENTO DO LTP	73
6.2.2. A PRÁTICA DE ROTEIRO ESTRUTURADO.....	78
6.2.3. A PRÁTICA DE ROTEIRO SEMIESTRUTURADO	80
6.3. SOBRE A AVALIAÇÃO BIMESTRAL	87
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICES (A.1.)	101
A.1.1. FOGO E LUZ: DA PRÉ-HISTÓRIA À IDADE MÉDIA.....	101
A.1.1.1. NO ALVORECER DOS TEMPOS	101
A.1.1.2. FIAT LUX	105
A.1.1.3. FOGO E LUZ NAS 'TREVAS'	110
A.1.2. TEMPERATURA: DA SENSÇÃO À MENSURAÇÃO	116
A.1.2.1. REVOLUÇÃO CIENTÍFICA E MUDANÇA PARADIGMÁTICA	116
A.1.2.2. O TERMOSCÓPIO	120
A.1.2.3. TERMÔMETROS E ESCALAS TERMOMÉTRICAS RELATIVAS	122
A.1.3. FLUIDOS INTANGÍVEIS DO UNIVERSO MECÂNICO	128
A.1.3.1. O SURGIMENTO DAS TEORIAS FLUIDO-DEPENDENTES	129
A.1.3.2. OS FLUIDOS EM SEUS PRIMÓRDIOS	130
A.1.3.3. O CONCEITO DE FLUIDEZ	132
A.1.3.4. A FLUIDEZ DO CAPITAL	133
A.1.3.5. O(S) FLUIDO(S) ELÉTRICO(S).....	133
A.1.3.6. O FLUIDO MAGNÉTICO	135
A.1.3.7. FLOGÍSTO: O FLUIDO QUÍMICO	137
A.1.3.8. CALÓRICO: UM FLUIDO ESPECIAL.....	139
A.1.3.9. OS FLUIDOS INTANGÍVEIS PERDEM PRESTÍGIO	142
ANEXO (A.2.)	145
A.2.1. INTRODUÇÃO	146
A.2.2. RESUMO TEÓRICO PRELIMINAR.....	146
A.2.3. MONTAGEM DO LANÇADOR	148
A.2.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E DE CÁLCULOS	151

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura	página
1: Detalhe da máquina a vapor com dois cilindros (J. Watt, 1769).	24
2: Representação esquemática da máquina a vapor (J. Watt, 1769).	25
3: Esquema geral de funcionamento de uma máquina térmica	29
4: Representação pictórica do experimento de Joule	31
5: Modelo de nível (bolha de precisão) semelhante ao utilizado no experimento	43
6: LTP semelhante ao modificado pelo grupo N da segunda turma de 2013	85
7: <i>Os Quatro Elementos</i> (1472).	109
8: Castiçal da Catedral de Gloucester (c.1104-13).	112
9: Reprodução do termoscópio de Galileu	121
10: Parte da carta enviada por Castelli a Cesarin (1638).	122
11: Termômetro de Drebbel (1626).	123

LISTA DE TABELAS

Tabela	página
1: Altura máxima (H _{max}), altura média (H _{med}) atingida pelo projétil e respectivo desvio médio (D _m) dos ensaios das equipes que utilizaram 0,15 mL (A) ou 0,30 mL (B) de etanol hidratado como combustível	58
2: Altura máxima (H _{max}), altura média (H _{med}) atingida pelo projétil e respectivo desvio-médio (D _m) de ensaios das equipes que utilizaram 0,15 mL de etanol hidratado (C) ou etanol absoluto (D) como combustível	58
3: Altura máxima (H _{max}), altura média (H _{med}) atingida pelo projétil e respectivo desvio médio dos ensaios utilizaram 0,15 mL de etanol hidratado, deixando 2 mm (Equipe E) ou 5 mm (Equipe F) como espaçamento entre os fios do ignitor piezelétrico.	58
4: Altura máxima (H _{max}), altura média (H _{med}) e respectivos desvios médios (D _m) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL (Equipe G) ou 0,30 mL (Equipe H) de etanol hidratado como combustível.	59
5: Altura máxima (H _{max}), alturas médias (H _{med}) e respectivos desvios médios (D _m) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL de etanol hidratado (equipe I) ou etanol absoluto (equipe J) como combustível.	59
6: Altura máxima (H _{max}), altura média (H _{med}) e respectivos desvios médios (D _m) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL de etanol hidratado e deixando 2 mm (equipe K) ou 5 mm (equipe L) de distância entre as pontas dos fios do ignitor piezelétrico.	60
7: Altura máxima (H _{max}), altura média (H _{med}) e respectivos desvios médios (D _m) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL de etanol hidratado e fixando um único tubo à tampa (equipe M) ou aumentando o volume (equipe N).	60
8: Número de alunos, médias das avaliações, variância das notas das avaliações para o grupo controle (G1), grupo em que os alunos não tiveram aula sobre a História das Ciências (G2) e grupo que participou das três fases do experimento (G3).	67
9: Massa de solução de etanol aspergido, a 26°C, em tubos com tampa e cujo conjunto havia sido previamente tarado.	75
10: Massa do tubo plástico, em gramas, que funciona como projétil do LTP.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPI	Equipamento de Proteção Individual
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
LTP	Lançador Termodinâmico de Projéteis
PE/A	Processo de Ensino/Aprendizagem
PVC	Policloreto de Vinila
SOE	Serviço de Orientação Educacional
SP	Estado de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Altura máxima	H _{max}
Altura média	H _{med}
Calor cedido	Q _c
Desvio médio	D _m
Entalpia da reação de combustão	ΔH _c
Graduação alcoólica, em graus Gay-Lussac.	°GL
Rendimento	η
Temperatura, em Celsius	°C
Temperatura termodinâmica da fonte fria	T _f
Temperatura termodinâmica da fonte quente	T _q
Trabalho	W

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Para entender meu interesse em levar os alunos a construírem conceitos basilares, como o de energia, inicio esta dissertação por uma breve *periodização* – técnica analítica que tem por meta mostrar a importância do Lançador Termodinâmico de Projéteis (LTP) como recurso didático. Esta técnica não costuma ser utilizada em trabalhos científicos, que são iminentemente *objetivos*. Na periodização, elencar/escolher períodos representativos é uma tarefa *subjetiva* que depende, exclusivamente, de seu realizador.

Nesta periodização, destacam-se quatro fases distintas:

1. O primeiro período (2001-2006), que denominei *Sistematização do Experimento*, se estende do aparecimento do LTP à apresentação do trabalho intitulado “*Lançador de projéteis: a termodinâmica numa perspectiva interdisciplinar*” durante a LVIII Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), em Florianópolis (julho de 2006). Nesta fase, Teixeira, Ramos e Cruz ampliaram as perspectivas do LTP, transformando um experimento didático de Física – voltado prioritariamente para a investigação de conceitos desta disciplina, exemplarmente energia potencial e mecânica – em outro de caráter interdisciplinar que está baseado em conceitos caros à Físico-química (Primeira Lei da Termodinâmica) e que visa proporcionar entendimento sobre importantes aspectos desta e da Termoquímica.
2. O período seguinte (2007-2009), que intitulei de *Problematização dos Resultados*, é marcado pela aplicação de ensaios baseados em um roteiro estruturado presente ao Anexo desta dissertação. Neste período, do qual faço parte como professor colaborador, os alunos, trabalhando no contra-período escolar, construíram seu próprio LTP, realizaram o experimento, completaram os espaços relativos ao roteiro de estudos (Anexo), levaram para casa as

questões que necessitavam de pesquisa específica (notadamente as últimas do roteiro). Eles também responderam questões relativas aos conceitos termoquímicos e termodinâmicos nas avaliações bimestrais dissertativas. Apesar da presença de itens que instigam a pesquisa e abordam aspectos basilares da ciência, como a conversão de uma modalidade de energia em outra e das possíveis causas da baixa eficiência do LTP, o interesse dos alunos pelo tema e o desempenho destes nas provas foi considerado muito abaixo do esperado.

3. O terceiro período (2010-2012), no qual atuo como professor responsável pela mediação didática da experiência e por ministrar aulas de Química em cursos regulares de escolas públicas e particulares do Estado de São Paulo, é marcado pela transformação do roteiro, de estruturado para semiestruturado e pela introdução de uma aula sobre a História das Ciências como pré-requisito aos ensaios práticos a serem realizados pelos alunos. Chamado de *Experienciação & História*, o terceiro período se destaca pelo aumento relativo do desempenho dos jovens nas provas bimestrais dissertativas; isto, se pudéssemos comparar as notas obtidas pelos estudantes do triênio 2007-2009 (período de *Problematização dos Resultados*), com as do triênio seguinte (2010-2012). Posteriormente, compreendeu-se que este tipo de comparação era subjetivo, não contribuindo para qualquer tipo de discussão ou problematização posterior sobre o conhecimento científico.
4. No último período (2012-2013), resolveu-se dividir as classes em três partes, submetê-las a diferentes condições de ensino e comparar seus resultados¹. Intitulado de *Avaliação Comparativa*, o período é caracterizado pela busca de informações que pudessem

¹ Esse procedimento, que poderia ser encarado como uma “crueldade educacional” por privar os alunos de atividades educativas, foi corrigido posteriormente, uma vez que todos os alunos passaram a ter acesso tanto à aula sobre a História das Ciências como à experiencição.

revelar se o processo de ensino/aprendizagem (PE/A) se tornava mais significativo: (1) inserindo a aula de História e Filosofia das Ciências antes da experiencição; (2) apenas mantendo a experiencição de roteiro semiestruturado; ou (3) considerando ambos os fatores. Para tal, compararam-se os resultados médios do desempenho dos alunos dos três grupos no que tange às questões presentes à avaliação bimestral dissertativa obrigatória. Mesmo sabendo que as questões dificilmente revelariam se a aprendizagem ocorreu de modo efetivo², elas poderiam nos dar uma pista a respeito da ampliação dos elementos de cognição como fatores facilitadores da aprendizagem e construção conceitual.

Para entender melhor os fatos dessa história que envolve os aspectos didáticos relativos à utilização o LTP, passo a esmiuçar cada um dos períodos, de modo a esclarecer as decisões dos professores responsáveis pelos ensaios ao longo dos anos, bem como a entender suas motivações e as consequências das mudanças propostas.

1.1. SISTEMATIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Na infância de muitas crianças existem grandes histórias sobre festas juninas. Quando nos lembramos de nossas próprias infâncias, percebemos que, ainda meninos, durante as festas de junho, sempre aprontávamos alguma ‘arte’, detonando rojões, morteiros ou bombinhas de pólvora. Uma dessas brincadeiras consistia em colocar uma bombinha sob uma lata metálica emborcada no solo e constatar até que altura ela subia após a detonação do explosivo.

Partindo desta concepção inicial, Teixeira decidiu fazer um pequeno canhão de brinquedo utilizando material reciclável (ou de baixo custo) e fácil aquisição. Este artefato lúdico, até hoje chamado afetivamente por seu criador de “canhãozinho”, ganhou uma versão mais sofisticada, passando a ser denominado,

² Neste trabalho, a menção à “aprendizagem significativa” não diz respeito ao construto teorizado por David Paul Ausubel [1918-2008].

tecnicamente, por *Lançador Termodinâmico de Projéteis* (LTP).

A fim de cumprir os quesitos de segurança, Teixeira substituiu: (1) a lata de metal emborcada no solo por um tubo plástico de filme fotográfico (e, posteriormente, por dois pedaços de cano PVC – *policloreto de vinila*) montado sobre um suporte de madeira; (2) a detonação da pólvora por um combustível que não oferecesse tantos riscos de acidentes; (3) a chama de um palito de fósforo (com a qual se acendia o pavio da bombinha) por um ignitor piezelétrico – obtido a partir de um isqueiro – e dois pedaços de fio.

Este experimento foi realizado para um público formado por alunos de graduação, professores dos ensinos médio e fundamental nas tardes dos dias 22, 24 e 25 de março de 2003, durante o XV Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), realizado em Curitiba, (PR). Nesta oficina didática, Teixeira e Ramos demonstraram o potencial deste instrumento, fazendo-o exclusivamente no âmbito do ensino de Física, uma vez que as variáveis analisadas e avaliadas eram a altura máxima atingida pelo projétil, o cálculo da energia potencial e do trabalho realizado.

Teixeira e Ramos não apenas propuseram o estudo conjunto da termodinâmica e do lançamento de projéteis, assuntos tratados de forma independente no ensino de Física no nível médio, como discutiram esses assuntos concomitantemente à construção de conceitos físicos fundamentais, como energia e trabalho. Mais que isso, os autores destacaram a importância deste experimento na formação de professores, uma vez que o processo de construção levava à interação do construtor com o material a ser construído, ampliando a formação conceitual do construtor (TEIXEIRA e RAMOS, 2003).

Os testes iniciais para a seleção do combustível realizados com fluido de isqueiro, gasolina e querosene não foram promissores. A quantidade de energia liberada na queima desses combustíveis era tão grande para o objetivo pretendido que, a cada detonação, o tubo plástico ou se fundia parcialmente ou sofria rompimento, o que impedia de reutilizá-lo em uma nova tentativa. Somente com a realização dos primeiros testes com etanol comercial (96°GL) é que se chegou a um líquido capaz de impulsionar o tubo plástico para o alto sem lhe causar qualquer tipo

de dano³.

Definido o combustível e a sequência de montagem do LTP, Teixeira passou a utilizar o artefato em suas aulas de Termodinâmica com finalidades didáticas. Principiou pela elaboração um roteiro que permitisse obter informações relativas ao lançamento de projéteis e, com estes, calcular o trabalho (W) realizado pelo tubo plástico.

Nos anos seguintes, Eugenio Ramos incluiu o roteiro estruturado de construção do LTP em uma disciplina obrigatória para o curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual Paulista *Júlio de Mesquita Filho* (UNESP), em Rio Claro, de modo a estimular os alunos a elaborarem novos experimentos, tomando por base materiais com as mesmas características dos utilizados⁴.

Em 2006, visando ampliar os horizontes conceituais desse experimento, Teixeira passou a questionar os alunos sobre as perdas de energia envolvidas, pois estas afetavam diretamente a eficiência do LTP. Com a ajuda do professor Guilherme Cruz, modificou o roteiro do experimento, dando-lhe características interdisciplinares. Com o cálculo da energia de combustão (ΔH_c) fornecida por valores tabelados de entalpia de formação de cada um dos reagentes e produtos, e com a quantidade estimada de etanol e oxigênio presentes no interior do tubo plástico no instante imediatamente anterior à reação, os alunos puderam estimar as perdas de energia durante o processo.

1.2. PROBLEMATIZAÇÃO DOS RESULTADOS

No triênio 2007/2009, quando tal experimento foi levado a termo em uma escola da rede particular da cidade de Campinas (SP), percebeu-se que a maioria dos alunos apresentava empenho suficiente visando seguir à risca o procedimento experimental, tanto no que concerne à montagem do LTP quanto à execução dos ensaios em si. Entretanto, quando se pedia aos estudantes que explicitassem,

3 Os testes aqui citados para seleção do combustível a ser utilizado no LTP inspiraram a mudança procedimental a ser mostrada no item 1.2 e discutida no Capítulo 6.

4 Entre as consequências mais interessantes que resultaram desse trabalho inicial, destaco ainda o trabalho “*A usina pedagógica: experimentos didáticos de baixo custo para o ensino de física no museu dinâmico de energia elétrica da usina-parque do Corumbataí (SP)*”, também apresentado na 58ª. Reunião Anual da SBPC (Florianópolis, julho de 2006).

durante as avaliações bimestrais dissertativas obrigatórias, as relações existentes entre os princípios termoquímicos e termodinâmicos envolvidos nos ensaios, a maioria simplesmente não era capaz de analisar o experimento de modo integrado.

Apesar de muitos deles se saírem relativamente bem quando as questões formuladas envolviam conceitos exclusivamente físicos *ou* químicos, tal comportamento parecia sugerir que a interação entre as disciplinas envolvidas (Física e Química) necessitava de uma habilidade que os alunos aparentemente não possuíam – talvez pelo fato de os saberes terem sido adquiridos de modo desconexo e/ou estanque. Como, então, resolver tal problema?

Por volta de 2010, eu buscava informações sobre o ensino de ciências, quando passei a me interessar por autores (MATTHEWS, 1994, 2009; HODSON, 2009) que defendiam a utilização da História e Filosofia das Ciências (HPS, do inglês *History and Philosophy of Science*) como importante instrumental para a consecução de metas do processo de ensino/aprendizagem (PE/A) em Ciências. Os autores não só afirmavam que a presença de aspectos históricos motivava os alunos a buscarem maiores informações científicas, como também os incentivava a pensar na Ciência como sendo passível de construção, fosse esta individual ou coletiva.

1.3. EXPERIENCIAÇÃO & HISTÓRIA

Visando superar o obstáculo descrito, passou-se a ministrar, antes da execução dos ensaios, uma aula que relacionava os conceitos experimentais e a gênese científico-filosófica dos mesmos sob o prisma da História. Nesta época, eu participava do projeto como professor colaborador. Por ser professor de Química de algumas das turmas do colégio em que se aplicou o experimento interdisciplinar, eu não apenas ajudava na fase da montagem e coleta dos dados, como também estava preocupado em saber se a aprendizagem conceitual era significativa ou não.

1.3.1. REQUISITANDO AUXÍLIO DA HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS

Os ensaios realizados pelos alunos podiam ser divididos em duas etapas distintas: na primeira, montavam o LTP; a seguir, utilizando um roteiro estruturado, usavam o artefato na obtenção da altura máxima atingida pelo projétil. Ao realizarem

a primeira dessas etapas, os estudantes quase sempre reclamavam do tempo gasto para construírem o artefato a partir das peças recebidas. Entretanto, notava-se que os problemas que por ventura surgiam eram prontamente partilhados entre os elementos de diversos grupos de trabalho na intenção de passarem, da forma mais rápida possível, para a fase seguinte, ou seja, eles passaram a notar que esta problematização também se constituía em importante momento de aprendizagem.

A seguir, liam o roteiro estruturado no que concerne ao procedimento a ser utilizado para se conseguir a altura máxima, em metros, atingida pelo tubo plástico. Dessa forma, poderiam obter a energia potencial equivalente ao trabalho (W) realizado pelo tubo, no momento em que ocorre a inversão do movimento. Deve-se lembrar que os alunos já estavam devidamente informados sobre o fato de que, nesse ponto, a energia cinética se igualava a zero e a energia mecânica do corpo se restringia à energia potencial (tal como afirmado no roteiro).

Feita a parte prática, os alunos – divididos em trios e, eventualmente, em quartetos – passavam a confeccionar o relatório, tomando por base o roteiro (cuja estrutura era semelhante à de estudo dirigido⁵) que os auxiliava a pensar em cada um dos aspectos e conceitos envolvidos, partindo do cálculo do trabalho realizado (W) do tubo plástico na altura máxima e comparando-a com o calor cedido pela combustão, o qual era equivalente à variação de entalpia da reação de combustão (ΔH_c). O rendimento (η) do LTP dada pela relação $\eta = W/\Delta H_c$ revelava valores muito baixos, o que causava surpresa à maioria dos alunos.

Apesar da rapidez com que a maioria dos alunos montava o LTP, realizava a parte experimental e concluía o relatório (cerca de 150 minutos, em média), a quase totalidade dos alunos não compreendia o porquê de certos cálculos/conceitos serem tão fundamentais ao entendimento do ensaio. Causava-lhes estranhamento desde o cálculo do volume do tubo plástico (muitos alunos simplesmente afirmavam não conhecer ou não lembrar a fórmula capaz de determinar o volume de um cilindro) até a importância da composição média do ar atmosférico (que determinaria a existência de um reagente limitante). Os estudantes

5 No final desta dissertação (Anexo), encontra-se a segunda versão desse roteiro, impressa e reformulada em 2008 pelos autores e disponível também em DVD.

também relatavam dificuldades relacionadas aos cálculos estequiométricos, tão necessários à obtenção da energia cedida pela reação.

Para fazer com que os jovens compreendessem aspectos conceituais importantes, relacionando conceitos termoquímicos e termodinâmicos de maneira integrada, duas reformulações se fizeram necessárias: (1) passou-se a ministrar uma introdução sobre a História das Ciências (uma aula de 100 minutos) e (2) elaborou-se um novo roteiro, semiestruturado, que transformava a experimentação em experientiação, cuja descrição será apresentada no item 1.2. A intenção de tal mudança no roteiro tinha por meta levar os alunos a refletirem sobre os fundamentos teóricos que embasam a experiência, podendo propor mudanças no LTP capazes de aumentar a altura máxima atingida pelo projétil.

Interessante notar que as reformulações sugeridas levaram os alunos a entender que a sequência proposta no roteiro não apenas visa reproduzir a cronologia histórica das descobertas; elas também fazem com que os jovens simulem situações nas quais atuam como pesquisadores. As aulas passaram então a focalizar o contexto histórico em que as descobertas ocorriam, tendo por chave interpretativa as cosmologias clássica, renascentista e moderna.

Entretanto, o que mais chamou a atenção dos alunos no experimento foi o fato de perceberem que a tecnologia de construção de um dado artefato pode anteceder, não raras vezes, à explicação científica sobre o funcionamento do mesmo; mais que isto, as explicações dadas são historicamente datadas, estando de acordo com o contexto histórico de sua gênese.

A aula de História das Ciências começava pela problematização do conceito de *energia*; a seguir, realizavam-se a apresentação dos fundamentos relativos a máquinas térmicas e uma rápida digressão sobre a evolução conceitual que transformou a noção de “fogo” em “calor” e deste em “energia”. Para isso, fazia-se necessária uma revisão histórica das cosmologias:

1. *Clássica* (que se manteve como paradigma por cerca de 2000 anos – do auge cultural do período helênico ao fim do medievo), segundo a qual havia uma noção fundamental de que tudo era constituído por um *princípio elementar vivo*. Esse princípio era capaz de se diferenciar pela intervenção de qualidades de

características opostas (frio/calor, seco/úmido), dando origem aos quatro elementos do mundo sublunar e à quintessência ou éter. A fluidez e o movimento dos corpos estavam intimamente relacionados ao fato de estes possuírem uma alma, capaz de tudo animar (Apêndice A.1.1);

2. *Renascentista*, hegemônica até o fim do século XVII, que buscava entender os princípios e as relações que governavam o mundo a partir do entendimento do movimento e do fluxo relativo das coisas, uma vez que estas e a natureza podiam ser consideradas como máquinas colocadas em movimento por um ser de conhecimento superior. Nessa cosmologia, o movimento de *fluidos ponderáveis* (exemplarmente, vapor, sangue e linfa) e *imponderáveis* (*calórico* e *flogisto*, por exemplo) justificaria o fato de as máquinas tenderem a permanecer em movimento constante, a não ser que outras forças, atuando em sentido oposto, as tirassem desta condição (Apêndice A.1.2.);

3. *Moderna*, na qual: (1) as noções sobre fluidos imponderáveis, capazes de controlar as trocas de calor e as reações químicas, caíam em desuso contínuo até desaparecerem por completo – em meados do século XIX, os conceitos sobre fluxos cíclicos na natureza seriam substituídos pelo de evolução temporal (tão caro às ciências biológicas); (2) os processos reversíveis tornar-se-iam quase improváveis; (3) as ferramentas matemáticas, tais como derivadas parciais e relações de James Maxwell [1831-1879], influenciariam grandemente a descoberta da *Segunda Lei da Termodinâmica*, por Rudolf Clausius [1822-1888] e a definição da escala termodinâmica de temperatura por William Thomson [1829-1907]; e (4) a expansão da revolução industrial levaria ao surgimento de princípios norteadores da construção e funcionamento de máquinas térmicas (Apêndice A.1.3. e Capítulo 2).

1.3.2. DA EXPERIMENTAÇÃO À EXPERIENCIAÇÃO

Na medida em que o conhecimento dos alunos sobre o assunto aumentava em decorrência, provavelmente, do estímulo dado pela aula teórica, eles passaram a refletir sobre os contextos técnico-científico e histórico presentes nas descobertas. Ao pensarem sobre as possíveis mudanças que fariam no LTP, realizavam um retrospecto do ensaio e, com autonomia e confiança, propunham

modificações que visavam aumentar a conversão da energia liberada pela combustão em trabalho (W).

A motivação para esta proposta de transição (que dá título a este item), levada a termo a partir de 2010, em muito se assemelha ao procedimento utilizado por Teixeira visando selecionar o melhor combustível para o LTP.

Inicialmente, Teixeira pensava em aproveitar o combustível do isqueiro que estava sendo desmontado para a remoção do ignitor piezelétrico. Entretanto, a mistura, que se volatilizava com grande facilidade, fornecia quantidade de calor capaz de impulsionar o tubo plástico para o alto, mas ateava fogo à tampa fixada na base de madeira (Anexo), causando a fusão do polímero. Outros combustíveis, como gasolina e querosene, apresentaram resultados análogos aos do gás de isqueiro.

A solução desse problema só ocorreu de fato quando Teixeira levou em consideração as características que o combustível deveria ter, abandonando a técnica de “tentativa e erro”. Eles buscavam um líquido (ou mistura) inflamável que passasse facilmente do estado líquido para o gasoso e pudesse ser manuseado com facilidade e com perdas mínimas. Deu-se preferência, então, a um líquido com baixo ponto de fulgor (*flash point*)⁶, de baixa toxicidade e relativamente estável à temperatura ambiente: o etanol (C_2H_5OH), tanto absoluto quanto comercial (96°GL).

O etanol puro é um combustível que entra em ebulição a 78°C à pressão de 760 mmHg, mas que tem ponto de fulgor a 15°C, temperatura de autoignição maior que 400°C com limite superior de 19% e inferior de 3,3% de explosividade no ar. Tais características levaram Teixeira a selecionar o etanol como combustível para o LTP.

Quando, em 2010, ingressei no mestrado, tinha por meta realizar uma análise didática e científica desse experimento. A princípio, pretendia ressaltar sua importância interdisciplinar, contudo, a realização dos primeiros ensaios a partir do roteiro estruturado proposto por Teixeira, Ramos e Cruz (Anexo) levou-me a acreditar que seria mais significativo, do ponto de vista didático, instigar os alunos a sugerirem modificações que levassem ao aumento da eficiência do LTP.

6 Dá-se o nome de ponto de fulgor à menor temperatura em que um líquido fornece vapor suficiente para formar uma mistura inflamável quando uma fonte de ignição (faísca, chamas abertas, etc.) está presente.

Inicialmente, propus duas modificações ao roteiro estruturado do Anexo, visando garantir que o lançamento do tubo estava sendo realizado o mais próximo possível à normal: (a) passou-se a utilizar um nível de construção para garantir que o ângulo de lançamento fosse perpendicular ao solo e (b) delimitou-se uma área circular com um metro de raio no chão ao redor do local de lançamento, o qual funcionou como área de descarte/validação do lançamento. Assim, se o tubo plástico, ao retornar ao solo, o atingisse para além do limite, o lançamento realizado pelo LTP não seria válido. Caso atingisse o chão dentro do círculo demarcado, garantir-se-ia que a trajetória descrita pelo tubo plástico tinha sido pouco influenciada pelas condições locais e que o tubo, provavelmente, havia atingido a altura máxima (Capítulo 3).

1.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA

Visando determinar se o processo de experiencição e a aula ministrada exerciam alguma influência sobre o PE/A, dividiu-se a classe em três grupos de alunos. Essa divisão não seguiu nenhum critério pré-definido, os alunos que regularmente estudam no turno da tarde e que não podiam vir à escola no turno da manhã foram alocados no primeiro grupo; os que podiam dedicar uma manhã ao experimento, foram colocados no segundo grupo, e os demais, que dispunham de maior tempo disponível – pelo menos duas manhãs – no terceiro. Assim:

- O primeiro grupo (G1), denominado grupo de controle, não participou da experiencição e da aula, respondendo à questão relativa ao assunto na avaliação bimestral dissertativa obrigatória a partir de saberes obtidos durante as aulas regulares;
- O segundo grupo (G2), que, de todo o processo, apenas não participou da aula teórica no contra-período, mas realizou os ensaios com roteiro semiestruturado;
- O terceiro grupo (G3), que cumpriu todas as etapas do processo, ou seja, além das aulas regulares, os alunos deste grupo participaram da aula sobre a História e Filosofia das Ciências e da experiencição, sendo desafiados, no fim do ensaio, a proporem

algum tipo de modificação que alçasse o tubo plástico a alturas ainda maiores.

Nessa fase, denominada *Avaliação Comparativa*, os 34 estudantes de uma mesma classe se dispuseram a participar do processo e, por acaso, a turma acabou dividida em três partes praticamente idênticas em número de alunos. Assim, do G1 participaram dez alunos, enquanto os outros 24 se dividiram igualmente entre os grupos G2 e G3. Esta classe, do segundo ano do ensino médio de uma escola pública, foi por mim eleita, pela seguinte característica: o grupo de alunos estava sob minha responsabilidade há mais de um ano e, por conhecer-lhes relativamente bem, eu poderia avaliar e comparar os desempenhos destes nas atividades com o que eu observara ao longo de cinco bimestres (quatro do primeiro ano e o primeiro do segundo ano do Ensino Médio).

A classe, constituída em sua maioria por alunos egressos do ensino fundamental público da cidade e da região, como as demais turmas da escola, estava em processo contínuo de avaliação, fosse da parte dos professores que ministravam as disciplinas de formação geral ou específica, fosse da parte das psicólogas e pedagogas que trabalhavam no Serviço de Orientação Educacional (SOE).

Entre o final do terceiro período e o começo deste último, definiu-se a pergunta de pesquisa:

A inserção de uma aula teórica sobre a História das Ciências e uma mudança no tipo de roteiro experimental são capazes de ampliar os elementos de cognição/compreensão do problema, constituindo-se, assim, em fatores facilitadores para a aprendizagem?

Visando responder a esta questão, partiu-se para a análise dos resultados experimentais, tratando-os em associação aos resultados dos desempenhos médio dos alunos de cada um dos grupos (G1, G2 e G3) e analisando, na medida do possível, os resultados individuais das avaliações bimestrais dissertativas obrigatórias, tendo por base o desempenho acadêmico de cada aluno ao longo dos anos de 2012 e 2013.

Para que a dissertação consiga responder a esta questão, propõe-se a

seguinte estrutura textual:

Capítulo 2: Intitulado *Uma breve História das Ciências*, este capítulo visa mostrar os aspectos histórico-filosóficos das máquinas térmicas, sua história e quais concepções podem ser trabalhadas na aula de preparação para o experimento, podendo funcionar como um roteiro para os professores que quiserem reproduzir esta estratégia de ensino. Necessitando de uma maior quantidade de informações históricas, o professor pode consultar o Apêndice, composto de três partes, no qual se oferecem elementos histórico-filosóficos diferenciados.

Capítulo 3: Denominado *Da experimentação à experiencição*”, este capítulo tem por meta mostrar que uma experiência baseada em roteiro semiestruturado pode constituir-se em uma excelente oportunidade: (1) para incentivar os alunos a pesquisar e a refletir sobre o tema, sugerindo modificações aos ensaios; (2) ampliar suas habilidades e competências sobre aspectos importantes da Termodinâmica e da Termoquímica, em particular, e das ciências, em geral; (3) fazê-los superar o desafio proposto: maximizar a altura máxima atingida pelo projétil e, por consequência, o rendimento do LTP.

Capítulo 4: Este capítulo, que tem por título *Narrando avaliações*, busca mostrar como: (1) funciona o processo de avaliação contínua, realizado por professores e servidores do Serviço de Orientação Educacional e (2) é possível elaborar questões sobre os aspectos mais basilares da Termoquímica e da Termodinâmica, de modo a não prejudicar os alunos do grupo de controle em relação aos demais. Este capítulo não pretende analisar os aspectos didáticos e aprofundar a análise didática; ele somente mostra o que e como foi feito, de modo a responder à pergunta de pesquisa, sempre atentando para o fato das avaliações estarem sendo aplicadas no início, ao longo ou ao final do PE/A.

Capítulo 5: Neste capítulo, denominado *Resultados experimentais e de avaliação*, são apresentados os resultados referentes ao experimento realizado pelos estudantes – tomando por chave analítica o roteiro estruturado presente no Anexo – e às provas bimestrais. Neste capítulo, também é apresentado um exemplo de como os alunos preencheram o roteiro de estudo e são mostradas algumas respostas fundamentais às discussões que ocorrem no capítulo seguinte, as quais estão

presentes em seus relatórios e avaliações dissertativas.

Capítulo 6: Intitulado *Discussões Científico-Pedagógicas*, este capítulo é tripartido: na primeira parte, faz-se a análise da aula teórica ministrada com base na participação dos alunos; na segunda, o objeto de discussão é o experimento em si, seus princípios teóricos e práticos; na terceira, discute-se como os resultados obtidos na experiencição ajudaram na compreensão dos fatos experimentais e na construção conceitual.

Capítulo 7: Este é o capítulo em que são feitas considerações finais sobre a dissertação. Cognominado por *Conclusões*, ele discorre sobre a resposta à pergunta de pesquisa, analisando as possibilidades de ampliação futura deste trabalho.

CAPÍTULO 2

UMA BREVE HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS

Este capítulo tem por objetivo mostrar a importância dos aspectos histórico-filosóficos e a evolução das máquinas térmicas, do canhão à máquina a vapor e desta à Primeira Lei da Termodinâmica, fornecendo subsídios aos professores que quiserem apresentar a ciência como um processo em que os conhecimentos são socialmente construídos.

A introdução da História das Ciências teve por intenção fazer com que os estudantes que participassem do grupo de análise (G3) pudessem compreender aspectos fundamentais sobre o conhecimento científico e, assim, adquirissem habilidades e competências na construção de uma visão mais realista sobre a natureza deste saber. O que mais chama a atenção é o fato de a maior parte dos alunos possuir uma visão inadequada sobre as ciências, o que pode ser comprovado pelos trabalhos de Gil-Pérez *et al.* (2001) e de Abd-El-Khalick e Lederman (2000).

Inicia-se pela apresentação dos canhões, como peça de artilharia, preparando terreno para princípios fundamentais à compreensão do funcionamento do LTP e sua discussão (respectivamente, capítulos 3 e 6). Em seguida, fala-se do surgimento das máquinas a vapor modernas, sobre sua evolução e como, neste caso, erros cometidos durante a fase de investigação e criação abriram as portas para o progresso. No que tange aos erros, já adverte Dennett (2008, p.151):

“Em vez de evitar os erros, (...) [deveríamos] cultivar o hábito de cometê-los; (...) em vez de renegar seus enganos, você deveria se tornar um *connoisseur* de seus próprios erros, analisando-os como se fossem obras de arte.

Termina-se o capítulo mostrando como o calor e o trabalho envolvidos na operação de uma máquina térmica: (1) influenciaram na construção de princípios termodinâmicos e termoquímicos e (2) passaram a ser entendidos como partes de um conceito maior denominado energia.

Desde já se deve ter em mente que este capítulo funcionará como uma sugestão de aula teórica para os professores que quiserem reproduzir a estratégia

de ensino explicada no capítulo inicial. Assim, além de ensinar por meio de ensaio didático, o professor poderá: (1) despertar a curiosidade dos alunos, instigando-os a trabalhar e pesquisar; (2) diminuir, quase que inconscientemente, a ansiedade que toma conta de muitos alunos frente à realização de experiências, fazendo-os perceber que por trás de um artefato surgido como um brinquedo ocultam-se diversos princípios da ciência, e que errar não é um problema, sendo, algumas vezes – a depender do engano cometido – o que falta para se antever uma provável solução.

Do ponto de vista histórico, no que tange ao estudo das máquinas térmicas, muito se deve ao engenheiro e matemático escocês James Watt [1736-1819]. Conhecido por desenvolver máquinas térmicas de grande aplicação, ele sempre descrevia seus ensaios experimentais e apontava não apenas suas descobertas; ele discutia seus erros, sugerindo modificações e ampliava seu conhecimento ao partilhar suas dúvidas com outros cientistas.

Sua grande aptidão para a engenharia, provavelmente pelo convívio com pai e avô que se dedicavam àquela profissão, chama a atenção dos professores da Universidade de Glasgow, que oferecem a Watt a oportunidade de trabalhar, em 1758, como artífice em uma pequena oficina na universidade. Lá, conhece o cientista escocês Joseph Black [1728-1799], estuda seus artigos, discute-os na intenção de aprender como funcionam as máquinas térmicas e o calor – até então tratado como um *fluido imponderável*, o calórico.

Ao contrário de seu antecessor Denis Papin [1647-1712]⁷, James Watt não procurou viver de uma pensão vitalícia cedida pelo rei. Alguns biógrafos de Watt, como John Klooster (2009, p.28), atribuem seu sucesso à associação deste com os industriais John Roebuck [1718-1794], da *Carron Iron Works*, e Matthew Boulton [1728-1809], dono da *Soho*, com o qual Watt viria a formar, por 35 anos, uma empresa lucrativa, a Boulton & Watt Co.

⁷ Assim como James Watt, Denis Papin foi eleito membro da *Royal Society* de Londres, sendo também artífice e pesquisador das propriedades do vapor. Apesar de ter morrido na penúria, sua genialidade foi recuperada por François Arago [1786-1853] quando este, no artigo denominado *Notícias sobre as máquinas a vapor* (1831), afirma que “a máquina de Watt aplicava, com 60 anos de atraso, as soluções técnicas preconizadas por Denis Papin” (citado por WITKOWSKI, 2004, p.47)

2.1. AS MÁQUINAS TÉRMICAS ⁸

Na virada do século XVIII para o XIX, a Química sofreu um grande abalo em seus paradigmas com a apresentação das primeiras teorias atômicas, cujos modelos decorriam dos resultados de experimentos científicos. Nesta época, ainda vigoravam visões dinamistas e mecanicistas da natureza e, com estas, as noções relativas aos *fluidos imponderáveis*. Assim, concomitantemente ao aparecimento das teorias atômicas, modificaram-se as teorias referentes ao calor (que passa a ser entendido como energia em trânsito) e as relativas às transformações físicas e químicas.

No começo do século XIX, ganhou força a noção atomista, principalmente pelos trabalhos basilares de John Dalton, com seu modelo científico sobre a menor partícula constituinte da matéria – o átomo – e pelas concepções, originais, de Antoine Laurent Lavoisier sobre a lei de conservação das massas.

Nesta época, a Revolução Industrial ganhava corpo. Com ela, o carvão se tornava o principal combustível, cuja queima fornecia calor para a formação de vapor d'água que, a princípio, era o responsável pelo movimento de máquinas como o tear, a locomotiva e o barco a vapor.

O nome de máquina a vapor pode ser dado a qualquer motor que funcione pela transformação de energia térmica em energia mecânica por meio da expansão do vapor d'água. A pressão do vapor desloca o êmbolo em um movimento que permite o vai-e-vem das peças do tear ou o movimento circular das potentes rodas das locomotivas ou barcos.

Do ponto de vista econômico, o grande medo dos trabalhadores estava associado ao fato de uma máquina poder substituí-los, causando desemprego em massa, uma vez que, até então, os trabalhos realizados no ambiente fabril eram executados exclusivamente pelo esforço muscular dos operários e/ou da energia animal. Poucas tarefas, entretanto, eram realizadas pela energia hidráulica ou eólica (no caso dos moinhos) e tinham a desvantagem de depender das condições naturais (BRAGA et al, 2005, p.29).

⁸ Neste tópico faz-se uma análise sobre os aspectos históricos das máquinas térmicas tomando por base a obra Breve história da ciência moderna (BRAGA et al., 2005, pp. 29-38)

Outro ponto importante a favor do vapor era o fato de este poder realizar o trabalho de muitos operários, fornecendo energia necessária para o acionamento de todas as máquinas de uma fábrica ou mesmo deslocar grandes cargas, a longa distância, em um único dia de modo econômico e seguro.

Entre as muitas máquinas térmicas produzidas ao longo da história da humanidade, duas nos chamam a atenção: o canhão, talvez a mais antiga delas, e as máquinas a vapor (que serão focalizadas no item 2.2.). Como a utilização da pólvora no ocidente remonta ao século XIII, é provável que os ocidentais não dispusessem de canhões até aquela data. Somente com a descoberta da capacidade propelente da pólvora é que se tornou possível o desenvolvimento dos canhões como peça de artilharia.

Inicialmente fabricados com barras de ferro fundido soldadas uma a uma, os canhões eram pequenos e rústicos, sendo seu alcance limitado a umas poucas dezenas de metros. A substituição do ferro pelo bronze, no século XV, e deste pela peça única de ferro fundido, forjado como peça oca, trazia sérios problemas ao uso contínuo desta arma de fogo.

Apesar da invenção dos canhões carregados pela culatra, os de carregamento pela boca continuaram a ser os preferidos pelos artilheiros, pois evitavam o perigoso escape de gases pela culatra. No fim do século XVI, a descoberta das brocas responsáveis pela perfuração dos cilindros maciços proporcionou maior estabilidade à peça de artilharia. Como se percebe, foram muitos os erros e tentativas que se sucederam, até que se chegasse ao canhão de 'longo alcance', que podia ser utilizado, inclusive, como referência à determinação do mar territorial (MARTINS, 2010, p. 45).

O principal problema do canhão era (e ainda é) seu aspecto destrutivo. Seu funcionamento ocorria de modo diverso ao esperado para uma máquina térmica, não havendo controle sobre a potência gerada. Bastava, portanto, que aquele imenso poder fosse devidamente domado, o que viria a ocorrer com o advento das máquinas a vapor, as quais eram capazes de multiplicar, em muito, a força motriz do vento, da água e dos animais utilizados para a movimentação da maquinaria industrial e para o transporte de pessoas e cargas.

2.2. MÁQUINAS TÉRMICAS MODERNAS

Assim como na técnica analítica da periodização, inicia-se a história das máquinas térmicas por sua versão moderna, ou seja, por um recorte temporal datado entre as décadas de 1690 e 1770. O fato de não iniciar a história das máquinas a vapor pela *Eolípila*, de Heron de Alexandria, apoia-se nas palavras de Sadi Carnot [1796-1832], que afirmava:

A distância entre os primeiros aparelhos nos quais se desenvolveu a força expansiva do vapor e as máquinas atuais é quase igual à que há entre o primeiro barco construído pela humanidade e um navio de alto-mar (CARNOT, 1824, citado por RIVAL, 2009, p.122).

Encontrando muita dificuldade a princípio, Watt insistiu com seus experimentos, sendo pioneiro em perceber a importância do calor latente (que está presente no momento da transição de fase) e em compreender que o mesmo diminuía a eficiência da máquina a vapor. Watt também demonstrou que cerca de 80% da energia gerada pela caldeira é consumida para esquentar o cilindro em cujo interior se desloca o pistão, responsável pela realização do trabalho.

Em 1765, com o desenvolvimento de técnicas metalúrgicas e de ferramentaria mais apuradas, Watt pôde construir um protótipo preciso de uma máquina a vapor, no qual os problemas de perda de energia eram menores (se comparados aos das máquinas de Savery e Newcomen), sendo capaz de produzir movimentos circulares, o que viria a ser utilizado, em menos de quatro décadas, na movimentação de trens por Richard Trevithick [1771-1833], e de navios por Robert Fulton [1765-1815].

2.2.1. PRÉ-REQUISITOS À COMPREENSÃO DAS MÁQUINAS A VAPOR

O ideal das máquinas sempre esteve presente nos anseios da humanidade, que buscava instrumentos que facilitassem a execução de tarefas diárias ou que permitissem a superação de certos limites – como admitir que o gênero humano, apesar de ser o mais inteligente, não era o mais rápido e ainda vivia

preso ao chão?

Rival (2009, p.122) afirma que o desenvolvimento da máquina a vapor dependeu de descobertas feitas ao longo dos séculos XVI e XVII sobre o vácuo e a pressão atmosférica. Isto se devia ao fato de as tentativas que visavam empregar a força motriz do calor não possuírem uma base teórica de sustentação. Deve-se lembrar que até meados do século XVII, o vácuo – criado pela condensação do vapor de água no interior de um cilindro – era considerado um absurdo, pois, segundo a teoria física, era impossível existir um local no qual não houvesse matéria.

Além disso, o conceito de pressão atmosférica era completamente desconhecido. Somente com a publicação do livro de Otto von Guericke [1602-1686], cuja fundamentação teórica é baseada nos estudos realizados por Evangelista Torricelli [1608-1647], ficou evidente a importância da pressão atmosférica, não demorando a aparecer seu uso como fonte de potência mecânica.

2.2.2. AS CONTRIBUIÇÕES DE PAPIN, SAVERY E NEWCOMEN

Deve-se a Denis Papin (1) a substituição da pólvora utilizada nas primeiras máquinas térmicas pelo vapor de água, durante a década de 1690, e (2) a descoberta de que a brusca condensação do vapor no interior de um cilindro faz surgir uma situação de “vácuo parcial”. Com isso, a pressão externa exercida pela atmosfera faz um êmbolo deslizar para o interior do cilindro.

Em seguida, inverte-se o processo, de modo a reconduzir o êmbolo para a sua situação inicial. Desafortunadamente, esta segunda etapa só pode recomeçar com o resfriamento do cilindro, o que pode levar até alguns minutos, tornando o processo deveras lento para uma aplicação industrial, mas plausível para a preparação de alimentos. No esteio da descoberta desta máquina térmica incipiente, outras se seguiram.

A máquina a vapor de Thomas Savery [1650-1715], que funcionava como uma bomba para retirar a água do interior das minas de carvão, não possuía pistão e tinha seu funcionamento baseado em um jogo de torneiras, sendo operada manualmente em duas fases:

1. Na primeira, o vapor de água saía da caldeira, entrava em um recipiente cilíndrico e expulsava (para o alto) uma certa quantidade de água.
2. Na segunda, um jato de água fria entrava em contato com a tubulação, visando o resfriamento de seu conteúdo e, em consequência, a condensação do vapor, gerando um vácuo parcial. Após a queda de pressão, abria-se manualmente uma válvula que proporcionava a aspiração da água por um cano até a superfície, recomeçando o ciclo.

Comparando-a à “marmita” de Papin, percebe-se que nesta máquina a condensação do vapor de água é acelerada pelo resfriamento externo do cilindro. Sua principal desvantagem era que boa parte do vapor descarregado no cilindro frio condensava-se para aquecê-lo, representando uma séria perda de potência. Além disso, havia o problema do aprisionamento do ar, que, ao se acumular nos tubos, travava a máquina (BRAGA et al., 2005, p.32).

Thomas Newcomen [1663-1729], por seu turno, associou as qualidades de cada uma das máquinas: utilizando, de Papin, a ideia de deslizamento do êmbolo no interior de um cilindro e, de Savery, o sistema de resfriamento do cilindro, substituindo o resfriamento externo do cilindro por um resfriamento interno, o que acelerou ainda mais a condensação do vapor, proporcionando à máquina trabalhar em modo contínuo.

É importante salientar que uma máquina a vapor não gera energia de modo espontâneo; ela utiliza o vapor para transformar a energia calorífica liberada pela reação de combustão em movimento de rotação, por exemplo, tendo por meta realizar trabalho. Um motor a vapor (considerado como termo técnico mais correto) possui uma fornalha, na qual se queima principalmente carvão mineral – contudo, poderia ser utilizado outro combustível como óleo ou madeira – para produzir energia calorífica. A energia proveniente da queima de combustível faz a água passar da fase líquida para a fase de vapor e, assim, ocupar um volume maior do que o ocupado pela água líquida (BRAGA, et al, 2005, p,34-35).

Na máquina de Newcomen, o vapor d’água formado empurra um êmbolo até o fim de seu curso e escapa; com isso, o êmbolo retorna à posição inicial sendo novamente empurrado até o fim de seu curso, e assim por diante. Esse movimento

de vai-e-vem pode ser transferido diretamente para uma outra máquina, como o tear, ou ser transformado em um movimento circular de um eixo, graças a um sistema de biela-manivela.

Apesar do avanço, a máquina a vapor de Newcomen ainda apresentava duas desvantagens: (1) sua potência era limitada pela pressão atmosférica, permanecendo a máquina tributária das circunstâncias naturais (RIVAL, 2009, p. 124) e (2) as perdas de calor desperdiçavam a energia necessária à produção de efeitos mecânicos, diminuindo assim sua eficiência.

2.2.3. AS CONTRIBUIÇÕES DE WATT

James Watt sabia que a máquina de Newcomen podia ser melhorada. A princípio, ele não pensava em construir uma outra máquina a vapor; suas propostas eram no sentido de melhorar as condições de funcionamento da máquina de Newcomen. Contudo, ao fazer funcionar um protótipo daquela máquina, Watt constatou que este funcionava por alguns ciclos e parava sem explicação aparente. Por que isto ocorria? Por que o desempenho do protótipo não era o mesmo que o apresentado pela máquina em escala real, que funcionava a contento nas minas de carvão?

Após muito trabalho, Watt verificou que o cilindro de sua réplica tornava-se demasiado quente ao longo da operação da máquina e que este aquecimento era, na realidade, um desperdício. Como ele percebeu, um cilindro grande (da máquina real) e um pequeno (do protótipo) não guardam a mesma relação entre o volume e superfície. No cilindro pequeno, a área superficial é proporcionalmente maior, o que conduz a um maior calor desperdiçado. Como isso ocorre a cada ciclo, o desperdício torna-se proibitivo, levando a máquina a parar. Watt concluiu que tal perda não se limitava a causar perda de eficiência no cilindro pequeno, também estavam a ocorrer importantes perdas na máquina em escala real.

Watt, então, pôs-se a investigar a perda de vapor que ocorria a cada ciclo, buscando por materiais que pudessem diminuir o consumo adicional de vapor que era utilizado no aquecimento do cilindro da máquina de Newcomen. Passou a utilizar um cilindro feito de madeira encharcada com óleo de linhaça que era, em seguida,

torrada. Apesar de diminuir o desperdício de vapor, como previsto por Watt, a madeira mostrou-se mecanicamente inadequada, uma vez que rachava com facilidade. Deve-se notar que Watt, deste modo, utilizava as vicissitudes experimentais para propor modificações inéditas no que tange ao funcionamento das máquinas.

Outro problema prático enfrentado por Watt foi determinar a medida de água exata para o resfriamento do cilindro. Apesar de outros já terem tentado solucionar este problema, apenas Watt conseguiu tal intento: ao contrário dos demais, ele possuía um conhecimento teórico diferenciado, proporcionado pelos ensinamentos de Joseph Black, o que fez com que Watt pensasse de modo diverso dos muitos engenheiros de então.

Watt, utilizando o conceito de calor latente de Black, conseguiu determinar a quantidade ótima de água para a condensação de vapor no interior do cilindro, de modo a evitar seu resfriamento (BRAGA et al., 2005, p.37). Manter o cilindro aquecido foi a solução escolhida. O problema maior é que essa economia tinha um custo: a máquina perdia potência, uma vez que o cilindro quente demandava uma quantidade menor de vapor, gerando menos potência mecânica (ou trabalho, como seria posteriormente chamado).

Watt, após horas buscando questionar o funcionamento da máquina percebeu que um desafio se opunha ao bom desempenho da mesma: como manter as paredes do cilindro quentes, uma quantidade de água próxima ao ponto de ebulição no fundo e um vácuo perfeito em seu interior? Nessas condições a água vaporiza e a condição de vácuo se perde. O cilindro deveria manter-se quente (por conta do vapor) e frio (para garantir o vácuo) *ao mesmo tempo*, o que era impossível para um único cilindro. Watt, então, pensou em utilizar dois deles.

O primeiro cilindro, sempre quente, seria aquele no qual o vapor produz trabalho mecânico; o outro, sempre frio, seria responsável pela condensação do vapor, tal como se vê na ilustração que se segue (fig. 1).

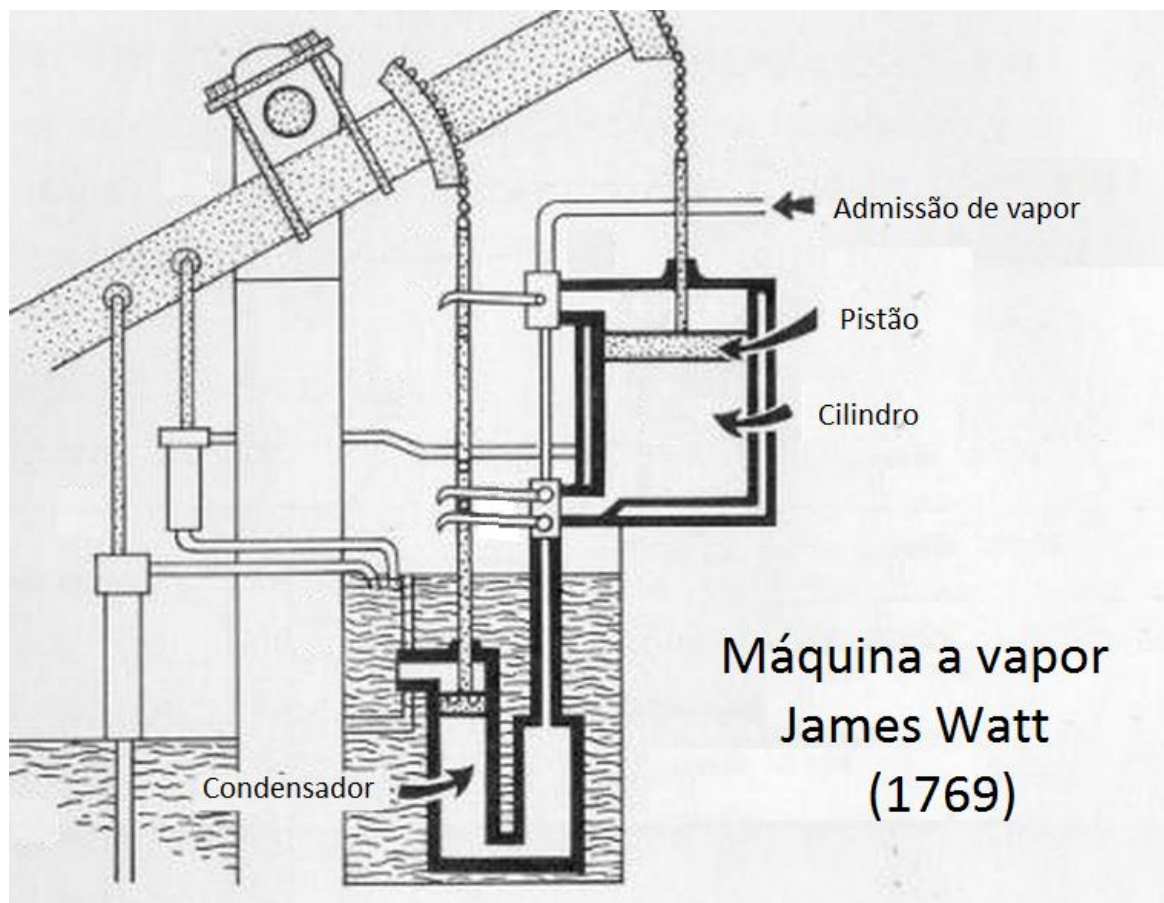


Figura 1: Detalhe da máquina a vapor com dois cilindros (J. Watt, 1769) (Modificado de <http://wbraga.usuarios.rdc.puc-rio.br/fentran/termo/hist4.htm>. Acesso em: 28 dez. 2013)

Além dos problemas já citados, Watt enfrentou um grande problema quando teve de ampliar a escala de seu protótipo. Para a máquina de sua escala plena, Watt desenvolveu diversos mecanismos, instalados numa caixa de distribuição. Exemplarmente um que permitia que o escape de vapor, alternadamente, de cada um dos setores delimitados pelo êmbolo existente no interior do cilindro. Além disso, dois pêndulos cônicos – compostos por duas esferas que se moviam numa trajetória circular num plano horizontal denominado “válvula reguladora” (fig.2) – eram utilizados para acionar uma segunda válvula presente no sistema de escape de vapor, permitindo regular o fluxo do vapor d’água e, assim, a velocidade da máquina.

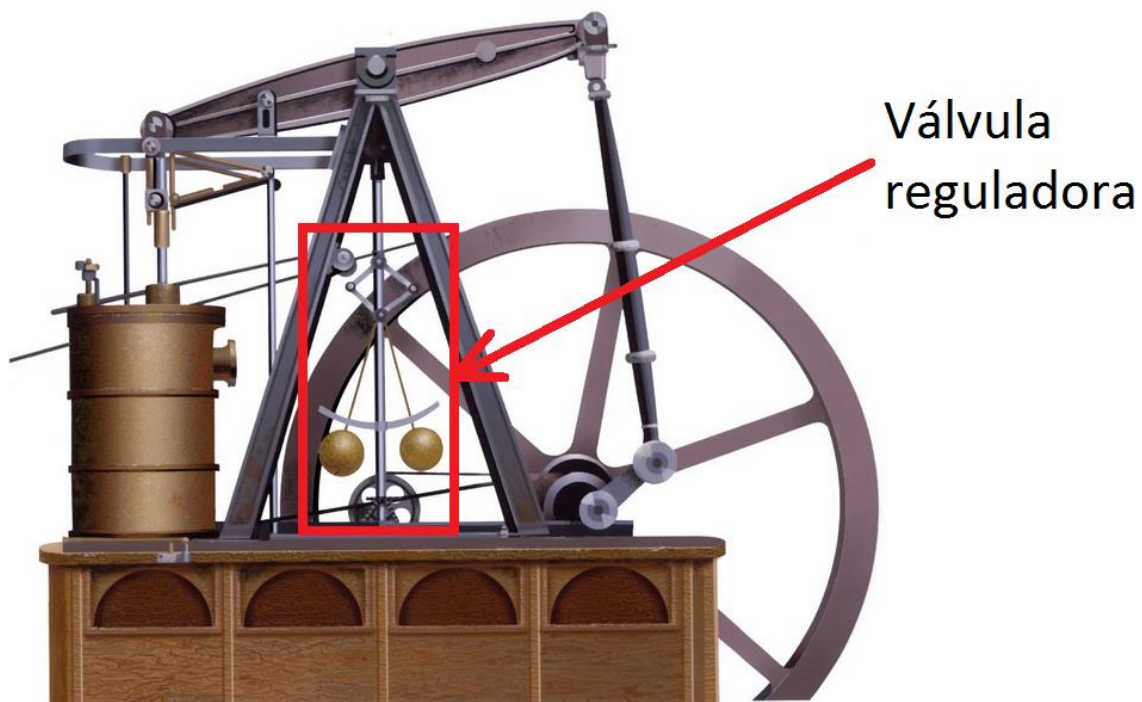


Figura 2: Representação esquemática da máquina a vapor (J. Watt, 1769) (Modificado de http://locomotorasytrenes.blogspot.com.br/2013_09_01_archive.html. Acesso em: 28 jul. 2014)

Com essa máquina, James Watt conseguiu um aumento de cerca de 75% no rendimento, uma vez que ela apresentava dois importantes avanços em relação à máquina de Thomas Newcomen: (1) a água, na forma de vapor ou de líquido condensado, circulava em um sistema fechado, ao contrário da anterior, na qual o vapor, após movimentar o êmbolo, era lançado para a atmosfera; (2) o vapor movimentava o êmbolo em duas direções devido a um sistema de entrada dupla, ao passo que na máquina de Newcomen o vapor era responsável pelo movimento do êmbolo em uma única direção.

Apesar do excelente resultado obtido, Watt foi instigado por Boulton a converter o movimento alternativo do êmbolo do pistão em outro, capaz de produzir movimentos rotativos. Para isto, adaptou ao cilindro um mecanismo inventado e patenteado, em 1780, pelo inglês James Pickard, denominado “biela-manivela”. Esta combinação foi decisiva para o avanço da Revolução Industrial.

2.3. A EVOLUÇÃO CONCEITUAL DE ENERGIA

Nos séculos XVII e XVIII, surgiu uma tendência em favor da teoria mecânica do calor. Entretanto, faltavam elementos experimentais para sua confirmação. O problema que se descortinava era o seguinte: como explicar que o calor pode ser produzido por fricção, se os dois corpos estão originalmente à mesma temperatura, ou seja, se não há transferência de calor de uma fonte quente para uma fonte fria?

Um dos elementos que comprovavam a teoria mecânica do calor surgiu quando Benjamin Thomson, conde de Rumford, [1753-1814], percebeu que a perfuração de um cilindro de metal por uma broca “cega” gerava uma quantidade de calor que não podia ser explicado pela teoria que considerava o calor uma substância – o calórico.

2.3.1. AS CONTRIBUIÇÕES DO CONDE DE RUMFORD

Contemporâneo de Joseph Black, que havia tornado calor e temperatura grandezas diversas, Benjamin Thompson logo se convenceu de que o calor não era uma substância imponderável capaz de impregnar os espaços interatômicos e de fluir espontaneamente de um corpo mais quente a outro mais frio até que se estabelecesse o equilíbrio térmico. Visando comprovar sua teoria, Rumford analisou uma tarefa costumeira aos fabricantes de armas: a perfuração de um canhão.

Ele sabia que esse tipo de trabalho exigia a utilização de uma broca capaz de escavar um cilindro metálico maciço, o que proporcionava forte aquecimento ao cilindro e à broca. Para evitar a fusão do material do canhão, água era utilizada continuamente com o propósito de resfriá-lo.

Segundo a teoria do calórico, o canhão se aquecia, pois o material despedaçado pela broca expelia *fluido calórico*. O conde resolveu então utilizar uma broca cega, evitando assim despedaçar a parte interna do canhão, e comprovou que o calor produzido era maior do que na situação anterior. Medindo a quantidade de calor liberada em algumas horas de utilização da broca cega, pelo aquecimento de

água, Rumford mostrou que se o canhão contivesse tal quantidade de calórico, certamente se fundiria, o que não ocorreu (MILLAR, 1996).

Não se sabe, ao certo, se Rumford teve contato com os textos de John Locke [1632-1704]. Entretanto, ao que tudo indica, alinhava-se às concepções do filósofo sobre as noções de frio e calor. Sobre estes assuntos, afirmava Locke (1999, livro II, 8, § 21):

- *A sensação de calor [e frio] nada mais é do que o aumento [ou diminuição] do movimento das diminutas partículas de nossos corpos, causadas pelos corpúsculos de qualquer outro corpo;*
- *O calor é uma agitação muito viva das partes invisíveis de um objeto, a qual produz nas pessoas a sensação (...) que o objeto é quente.*

Humphry Davy [1778-1829], discípulo de Benjamin Thompson, também realizou experimentos envolvendo a fricção entre objetos. Utilizando blocos de gelo em fusão, friccionou-os e verificou que o atrito não alterava a capacidade calorífica dos corpos. Entretanto, o atrito causava o aumento da temperatura do material, provocando sua fusão. [O professor deve prestar atenção ao fato de que a teoria do calórico não dava conta de explicar o aumento de temperatura causado pelo atrito].

Thompson concluiu, corretamente, que o calor era devido ao movimento das partículas dos corpos e podia ser gerado por meio de trabalho mecânico realizado por uma máquina, ou seja, havia equivalência entre calor e trabalho, tal como seria comprovado, em 1841, por James P. Joule.

Este fato comprovava o declínio dos *fluidos intangíveis* e das *ideias dinamistas e mecanicistas* (Apêndices). Os fluidos tangíveis (exemplarmente, o vapor d'água) começavam a ganhar importância, bem como a teoria cinética dos gases e as teorias de campo.

2.3.2. AS CONTRIBUIÇÕES DE CARNOT

Sadi Carnot, ao analisar as máquinas a vapor de seu tempo, vislumbrou algo que, até então, passara despercebido: a produção da força motriz não era devido a um consumo real do *fluido* calórico, mas a seu transporte de um corpo quente para outro frio, de modo a reestabelecer um equilíbrio rompido pela geração de vapor, cuja potência (energia) advinha de uma reação de combustão. Segundo o *Princípio de Carnot*:

A potência motriz do calor é independente dos agentes que trabalham para realizá-la; sua quantidade é fixada unicamente pelas temperaturas dos corpos entre os quais se faz o transporte do calórico (CARNOT, 1824, citado por ROSMORDUC, 1985, p.124).

Este princípio, base para a *Segunda Lei da Termodinâmica*, nunca foi demonstrado matematicamente; ele é fruto de observações que o fundamentam e de fatos que o confirmam. Entre suas consequências mais importantes, Carnot afirmou que a potência motriz de uma máquina térmica se devia a um gradiente de temperatura.

Sadi Carnot tentou explicar sua teoria por meio de uma analogia entre o fluxo de calor em uma máquina térmica e a água utilizada para movimentar uma roda hidráulica. Para Carnot, da mesma forma que uma queda d'água é capaz de movimentar uma roda, o calor se comporta como um fluido que atua de modo semelhante ao passar de um ponto de maior temperatura (caldeira) a outro de menor temperatura (refrigerador).

O rendimento de uma máquina térmica, tal como a postulada por Carnot, dependeria, portanto, da quantidade de trabalho gerado a partir da diferença entre as temperaturas da fonte quente e da fonte fria (ver fig. 3, a seguir)

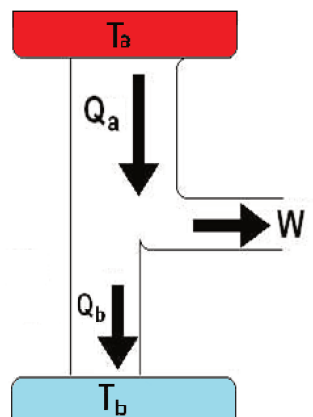


Figura 3: Esquema geral de funcionamento de uma máquina térmica (Modificado de http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2007/10/ciclo_carnot2.jpg. Acesso em 13 dez. 2012)

Simplificadamente, pode-se dizer que o rendimento da máquina térmica pode ser calculado pela relação entre o trabalho realizado pela máquina (W) e a quantidade de calor que deixa a fonte quente (Q_a). Ou seja, o rendimento (η) pode ser obtido por meio da relação:

$$\eta = W / Q_a \quad (I)$$

Sabendo que o calor realizado é dado pela diferença entre o calor que deixa a fonte quente (Q_a) e o que chega à fonte fria (Q_b), a equação (I) poderia ser escrita da seguinte forma:

$$\eta = (Q_a - Q_b) / Q_a = 1 - (Q_b/Q_a) \quad (II)$$

Como em uma máquina de Carnot, a quantidade de calor fornecida pela fonte de aquecimento (caldeira), Q_a , e a quantidade de calor cedida à fonte de resfriamento (refrigerador), Q_b , são diretamente proporcionais às suas respectivas temperaturas termodinâmicas (T_a e T_b) – definidas posteriormente por William Thomson, lorde Kelvin. A equação (II) poderia ser assim, reescrita⁹:

⁹ A equação I nos mostra um aspecto interessante: a eficiência máxima da máquina térmica só seria atingida se a temperatura da fonte fria fosse igual ao zero termodinâmico (0 K).

$$\eta = 1 - (T_b/T_a) \quad (III)$$

Apesar de utilizar o calórico em suas explicações sobre as transferências de calor, Carnot delineou, a seu modo, o *Princípio da Conservação de Energia*¹⁰. Para Rosmorduc (1985, p.126), citando os apontamentos de Carnot:

Pode-se colocar como tese geral que a potência motriz existe em quantidade invariável na natureza, que ela não é nunca (...) nem produzida nem destruída. Na verdade, ela muda de forma.

Além dos princípios citados, Carnot mostra, sem justificar, um número que representa a quantidade de “potência motriz” (ou trabalho) necessária para produzir uma certa quantidade de calor. A determinação precisa deste número, chamado de *equivalente mecânico do calor*, só ocorrerá em meados do século XIX por meio dos trabalhos de James Joule. O equivalente mecânico do calor será dado pela razão entre o trabalho mecânico (W) e a quantidade de calor (Q).

2.3.3. AS CONTRIBUIÇÕES DE JOULE

Joule estudou por longos anos as teorias de Isaac Newton [1642-1727], entre elas a *Primeira Lei da Mecânica*. Para ele, a energia cinética, ou energia associada ao movimento, permanece constante na ausência de forças externas. Pensando nesta lei, Joule propôs que a energia cinética dos corpos, cujo movimento cessa devido ao atrito, não desaparecia; ela era transformada em calor (RONAN, 1987).

Por meio de experimentos como o da ilustração a seguir (fig. 4), que utilizavam termômetros capazes de medir pequenas variações de temperatura, ele soltava um conjunto de dois pesos acoplado a uma rosca sem fim, a qual fez girar duas pás colocadas no interior de um frasco com água e termicamente isolado, no qual mergulhava um termômetro.

¹⁰ Há uma divergência a respeito de qual foi o primeiro cientista a enunciar esta lei: se Julius Mayer ou Hermann Helmholtz [1821-1894]. O primeiro, por ter seus trabalhos desprezados, em 1842, uma vez que a comunidade científica da época os considerava especulativos; o segundo, por utilizar um suporte experimental mais sólido, mas publicando-o apenas em 1847.

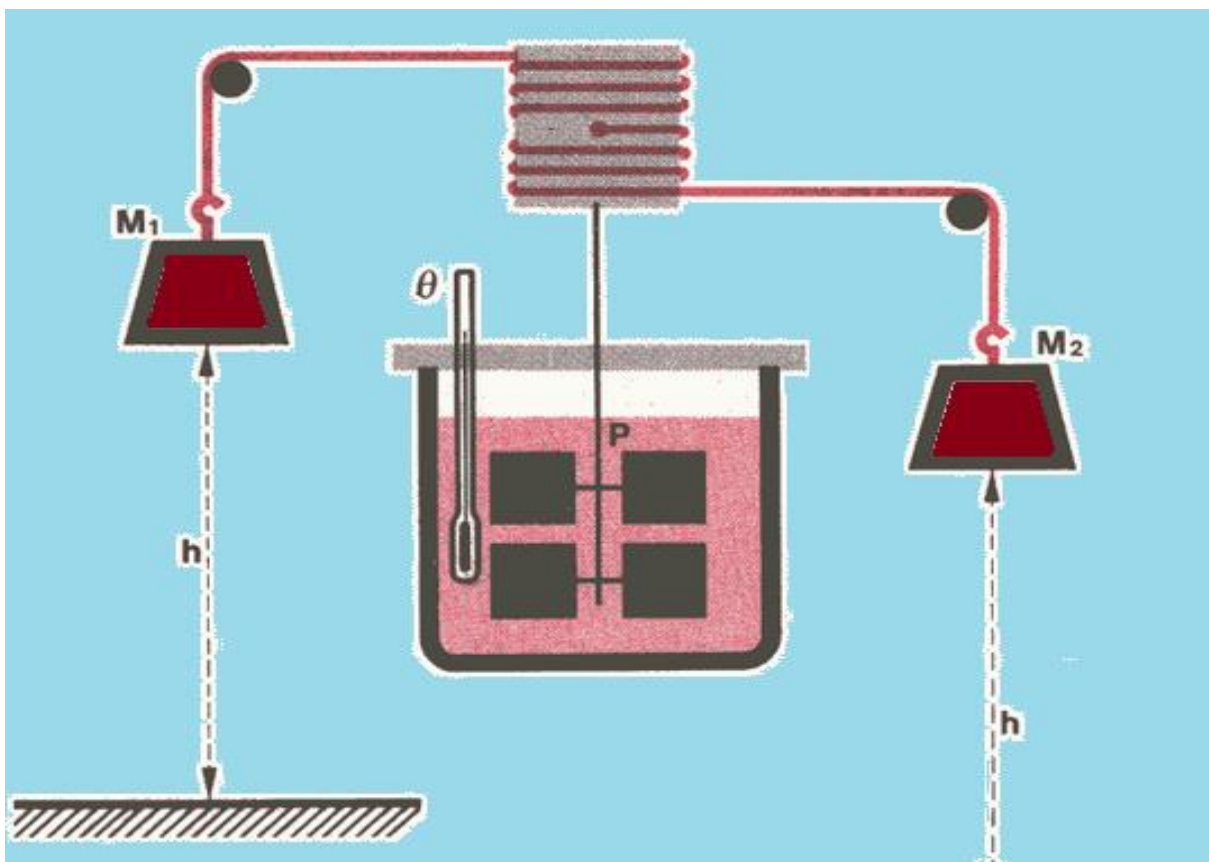


Figura 4: Representação pictórica do experimento de Joule (Modificado de http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Experincias_de_Joule.html. Acesso em 14 fev. 2014)

Toda vez que soltava o conjunto de pesos, as pás agitavam a água no interior do recipiente isolado, levando ao aquecimento da água. Por meio de cálculos que envolviam gradientes de temperatura, Joule comprovou que o calor produzido pelo movimento era comparável ao trabalho mecânico fornecido pelos pesos

Para a surpresa de todos os presentes na conferência de Joule, em Oxford, os resultados sugeriam haver a conversão de uma modalidade de “energia” em outro; os acadêmicos posicionaram-se contra os resultados, uma vez que o gradiente de temperatura constatado era de alguns décimos de grau. Frente à recusa destes, Joule conseguiu uma conferência pública em Manchester, na qual enunciou seus resultados e a impressão de seu texto na íntegra. Sua contribuição, entretanto, só passou a ser notada quando William Thomson fez algumas observações a seu favor. (QUADROS, 2004, p. 56).

Algumas objeções sobre o trabalho de Joule levaram a discussões pouco proveitosas: alguns cientistas tentaram mostrar que se uma máquina térmica fosse capaz de transformar todo calor em trabalho, sem perdas e operando em ciclos (de modo a retornar a seu estado inicial), um barco não necessitaria de combustível para navegar, bastava retirar a energia para movimentar suas máquinas do processo de resfriamento da água do oceano.

Joule apontou que, do ponto de vista da conservação de energia, não há restrições para o processo, mas uma máquina térmica não funciona desse jeito. Utilizando sua experiência de cervejeiro, explicou que uma bebida poderia ficar cada vez mais gelada se pudesse ceder calor para a atmosfera, mas que o calor não flui espontaneamente de uma fonte fria para uma fonte quente. Para isso, é necessário o fornecimento de trabalho externo. Como asseverava Joule, citado por Quadros (2004, p. 59): *“Não há violação da conservação de energia, mas o fluxo espontâneo de calor tem uma direção definida”*.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O TEMA

Joule conseguiu refutar a maior parte dos contra-argumentos de seus opositores. Foi ele o primeiro a demonstrar que nenhuma máquina térmica operava sem perdas. O objeto de estudo desta dissertação, o LTP é uma máquina térmica e que, portanto, opera com perdas de energia. Ao se analisar o experimento didático, deve-se estar atento para os fenômenos que irão ocorrer e que sugerem perdas de energia.

Carnot foi capaz de demonstrar que a máquina térmica mais eficiente possível era aquela que operava entre as fontes quente e fria em um ciclo reversível. Propôs então um ciclo ideal – hoje denominado Ciclo de Carnot – e, por meio dele, calculou o máximo rendimento de uma máquina térmica.

No ciclo por ele idealizado, não há desperdício de calor nos processos adiabáticos, nem de potência motriz (trabalho) nos processos isotérmicos. O trabalho útil realizado pela máquina é dado pela diferença entre o trabalho de expansão do gás que está no interior do pistão, e o trabalho que deve ser realizado sobre ele na compressão.

Por fim, gostaria mais uma vez que asseverar: este capítulo é apenas uma sugestão da aula teórica que pode ser ministrada. Como se sabe, a aula de um professor muda de sala para sala e, rotineiramente, até no interior de uma mesma classe. Quero, em conclusão, também sugerir que, em turmas mais avançadas, o professor demonstre que o ciclo reversível é o que leva a um rendimento máximo da máquina a vapor.

CAPÍTULO 3

DA EXPERIMENTAÇÃO À EXPERIENCIAÇÃO

A principal meta deste capítulo é mostrar que uma experiência baseada em roteiro semiestruturado pode constituir-se em uma excelente oportunidade: (1) para incentivar os alunos a pesquisar e a refletir sobre o tema, sugerindo modificações aos ensaios; (2) para ampliar suas habilidades, competências e conhecimentos sobre aspectos fundamentais da termodinâmica e da termoquímica, em particular, e das ciências, em geral; (3) para fazê-los superar o desafio proposto: maximizar a altura máxima atingida pelo projétil e, por consequência, o rendimento do LTP.

Para conseguir atingir estes objetivos, defende-se a mudança de uma situação de *experimentação*, caracterizada pela presença de um roteiro estruturado, quase um estudo dirigido (Anexo), para uma situação de *experienciação*, de roteiro semiestruturado – primeiro passo para se tentar uma situação inédita relativa à aplicação de um roteiro não-estruturado que, partindo de um gênero discursivo diverso (um filme, por exemplo), tentasse levar o aluno a explorar novas formas de superar seus desafios.

3.1. A EXPERIMENTAÇÃO

A análise do roteiro elaborado por Teixeira, Ramos e Cruz (2006) nos mostra a intenção dos autores em fazer com que os alunos pudessem aprender aspectos importantes da Termodinâmica e da Termoquímica a partir de uma série de atividades que envolvessem de aspectos lúdicos (como a montagem de um brinquedo, que, na realidade, é um excelente instrumento didático) a científicos (formulação de hipóteses, realização de experimentos e construção conceitual).

Quais os objetivos declarados e implícitos de um experimento? O que ele pode acrescentar em termos da aquisição de habilidades e competências? Que relações podem ser estabelecidas entre o saber e o fazer? Para entender este experimento de cunho didático-científico, deve-se, antes, responder a algumas destas questões.

Os autores de roteiros experimentais (estruturados ou não) sugerem que um experimento pode conduzir ao desenvolvimento do pensamento lógico dos alunos. Para Claxton & Sánches-Barberán (1994), este é o ingrediente mais específico da verdadeira ciência. Trata-se, portanto, de uma demanda específica dos cientistas, sendo também útil para a maioria dos trabalhos e vida cotidiana das pessoas.

A partir de experimentos, podem ser aprendidas habilidades que capacitem o aluno a analisar uma situação, construir uma explicação, testar a veracidade de sua hipótese e entender as consequências dela provenientes. Os experimentos também ampliam e transformam as representações que os alunos têm sobre os fenômenos naturais, facilitando uma aproximação entre os jovens e os diversos tipos de saberes (incluindo-se nestes o conhecimento científico) e enriquecendo suas visões de mundo.

Para Nieda & Macedo (1997, p.80), atividades didáticas, como os ensaios experimentais, podem ajudar a desenvolver nos alunos estruturas conceituais mais complexas que as utilizadas pelo conhecimento cotidiano, permitindo a estes assimilar, de modo mais efetivo, o conhecimento científico. Os roteiros estruturados, tal como o presente ao Anexo, permitem aos alunos avançar de um esquema representacional muito simples a um razoavelmente complexo; contudo, um roteiro semiestruturado (ou não estruturado) pode permitir avanços ainda maiores.

3.1.1. ROTEIRO ESTRUTURADO ORIGINAL ¹¹

(A) Sobre a introdução

Segundo o roteiro de Teixeira, Ramos e Cruz (2006), o propósito primeiro da atividade era a construção de um LTP à base de combustível líquido capaz de levar os alunos à verificação e aplicação dos conceitos de termodinâmicos e termoquímicos aprendidos durante o ano corrente. A atividade desejava estabelecer vínculos entre disciplinas (Física e Química) que, apesar de serem ministradas de

¹¹ Este item reproduz (e complementa) o roteiro presente ao Anexo.

forma separadas na grade curricular, apresentam tópicos comuns e relacionados entre si, tal como ocorrem nas manifestações dos fenômenos na natureza.

Os autores pedem aos alunos que leiam atentamente as instruções, acompanhando o roteiro e procurando desenvolver um olhar crítico ao fenômeno em estudo, uma vez que a meta final da atividade é saber se toda a energia proveniente do combustível será (ou não) convertida integralmente em trabalho ou se haverá alguma perda no sistema. Em suma, desejam os autores obter o rendimento real do LTP.

(B) Sobre a montagem

O roteiro do Anexo não apenas fornece uma lista de materiais a serem utilizados no procedimento experimental, como também, por meio de uma série de fotos, mostra como os alunos deverão proceder à montagem do LTP, alertando para as dificuldades a serem superadas.

(C) Sobre o procedimento experimental

Os autores começam por definir o que vem a ser o rendimento de uma máquina térmica e que parâmetros são importantes para o seu cálculo. O primeiro parágrafo conduz os alunos a associarem: (1) o trabalho realizado (W) com a altura máxima atingida pelo projétil, uma vez que, no ponto mais alto, toda energia cinética converteu-se em energia potencial, e (2) o calor fornecido (Q) com a energia proveniente da reação de combustão do etanol (combustível escolhido por suas características, tal como explicitado no Capítulo 1).

(D) Sobre os cálculos

Segundo o roteiro, deve-se iniciar os cálculos por uma sequência que visa estabelecer o quanto de energia foi liberado pela equação de combustão. Assim, os autores propõem a seguinte sequência de cálculos:

(1) CALOR LIBERADO PELA REAÇÃO DE COMBUSTÃO

(1.1) Escrever a reação balanceada para a combustão do etanol;

(1.2) Calcular a quantidade de energia a ser liberada pela queima de um mol combustível a partir das entalpias-padrão de formação de reagentes e produtos;

(1.3) Para calcularem a quantidade “real” de energia liberada – uma vez que no experimento não estão presentes nem um mol de combustível (etanol), nem três mols de comburente (oxigênio) –, os alunos cumprem os passos (1.4) e (1.5);

(1.4) Calcular, a partir do volume aproximado de etanol borrifado, da densidade da solução, de sua composição e da massa molar, a quantidade de matéria correspondente ao combustível utilizado;

(1.5) Calcular, a partir do volume do tubo plástico, da suposição (que se trata de uma mistura de gases ideais) e da composição média do ar, a quantidade de matéria correspondente ao comburente utilizado;

(1.6) A partir dos valores obtidos para a quantidade de matéria de cada um dos reagentes, determina-se o valor aproximado da quantidade de energia (Q) liberada pela combustão.

(2) TRABALHO REALIZADO SOBRE O TUBO DE PLÁSTICO

(2.1) A partir do experimento, anota-se a altura máxima atingida pelo projétil em cada lançamento, tendo por meta calcular o trabalho realizado sobre o tubo;

(2.2) O cálculo da quantidade de trabalho (W), utilizando-se o Teorema de Conservação de Energia e a equação matemática que relaciona a altura atingida ($H_{\text{máx}}$) e a energia potencial (E_{pot}) do tubo plástico no momento da inversão da direção do movimento. É importante, nesta fase, que se pense na dissipação e perdas de energias.

(3) CÁLCULOS FINAIS

(3.1) Cálculo do rendimento do LTP, a partir de W e Q (símbolos utilizados no procedimento). Aqui, deve-se estar atento para o cálculo da energia fornecida pela reação de combustão do etanol e compará-la ao trabalho realizado, para, assim, notar o quanto se perdeu;

(3.2) Cálculo da energia dissipada, pela comparação entre W e Q para

cada um dos lançamentos; neste caso, pode-se retornar à pesquisa sugerida no fim do Anexo, de tal modo que se possa entender a respeito do rendimento médio das máquinas térmicas.

(E) Sobre as questões propostas aos alunos

O roteiro prevê, em sua parte final, uma sequência de pergunta que pretende fazer com que os alunos reflitam sobre:

- (1) as perdas que ocorrem durante o processo;
- (2) qual seria a altura máxima atingida pelo projétil se toda energia liberada pela combustão fosse utilizada, exclusivamente, para elevar o projétil;
- (3) qual o rendimento apresentado por outras máquinas térmicas, como motores, por exemplo.

A sequência proposta por Teixeira, Ramos e Cruz (2006) nos sugere uma metodologia plausível, que auxilia na construção de conceitos a partir do envolvimento do aprendiz com a montagem do LTP. Como se crê, esta sequência de perguntas do roteiro estruturado pode, sim, levar o aluno a construir seus conhecimentos a partir de uma atividade que é, ao mesmo tempo, lúdica e científica.

3.2. A EXPERIENCIAÇÃO

Pela qualidade do roteiro de Teixeira, Ramos e Cruz (2006), poucas mudanças foram necessárias para transformá-lo de estruturado a semiestruturado. Os próprios autores, em 2008, adicionaram ao roteiro experimental uma questão que indagava os alunos sobre qual modificação poderia ser feita ao procedimento para que se aumentasse o rendimento do LTP.

Utilizando-se de conceitos teóricos, grupos de alunos (de turmas e de escolas diferentes, em anos sucessivos) sugeriram modificações interessantes ao lançador:

- (1) *Em 2009*: um grupo sugeriu que se passasse algum tipo de lubrificante no encaixe do tubo plástico, facilitando sua ejeção;
- (2) *De 2009 a 2013*: foi constante a sugestão de se dobrar a quantidade

de combustível utilizado – de 2010 em diante, as equipes, efetivamente, testaram tal mudança;

(3) *Em 2010 e 2012*, dois grupos sugeriram e realizaram os ensaios relativos à substituição do álcool comercial por etanol absoluto – os experimentos aconteceram em 2010 e 2012, com grupos de diferentes escolas;

(4) *Em 2011 e 2012*, duas equipes recomendaram (e, efetivamente, testaram) passar a distância entre os terminais de 2mm para 5mm – os ensaios dessas datas foram realizados por equipes de diferentes colégios;

(5) *Em 2012*, uma equipe sugeriu uma modificação no LTP original pela união de muitos tubos plásticos, acoplados em uma sequência, na qual os primeiros tubos funcionariam como uma base estendida. Em cada um deles haveria dois fios e, assim, uma série de faíscas aconteceria concomitantemente; entretanto apenas o último tubo seria disparado. Importante dizer que essa sugestão tornou-se inviável pela impossibilidade técnica de se construir manualmente um artefato complexo, inspirado na injeção multiponto dos automóveis;

(6) *Em 2013*, um grupo vislumbrou a possibilidade (e realizou o teste) de se fixar um primeiro tubo à base, fazer um furo em seu fundo, acoplar um segundo tubo por meio de uma ‘luva’¹² – em seu modo de ver, a luva poderia (1) diminuir o atrito do tubo plástico (que funcionava como projétil) e a base, e (2) proporcionar o aumento da quantidade de reagente limitante (o oxigênio).

Deve-se esclarecer que os resultados das modificações levadas a termo pelos grupos acima citados, relativos aos itens (2), (3), (4) e (6), encontram-se no Capítulo 5, que versa sobre os resultados obtidos, e no Capítulo 6, que diz respeito à discussão desses resultados obtidos por meio de experimentos e avaliações.

3.2.1. MODIFICAÇÕES AO ROTEIRO ORIGINAL

O roteiro original, muito mais que dar liberdade ao aluno, regravava suas

¹² A luva é um procedimento utilizado pelos encanadores (também chamados de bombeiros hidráulicos em alguns estados do Brasil) para encaixar dois tubos (de PVC, como no nosso caso) de mesmo diâmetro. Aquece-se a boca de um deles, forçando este a se adaptar ao lado externo do tubo não aquecido. Separa-se rapidamente um do outro, lixa-se a ponta do tubo não aquecido para aumentar o atrito e cola-se um ao outro.

ações visando atingir as metas propostas. O procedimento experimental, por exemplo: (a) não falava sobre aspectos relativos à segurança dos alunos, (b) não alertava para possíveis problemas sobre o funcionamento do LTP e (c) não previa condições relativas à obtenção e validação dos dados experimentais.

Pensando nisso, foram sugeridas modificações ao roteiro no que diz respeito a/ao:

(A) SEGURANÇA

O roteiro modificado tentou mostrar/alertar alunos e professores responsáveis pela mediação didática sobre os perigos que podem se esconder por trás de cada ação, fosse durante a montagem ou operação do LTP. Os alertas dados aos alunos podem ser assim divididos:

(A. 1) Alertas contínuos

(A.1.1) A todo instante, é muito importante lembrar:

Apesar de a montagem envolver a construção de um artefato que, em seus primórdios, foi utilizado como brinquedo, o experimento deve ser encarado com o devido rigor científico. É obrigatória a utilização dos equipamentos de proteção individual (EPI), sendo indispensáveis as luvas e os óculos de segurança.

(A. 2) Alertas para a fase de montagem do LTP

(A.2.1) Muita atenção ao trabalhar com artefatos de madeira, principalmente no que diz respeito à manipulação dos objetos: cuidado com a presença de farpas/estrepes e com o encaixe correto das peças;

(A.2.2) Ao trabalhar com a pistola de cola quente, ligue-a à tomada de modo seguro e procure ter certeza de que foi conectada à tensão correta. Evite o contato da cola quente com a pele, uma vez que pode causar queimaduras de segundo grau, dependendo de sua temperatura. Ao desligar a pistola da tomada, nunca puxe pelo fio, faça-o pelo conector.

(A.2.3) Em casos excepcionais, você poderá ter de utilizar a furadeira. Nesse caso, verifique se ela não se encontra com o gatilho de funcionamento acionado e ligue-a à tomada de modo seguro, tendo certeza de que foi conectada à

tensão correta. Evite manipular este equipamento próximo ao próprio corpo ou qualquer parte dele ou ao de outra pessoa. Ao desligar a furadeira da tomada, nunca puxe pelo fio, faça-o pelo conector.

(A.3) Alertas para a fase de operação do LTP

(A.3.1) Esteja atento ao posicionamento do LTP: evite apontá-lo na direção de outra pessoa ou na direção de alguma parte de seu próprio corpo;

(A.3.2) Ao borrifar o combustível (etanol) no interior do tubo plástico, evite segurá-lo próximo a sua boca ou às narinas. Evite também borrifar o combustível se estiver próximo a alguma fonte de calor (por exemplo, a pistola de cola quente);

(A.3.3) Ao posicionar-se para constatar a altura máxima atingida pelo projétil, escolha um local seguro e que permita a obtenção da medida ($H_{\text{máx}}$) do modo mais exato possível, tentando minimizar os erros de paralaxe;

(A.3.4) Verifique o trânsito de pessoas no local, alertando-as para a realização do experimento e sobre o barulho produzido pelo disparo do LTP.

(B) FUNCIONAMENTO DO LTP

O LTP é um artefato robusto em certos aspectos, mas delicado sob outros pontos de vista. Para evitar problemas durante a execução do ensaio, esteja atento aos seguintes fatos:

(B.1) Se o LTP cair ao chão, verifique se o ignitor piezelétrico ainda funciona. Para um teste simples, retire o tubo plástico da base e aperte o ignitor: verifique se foi produzida uma faísca entre os terminais. Se o ignitor não estiver produzindo faíscas, deve-se verificar a situação das conexões elétricas, refazendo-as, se necessário. *(Lembre-se: quanto maior for a luminosidade do ambiente, mais difícil de se notar a faísca. Nunca aproxime os dedos dos terminais!)*

(B.2) Em dias frios, o LTP pode falhar, mesmo existindo a produção de faísca pelo ignitor. Nesses casos, antes de borrifar o etanol no tubo plástico, aqueça-o por atrito causado pela movimentação de suas mãos ou segurando-o, por um certo tempo, entre as mesmas (30 segundos são, em geral, suficientes). Não utilize isqueiros ou fósforos para realizar esta tarefa. Pelas características do combustível, um leve aquecimento do tubo provocará a evaporação do etanol, gerando vapor

suficiente para a ignição do mesmo.

(B.3) No caso da ignição causar a fusão parcial do tubo plástico ou de sua tampa, estas deverão ser prontamente substituídas. No caso do tubo, basta acoplar um tubo novo; no caso da tampa, remova cuidadosamente o parafuso – utilizando uma chave de fenda – da base de madeira (Cuidado com os fios do ignitor!); fure a tampa nova (com o auxílio de pregos finos ou brocas de 1 mm acopladas à furadeira), fixe-a com cola quente e com o parafuso.

(C) CONDIÇÕES RELATIVAS À OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS

Visando garantir que o lançamento do tubo estava sendo realizado o mais próximo possível ao plano normal em relação ao solo, os alunos foram orientados a proceder do seguinte modo:

(C.1) Utilize um nível de bolha de precisão (similar aos utilizados em construções) para garantir que o ângulo de lançamento seja o mais perpendicular possível ao solo (fig. 5);



Figura 5: Modelo de nível (bolha de precisão) semelhante ao utilizado no experimento (Modificado de <http://www.dicasdefotografia.com.br/article-images/nivelador-classico.jpg> Acesso em: 2 de ago. 2010)

(C.2) Delimite uma área circular com um metro de raio, no chão, ao redor do local de lançamento, o qual funcionará como área de descarte/validação do lançamento. Se o tubo plástico, ao retornar ao solo, o atingir para além deste limite, o lançamento realizado pelo LTP não será válido; caso atinja o chão dentro do círculo demarcado, garante-se que a trajetória descrita pelo tubo plástico foi pouco influenciada pelas condições locais e que o tubo, provavelmente, atingiu a altura

máxima.

3.2.2. JUSTIFICANDO A MUDANÇA DO ROTEIRO

Para entender o porquê da mudança proposta, uma vez que o roteiro estruturado parecia funcionar a contento, o professor deve, necessariamente, acreditar em um método de ensino que: parta das demandas dos estudantes, privilegie a construção dos saberes – que assim como as demais coisas, são socialmente construídos por meio da linguagem – e que possa ser adaptado a uma situação de ensino que envolva o conhecimento científico.

Inicialmente, deve-se esclarecer que acredito que a mudança de um roteiro de estruturado para semiestruturado pode se constituir em um primeiro passo dado na direção de um roteiro não estruturado, no qual as situações-problema são abertas e a autonomia dos alunos é plena. Neste caso, estar-se-ia frente a um “laboratório de projetos”, que, em muito se assemelha ao que aqui chamamos de experientiação. Os alunos deixariam de ser “atores” do grande palco da ciência, passando a agenciar suas próprias demandas.

Concordando com Azevedo (2004, p.23), creio que um roteiro semiestruturado seja capaz de:

- Favorecer a reflexão dos alunos sobre a relevância das situações-problema;
- Potencializar análises significativas, que *auxiliem na formulação de questionamentos sobre a meta a ser alcançada*;
- Considerar a formulação de hipóteses como atividade principal da investigação científica, capaz de orientar o tratamento das situações e de fazer explícitas as concepções prévias dos alunos;
- Analisar os resultados, tendo por chave interpretativa os conhecimentos disponíveis (cotidiano e científico), as hipóteses assumidas e os resultados das demais equipes;
- Dar atenção especial aos relatórios experimentais que reflitam sobre o trabalho realizado e ressaltem a importância do debate na atividade científica;

- Incentivar a dimensão coletiva do trabalho científico, fazendo com que os jovens trabalhem em grupos, interagindo entre si.

A mudança do roteiro de estruturado para semiestruturado é fazer com que se deixe de lado a visão tradicional de ensino, na qual o aluno segue instruções pré-determinadas, sobre as quais ele possui pouca ou nenhuma autonomia. No roteiro estruturado, parece que a sequência de etapas procedimentais sempre leva ao alcance do objetivo pré-determinado. Será que o término do experimento pode garantir que ocorreu uma “aprendizagem significativa” (ver nota de rodapé 2, pág. 3) por parte do aluno?

Os roteiros que se afastam da perspectiva estruturante dão aos alunos a possibilidade de investigar os fatos e lançar mão de hipóteses, visando resolver uma dada situação-problema. Segundo este enfoque, realizar um experimento que apenas sirva para confirmar/verificar um dado princípio parece um desperdício de oportunidades de aprendizagem.

CAPÍTULO 4

NARRANDO AVALIAÇÕES

Este capítulo quer mostrar como ocorreu a elaboração das perguntas feitas aos alunos na avaliação dissertativa do primeiro bimestre de 2013, que versavam sobre aspectos basilares da Termoquímica e da Termodinâmica. O objetivo era buscar questões que não prejudicassem os alunos do grupo de controle (G1), comparando suas respostas com as dos demais estudantes. Tomou-se o mesmo cuidado com os alunos que não participaram da aula teórica sobre a História das Ciências (G2), não incluindo este tópico na elaboração das questões.

De antemão, já se percebe que os grupos de alunos foram submetidos a situações de ensino diferenciadas, sendo que o G3 teve uma carga horária maior que os outros dois, o que pode prejudicar a análise. Contudo, tentou-se atenuar essa diferenciação por meio da elaboração de questões de prova que não envolvessem nem os tópicos relativos à História das Ciências e nem do procedimento experimental.

Deve-se esclarecer que este capítulo não pretende analisar profundamente os aspectos didáticos relativos à questão (alguns destes serão discutidos no Capítulo 6); na realidade, quer se mostrar os fundamentos teóricos que embasaram a escolha das questões e das atitudes tomadas na intenção de se responder à pergunta de pesquisa, assim formulada no Capítulo 1:

A inserção de uma aula teórica sobre a História das Ciências e uma mudança no tipo de roteiro experimental são capazes de ampliar os elementos de cognição/compreensão do problema, constituindo-se, assim, em fatores facilitadores para a aprendizagem?

Para responder esta questão, partiu-se da análise dos resultados obtidos nos ensaios práticos, relacionando-os com os desempenhos médios dos alunos de cada um dos grupos (G1, G2 e G3) e analisando, na medida do possível, os resultados individuais das avaliações bimestrais dissertativas obrigatórias, tomando

por chave interpretativa o desempenho acadêmico de cada aluno ao longo dos anos de 2012 e 2013.

Visando determinar se o roteiro semiestruturado da experiencição e/ou a aula teórica sobre a História das Ciências exerceram alguma influência sobre o PE/A, dividiu-se a classe em três grupos de alunos, tal como descrito anteriormente na descrição da *Avaliação Comparativa* (seção 1.4).

Na escola pública federal em análise, os alunos são costumeiramente submetidos a avaliações: afere-se desde os conhecimentos adquiridos nas disciplinas da formação geral e/ou específica (técnica), por meio de avaliações mensais e/ou bimestrais, quanto às atitudes (intelectuais, relacionais, emocionais etc.) que tomam quando à frente de determinadas situações-problema.

O parágrafo anterior não quer iniciar uma discussão sobre a eficiência e validade do processo de avaliação contínua ou em quais bases teóricas ele se apoia. A sua intenção é somente mostrar que os alunos estão acostumados a participar deste tipo de processo. Em realidade, quer-se esclarecer a que tipo de situações-problema os alunos da turma forma submetidos.

4.1. AVALIANDO AS CONCEPÇÕES DOS ALUNOS NO INÍCIO DO PROCESSO DE ENSINO/APRENDIZAGEM (PE/A)

Inicialmente, durante as aulas do período regular, os alunos dos grupos G1, G2 e G3 foram requisitados a responder questões envolvendo seu conhecimento cotidiano pregresso. Foram-lhes formuladas as seguintes questões: O que é calor? O que é energia? Há diferença entre os dois princípios? Propôs-se ainda a análise das seguintes situações:

(1) Ao nível do mar, coloca-se 50 g de água pura, no estado líquido, a 0°C e 50g de água pura, no estado líquido, a 100°C, em um mesmo copo. Qual será a temperatura final da água?

(2) Colocando-se 50g de água pura, no estado sólido, a 0°C e 50g de água pura, no estado líquido, a 100°C, em um mesmo copo, a temperatura final da água, ao fim do processo era muito próxima de 21°C. O que ocorreu?

As respostas dadas pelos alunos foram de suma importância, ajudando a

balizar o ponto de partida da apresentação do conteúdo, a problematizar os enfoques conceituais que cada um deles possui sobre o tema a ser investigado e a dar subsídios para a (re)construção do saber. Surgiu, durante esta avaliação informal inicial a excelente oportunidade para se mostrar um calorímetro em funcionamento – o qual já havia sido discutido nas aulas de Termologia – e de se introduzir a noção de entalpia, relacionando-a às de calor e de energia, (mesmo sabendo que este instrumento não faria parte do experimento de roteiro semiestruturado e que a sua utilização não interferiria sobre este).

Deixo claro que a introdução de questões prévias tinha por meta apenas despertar a curiosidade dos alunos para fatos relativos aos fenômenos térmicos. Previamente, os alunos já haviam tido aulas relativas aos princípios da Termologia (primeiro ano do Ensino Médio) e da Termodinâmica (primeiro bimestre do segundo ano do Ensino Médio).

4.2. AVALIANDO A CONSTRUÇÃO DE NOÇÕES AO LONGO DO PE/A

No transcorrer do processo de ensino/aprendizagem, os grupos se tornaram distintos: ao grupo G3 foram propiciados elementos de cognição diferenciados por meio de uma aula teórica (de duração igual a 100 minutos) e de um ensaio experimental, ao qual o G2 também teve acesso. Reforça-se que os dez alunos do grupo G1, apesar de não terem acesso à aula sobre a História das Ciências e ao experimento, cumpriram suas atividades normais ao longo do período regular de ensino.

No caso dos alunos do grupo de controle, as decisões sobre o rumo das aulas eram tomadas pelo professor responsável e, na maior parte das vezes, dependiam das respostas dadas pelos alunos para a introdução de alguma noção ou discussão de alguma situação-problema¹³; o mesmo aconteceu com os alunos do G3, quando de suas participações na aula teórica. Deve-se notar que, *em nenhum momento* durante a execução do experimento de roteiro estruturado, os alunos

13 Apesar da dificuldade de se trabalhar deste modo, os alunos e o professor já estavam acostumados com esta metodologia.

problematizaram sobre o que havia sido proposto; contudo, isso se tornou um fato corriqueiro quando se introduziu o roteiro semiestruturado. (Teve-se a impressão de que o fato do roteiro ser estruturado fez com que os alunos limitassem a segui-lo; teve-se a impressão que a “abertura do roteiro” tornou possível a participação dos estudantes e ampliou a discussão sobre o experimento).

Para avaliar, minimamente, o interesse dos alunos sobre a experimentação, tomou-se o cuidado de verificar o número de estudantes que deram respostas às questões do roteiro, comparando este número com o de alunos que responderam as questões opcionais presentes no final do roteiro. Parece que o envolvimento maior dos alunos estava associado ao fato de ter ocorrido um aumento da porcentagem de estudantes que completava seus relatórios – não deixando sequer uma questão em branco – ao se transformar a experimentação em experiência.

Ao que tudo parece indicar, a introdução de questões mais complexas ao roteiro semiestruturado, levou os alunos a se sentirem mais desafiados pela experiência, tanto no que diz respeito à solução de problemas técnicos de montagem quanto na obtenção de dados, visando aumentar o rendimento do LTP.

O que mais chamou a atenção, entretanto, foi que ao se analisar o posicionamento dos alunos durante a experiência (G2 e G3), percebeu-se uma disposição maior nos jovens que se mostraram interessados em superar o desafio proposto. Três tipos de comportamento (ou de posicionamento) se destacaram-se nestes grupos de alunos:

(1) os mais inseguros, questionavam a maior parte dos passos que iriam dar, esperando o consentimento do professor-mediador para poder avançar;

(2) os mais autônomos avançavam, geralmente, sem muito cuidado e tentavam superar uma dada situação-problema pela aplicação de uma série de métodos diversos, aí se incluindo o de “tentativa e erro”;

(3) os mais “focados” utilizaram seus erros como momentos de reflexão, pensando no que havia ocorrido de errado e buscando uma solução que pudesse ser aplicada também em outras ocasiões.

Como ajudá-los, então? Dar respostas às questões não parecia justo com nenhum dos três tipos, seria como desperdiçar a oportunidade de merecer. Para auxiliá-los em tal tarefa, resolveu-se confrontar a opinião de cada um dos tipos e, por mediação, dar pistas sobre como atuar.

4.3. AVALIANDO AS NOÇÕES CONSTRUÍDAS AO “FINAL” DO PE/A

O processo de ensino/aprendizagem de qualquer pessoa nunca se encerra; o que pode acontecer é uma breve interrupção/suspensão propositada da experiencição, a eleição de um lapso temporal propício à estabilização conceitual e, após este, a elaboração de uma prova (ou questões, em nosso caso) que possa quantificar se a apresentação diversificada de elementos de cognição conduz a uma melhora no desempenho médio dos alunos de cada um dos grupos.

Algumas problematizações surgiram durante a construção da prova bimestral dissertativa:

- Como avaliar alunos que, ao longo do processo de ensino/aprendizagem (PE/A), estavam em grupos diversos?
- Como comparar a nota de estudantes, mesmo sabendo que eles são extremamente diversos em comportamento, em formação básica e em disposição para aprender?
- Como avaliar alunos focados, diferenciando-os dos autônomos e dos inseguros?
- Uma nota oito (8,0) representa meramente um número associado à quantidade de acertos de um determinado aluno. Então, como associá-lo à construção dos conceitos químicos?

Ciente desses fatos e necessitando avaliar os alunos da classe em questão, tentou-se averiguar quais os saberes haviam construídos pelos alunos, por meio da prova bimestral dissertativa obrigatória (última prova do bimestre, anterior ao processo de reavaliação).

AVALIAÇÃO DISSERTATIVA

Os itens avaliativos, que, unidos, formavam a prova bimestral foram assim redigidos:

QUESTÃO 1: Ao testar a combustão da hidrazina em presença de ar, um químico constatou que havia formação de nitrogênio gasoso e de água líquida, bem como a liberação de 585 kJ/mol no estado-padrão. Ao se queimar hidrogênio ao ar, ocorre produção de um único composto (X) e a liberação de 286 kJ/mol no estado-padrão. Sabendo que as massas atômicas do hidrogênio e do nitrogênio são, respectivamente, 1u e 14u, diga:

- (a) Que composto é liberado na combustão do H_2 ? *Mostre seu raciocínio.*
 - (b) Escreva a equação termoquímica para a combustão da hidrazina.
 - (c) Calcule a capacidade calorífica dos combustíveis. *Mostre os cálculos.*
 - (d) Ao entrar na atmosfera de um planeta como o nosso, que possui oxigênio (comburente), este foguete poderá utilizar uma das substâncias como combustível. Qual das substâncias você sugere utilizar? *Mostre seu raciocínio.*
-

QUESTÃO 2: Um foguete projetado para missões interplanetárias possui dois tanques, cada qual contendo uma substância sólida: hidrogênio (H_2) e hidrazina (H_2N-NH_2). Sabendo que a hidrazina funciona como o combustível para o foguete:

- (a) Escreva a equação balanceada que ocorre entre as duas substâncias, sabendo que a amônia é o único produto desta reação.
 - (b) Qual seria a função desempenhada pelo hidrogênio neste processo? *Explique.*
 - (c) Por que os tanques encerram substâncias no estado sólido? *Mostre seu raciocínio.*
-

QUESTÃO 3: Ao entrarem no motor do foguete, a hidrazina e o hidrogênio sublimam, transformando-se em gases. Sabendo que no primeiro tanque há 3200 toneladas de hidrazina, e no segundo, 400 toneladas de hidrogênio, responda:

- (a) Por que é importante a sublimação das substâncias antes da reação entre as mesmas?
- (b) Qual a quantidade de matéria, em mols, de cada uma das substâncias presente nos tanques? *Mostre os cálculos.*
- (c) Sabendo que as substâncias reagem na proporção de 1:1, há excesso de alguma das substâncias? *Mostre seu raciocínio.*

As questões acima tentam cobrir aspectos importantes da termoquímica ministrados durante as aulas regulares do curso de Química e de Física no Ensino Médio, além de tentar verificar se os conceitos foram construídos pelos alunos em conformidade com os paradigmas atuais da ciência.

Ao formulá-las, tentou-se também cobrir a maior parte dos aspectos investigados pelos alunos durante a experiencição, a concepção de reagente limitante (associada à de excesso), a escolha de uma determinada substância para servir como combustível em uma certa situação, as condições a serem respeitadas para que uma mistura de duas substâncias possa sofrer ignição (ou combustão), tal como detalhado a seguir.

Questão 1

Nesta questão, cada item tinha uma meta específica:

(a) No primeiro item, a intenção era avaliar se o aluno sabia escrever a combustão do hidrogênio, com a respectiva formação de água. Esta equação é uma das primeiras a ser mostrada aos alunos (juntamente com a combustão do carbono) e, a maior parte deles, define-a como básica ao entendimento do fenômeno de combustão.

(b) Neste item é pedido ao aluno que interprete o enunciado da questão; por meio deste, o avaliado acompanhava a sequência informações sobre as substâncias e descrevia o processo de combustão da hidrazina por interação com o oxigênio do ar. Neste item, foram avaliadas as noções relativas aos estados físicos dos compostos envolvidos e ao conceito de reação exotérmica.

(c) No penúltimo item, o aluno irá averiguar o poder calorífico de cada combustível. Para tanto, ele deverá dividir a entalpia de combustão pela massa molar, obtendo assim a quantidade de calor liberado por grama.

(d) Este último item cobra do aluno uma aplicação da propriedade denominada capacidade calorífica, a qual foi calculada no item anterior. Muito mais que atrelá-la ao item anterior, neste item se quer saber do aluno como a capacidade calorífica pode ser utilizada na escolha de um combustível – tal como feito por

Teixeira quando escolheu o etanol como combustível do LTP.¹⁴

Questão 2

Nesta questão, trabalhou-se com uma proposta diferente: os alunos iriam trabalhar com um comburente incomum (hidrogênio), que, em geral, é considerado pelos alunos como um importante combustível.

(a) No primeiro item, a intenção era deixar claro que a hidrazina era o combustível, faltando ao aluno entender que o hidrogênio não estava desempenhando seu papel costumeiro. Assim como no item (b) da questão 1, era pedido ao aluno que interpretasse o enunciado da questão e, por fim, acompanhasse a sequência de dicas sobre as substâncias e descrevesse o processo de combustão da hidrazina por interação com o hidrogênio.

(b) O aluno deveria perceber que na reação descrita, se a hidrazina é o combustível, a substância em questão deveria cumprir o papel de comburente.

(c) Neste último item, o estudante deveria entender que compostos no estado gasoso ocupa um volume muito maior do que no estado sólido. Como o enunciado fala em missões interplanetárias, o avaliado deveria perceber que a nave teria de levar uma grande quantidade de combustível, o que inviabilizaria tanques contendo gases.

Questão 3

Nesta questão, os alunos revisitariam conceitos químicos basilares como a concepção de reagente limitante (associada à de excesso) e o cálculo estequiométrico envolvendo quantidade de matéria.

(a) No primeiro item, a intenção era deixar fazer o estudante notar o porquê de se sublimar o combustível, associando, se possível, a sublimação dos combustíveis presentes ao tanque dos foguetes com o frasco utilizado para aspergir o etanol no interior do tubo plástico, antes da ignição do combustível.

(b) Neste segundo item, a proposta era calcular a quantidade de matéria do hidrogênio e da hidrazina. Para isto, o aluno deveria calcular a massa molar de cada componente dado e, por regra de três ou pela utilização de uma fórmula

¹⁴ Deve-se ficar claro que Teixeira não escolheu o de maior capacidade calorífica para o LTP, uma vez que esses combustíveis (gás de isqueiro e querosene) provocavam a fusão parcial do material plástico.

conhecida pelos alunos – transcrita na lousa por ocasião da prova –, deveria obter a quantidade de matéria de ambas as substâncias, em mols.

(c) No item final da prova, associava-se as quantidades já calculadas no item anterior ao princípio básico da estequiometria. De modo a evitar que este item ficasse totalmente dependente do item (b), revelou-se a proporção estequiométrica entre as duas substâncias químicas. Neste item, era intenção ainda visibilizar que a escolha de um combustível segue determinadas normas, que existem condições que devem ser observadas para que uma mistura possa sofrer ignição (ou combustão).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE AVALIAÇÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados referentes: (1) ao experimento realizado pelos estudantes, tomando por chave analítica o roteiro estruturado presente no Anexo, e (2) às provas bimestrais, ficando as discussões para o capítulo 6.

No primeiro item (5.1.) apresentam-se os dados relativos à comparação entre grupos que realizaram a experiência entre os anos de 2010 e 2013, nele se incluindo a turma analisada (equipes K/L e M/N, de 2013).

No segundo item, mostram-se exemplos de como alunos relataram sua experiência frente ao roteiro estruturado – no qual eles praticamente se limitaram a responder o que lhes foi perguntado, tal como se percebe pelas respostas dadas no relatório relativo ao roteiro estruturado.

No último item, apresentam-se os resultados médios das provas bimestrais dos alunos da turma de 2013 (equipes K/L), divididos em grupos G1, G2 e G3, aqui focalizados. Na análise retomam-se estes dados para comparar os resultados dos grupos, levando-se em consideração o desempenho dos estudantes ao longo de 2012 e 2013;

5.1. RESULTADOS OBTIDOS COM O ROTEIRO SEMIESTRUTURADO

A primeira turma de alunos (2010) para a qual foi sugerido roteiro semiestruturado, quando inquirida sobre algum tipo de modificação para aumentar a eficiência do LTP, sugeriu que se dobrasse a quantidade de etanol no interior do tubo plástico, passando de uma para duas borrifadas. O resultado, que causou estranhamento, foi também o mais rico do ponto de vista de aprendizagem. Os resultados encontram-se na tabela 1.

Tabela 1: Altura máxima (Hmax), altura média (Hmed) atingida pelo projétil e respectivo desvio médio (Dm) dos ensaios das equipes que utilizaram 0,15 mL (A) ou 0,30 mL (B) de etanol hidratado como combustível.

Equipe	H _{max} / m					H _{med} / m	Dm / m
A	4,80	4,95	4,95	4,90	5,00	4,92	0,06
B	4,85	5,05	5,00	4,90	4,95	4,95	0,06

Em novembro de 2010, alunos de outra sala repetiram o experimento, no qual o grupo C utilizou etanol comercial 96%, e o grupo D utilizou o etanol absoluto (PA). Uma vez aspergido o etanol, os grupos dispararam os projéteis cinco vezes para o alto e anotaram as alturas atingidas por estes. Os resultados aparecem abaixo tabelados.

Tabela 2: Alturas máximas (Hmax), altura média (Hmed) atingida pelo projétil e respectivo desvio-médio (Dm) de ensaios das equipes que utilizaram 0,15 mL de etanol hidratado (C) ou etanol absoluto (D) como combustível.

Equipe	H _{max} / m					H _{med} / m	Dm / m
C	4,90	4,80	5,10	5,00	5,00	4,96	0,08
D	5,05	5,20	5,10	5,15	5,10	5,12	0,04

A primeira turma de 2011 já havia conversado com os alunos do ano anterior e estavam conscientes das modificações sugeridas e mesmo dos resultados obtidos. A proposta desta turma foi a de realizar o experimento com o álcool etílico comercial e verificar se, ao aumentar a distância entre as pontas dos fios no interior do tubo plástico, ocorreria a formação de uma faísca maior e a combustão mais efetiva do álcool, aumentando a eficiência do LTP. Os resultados estão tabulados a seguir (tab.3).

Tabela 3: Altura máxima (Hmax), altura média (Hmed) atingida pelo projétil e respectivo desvio médio dos ensaios utilizaram 0,15 mL de etanol hidratado, deixando 2 mm (Equipe E) ou 5 mm (Equipe F) como espaçamento entre os fios do ignitor piezelétrico.

Equipe	H _{max} / m					H _{med} / m	Dm / m
E	4,85	4,80	5,10	5,15	5,10	5,00	0,14
F	4,95	5,00	5,20	5,10	5,00	5,05	0,08

Em setembro de 2012, como professor de um dos *campi* do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), repeti o procedimento com os alunos de uma de minhas turmas do segundo ano do Ensino Médio. Divididos em duas equipes, G e H, os alunos testaram o LTP e submeteram-no a quantidades diferentes de etanol, verificando que a quantidade de combustível para esta situação não alterava o desempenho do instrumento. Os resultados deste experimento encontram-se na tabela 4.

Tabela 4: Altura máxima (Hmax), alturas médias (Hmed) e respectivos desvios médios (Dm) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL (Equipe G) ou 0,30 mL (Equipe H) de etanol hidratado como combustível.

Equipe	Hmax / m					Hmed / m	Dm / m
G	4,75	4,90	4,90	4,80	4,85	4,84	0,05
H	4,85	4,75	5,00	4,80	4,70	4,82	0,08

Em outubro de 2012, o ensaio foi repetido com mais duas equipes. Na ocasião, uma equipe (I) utilizou etanol comercial como combustível, enquanto a outra (J) utilizou o etanol absoluto (PA). Os experimentos foram repetidos por cinco vezes e os resultados encontram-se na tabela 5.

Tabela 5: Altura máxima (Hmax), altura média (Hmed) e respectivos desvios médios (Dm) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL de etanol hidratado (equipe I) ou etanol absoluto (equipe J) como combustível.

Equipe	Hmax / m					Hmed / m	Dm / m
I	4,80	4,85	5,00	4,90	4,70	4,85	0,09
J	4,95	5,10	5,00	5,05	4,95	5,01	0,05

Em abril de 2013, dois grupos de uma nova turma (grupos K e L) realizaram os ensaios utilizando etanol hidratado (96 % de álcool) dentro do tubo de filme fotográfico. A equipe K aspergiu o álcool uma única vez, e deixou uma distância de dois milímetros (2 mm) entre as pontas dos fios do ignitor. A equipe L, por seu turno, repetiu o procedimento, aumentando a distância entre as pontas dos fios para cinco milímetros (5 mm). Os resultados obtidos encontram-se na tabela 6.

Tabela 6: Altura máxima ($H_{\max}$), altura média (H_{med}) e respectivos desvios médios (D_m) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL de etanol hidratado e deixando 2 mm (equipe K) ou 5 mm (equipe L) de distância entre as pontas dos fios do ignitor piezelétrico.

Equipe	$H_{\max}$ / m					H_{med} / m	D_m / m
K	4,95	4,90	4,60	4,65	4,90	4,80	0,14
L	5,00	4,80	4,75	4,90	4,80	4,85	0,08

Em abril de 2013, dois novos grupos de alunos se juntaram e, trabalhando em parceria com a oficina de manutenção, fixaram um primeiro tubo plástico à tampa que funciona como base e, furando o fundo deste primeiro tubo, adaptaram um segundo tubo a este. Com esta adaptação, esperavam que dois novos fatores contribuíssem para o aumento da altura máxima ($H_{\max}$) a ser atingida pelo projétil, pois o volume de oxigênio seria maior que o original (praticamente o dobro) e o encaixe, entre os tubos, permitiria – provavelmente – uma diminuição do atrito entre o projétil e sua base. Os resultados obtidos podem ser comprovados pelos resultados da tabela a seguir.

Tabela 7: Altura máxima ($H_{\max}$), altura média (H_{med}) e respectivos desvios médios (D_m) dos ensaios com o LTP, utilizando 0,15 mL de etanol hidratado e fixando um único tubo à tampa (equipe M) ou aumentando o volume (equipe N).

Equipe	$H_{\max}$ / m					H_{med} / m	D_m / m
M	4,90	4,95	4,80	4,75	4,95	4,87	0,07
N	12,00	12,50	12,00	13,00	12,50	12,40	0,32

5.2. OS RESULTADOS OBTIDOS PELO ROTEIRO ESTRUTURADO

Para entender o quanto este roteiro funcionou como um tipo de estudo dirigido, tomou-se a liberdade de se transcrever os dados relativos a dois relatórios individuais escolhidos ao acaso e cujos autores terão seus nomes preservados¹⁵. A partir de agora, cada aluno será referido por um denominativo A1 (aluno do grupo G2) ou A2 (aluno do grupo G3). Esclarece-se aqui que o texto original do roteiro

¹⁵ A análise foi realizada a partir de todos os roteiros. Entretanto, por questão de espaço, transcrevo aqui apenas dois dos relatórios, ambos de escolhidos ao acaso, uma vez que as respostas de muitos alunos se repetiam, uma vez que faziam parte da mesma equipe.

estará em destaque (garamond 12 e itálico) e que as respostas dadas às questões do roteiro por estes dois alunos estarão citadas entre aspas.

Para medirmos o rendimento de uma determinada máquina, devemos comparar o trabalho realizado por ela com a quantidade de energia que ela recebeu.

O rendimento pode ser dado simplesmente por:

$$\eta = \frac{W}{Q_C}$$

onde W corresponde ao trabalho e QC ao calor fornecido através da reação de combustão. Nessa atividade, o combustível em questão é o álcool etílico.

(a) Escreva a fórmula estrutural e molecular do álcool etílico, lembrando que o nome oficial do mesmo é etanol.

Fórmula estrutural	Fórmula molecular
$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	“ C₂H₅OH ” (A1) “ C₂H₆O ” (A2)

Conforme o que foi estudado durante o curso de termoquímica, a reação de combustão completa de um combustível pode ser equacionada através da adição de gás oxigênio ao mesmo, com a formação de gás carbônico e vapor de água.

(b) Escreva essa equação química balanceada.



Para se determinar o calor fornecido pela queima desse combustível, é necessário o cálculo da variação de entalpia, (ΔH). Consultando uma tabela de entalpias de formação, obtêm-se as seguintes informações:

Substância	Entalpia de formação / kJ. mol ⁻¹)
C ₂ H ₅ OH(l)	-277,6
CO ₂ (g)	-393,5
H ₂ O(g)	-283,8

(c) A partir dos dados da tabela acima, calcule o valor do ΔH da reação química.

(A1) e (A2)

$$\Delta H = H_p - H_r$$

$$\Delta H = [2. (-393,5) + 3. (-283,8)] - [1. (-277,6) + 3. (0)]$$

$$\Delta H = -1360,8 \text{ kJ / mol}$$

Esse valor de ΔH calculado diz respeito a uma reação hipotética que consome 1 mol do combustível e 3 mols de gás oxigênio. Nas condições experimentais, isso não é verdade. Então vamos calcular essas quantidades.

(d) Uma borrifada de álcool equivale a 0,15 mL ($1,5 \cdot 10^{-4}$ L). Como a densidade do álcool pode ser considerada igual a 0,80 g/mL, a massa do mesmo é de:

(A1) e (A2)

$$m = d \cdot V$$

$$m = 0,8 \text{ g/mL} \cdot 0,15 \text{ mL}$$

$$m = 0,12 \text{ g}$$

(e) Como a massa molar equivale a 46 g/mol, a quantidade de matéria (em mol) do combustível é de:

$$(A1) \quad \begin{aligned} & "n = m / M " \\ & "n = 0,12 / 46 " \\ & "n = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ mols} " \end{aligned}$$

$$(A2) \quad \begin{aligned} & "46 \text{ g} / 1 \text{ mol} = 0,12 \text{ g} / X " \\ & "X = 0,12 / 46 = 0,00261 " \\ & "X = 0,00261 \text{ mols de álcool} " \end{aligned}$$

Quantidade de oxigênio nas condições experimentais

Com uma régua, meça o diâmetro e a altura do tubo plástico. Como o raio da circunferência é metade do seu diâmetro, temos:

$$"R = 3,0 \text{ cm} " \text{ (A1 e A2)} \qquad "h = 4,8 \text{ cm} " \text{ (A1 e A2)}$$

A área de um círculo é dada pela relação $A = \pi \cdot R^2$. Em nosso caso, a área calculada será:

$$(A1) \quad \begin{aligned} & "A = \pi \cdot (1,5)^2 " \\ & "A = 7,1 \text{ cm}^2 " \end{aligned}$$

$$(A2) \quad \begin{aligned} & "A = \pi \cdot (1,5)^2 " \\ & "A = 7,0686 \text{ cm}^2 " \end{aligned}$$

O volume de um cilindro é calculado por $V = A \cdot h$. Em nosso caso, o volume será igual a:

$$(A1) \quad "V = 7,1 \cdot 4,8 = 34,1 \text{ cm}^3 "$$

$$(A2) \quad "V = 7,0686 \cdot 4,8 = 33,929 \text{ cm}^3 "$$

Lembrando que $1\text{L} = 1000 \text{ cm}^3$, o volume do tubo plástico (em L) é:

$$(A1) \quad "V = 34,1 / 1000 = 3,41 \cdot 10^{-2} \text{ L} "$$

$$(A2) \quad "V = 33,929 / 1000 = 0,033929 \text{ L} "$$

Como o volume molar dos gases, nas condições do experimento ($V_m = 24,5 \text{ L/mol}$), a quantidade de matéria (em mol) é:

$$(A1) \quad "V = 3,41 \cdot 10^{-2} / 24,5 = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ mol} "$$

$$(A2) \quad "24,5 \text{ mol} / 1\text{L} = X / 0,033929 "$$

$$"X = 0,0013847 \text{ mol} "$$

(f) Como o gás oxigênio corresponde a 21% em volume do ar, quando a temperatura e a pressão no local do experimento forem constantes, a porcentagem em volume e em mol são iguais. Portanto, a quantidade em mol do gás oxigênio dentro do tubo plástico antes de borrfar o etanol será de:

$$(A1) \quad "n = 21/100 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3} = 2,92 \cdot 10^{-4} \text{ mol de } O_2 "$$

$$(A2) \quad "n = 0,21 \cdot 0,0013847 = 0,0002907 \text{ mol} "$$

$$"n = 2,907 \cdot 10^{-4} \text{ mol de } O_2 "$$

Calor cedido pela queima do combustível

Na parte teórica, calculamos o ΔH para uma reação hipotética que consome 1 mol do combustível e 3 mols de gás oxigênio. Com os cálculos das quantidades reais das substâncias, verificamos que os mesmos não estão em quantidades estequiométricas (proporcionais). O reagente que está, proporcionalmente, em menor quantidade é chamado de limitante. Nesse caso, o reagente limitante é o (A1) oxigênio/ (A2) gás oxigênio.

Para se calcular o calor cedido pela queima do combustível, basta fazer uma "regrinha de três" entre os valores hipotéticos e reais do ΔH e do reagente limitante.

(f) Portanto, o calor cedido pela reação química será (QC) igual a:

$$(A1) \quad "3 \text{ mols} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad 1360,8 \text{ kJ} "$$

$$2,92 \cdot 10^{-4} \text{ mols} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad Q_c$$

$$"Q_c = 0,132 \text{ kJ} "$$

$$(A2) \quad " 3 \text{ mols } \underline{\hspace{1cm}} 1360,8 \text{ kJ } "$$

$$0,0002907 \text{ mols } \underline{\hspace{1cm}} \quad Q_c$$

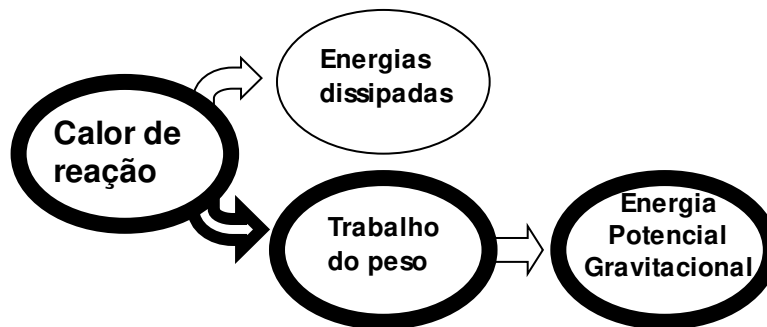
$$" Q_c = 0,13186 \text{ kJ } "$$

No processo físico, descrito pela primeira Lei da Termodinâmica, o calor cedido pela reação química é utilizado em parte para aumentar a energia interna do sistema e em parte na realização de um trabalho.

Se lançarmos o nosso projétil (tubo) na vertical, a pressão atua até o tubo se destacar de sua tampa. A partir daí as forças que atuam sobre nosso projétil são o peso e a resistência do ar. A resistência do ar não é uma força conservativa, de forma que a energia que ela dissipa não pode ser transformada em movimento, quando o projétil retorna em queda. Resta-nos, então, somente o peso.

O teorema da energia mecânica garante que um sistema conservativo a energia mecânica é a mesma em qualquer ponto da evolução do sistema. Assim, quando disparamos o projétil, ele irá atingir uma altura máxima, e esta altura em relação ao solo tem uma energia potencial gravitacional. O trabalho da força peso equivale numericamente ao valor da energia potencial neste ponto mais alto.

De forma esquematizada, podemos ilustrar o processo da seguinte forma:



Para determinar efetivamente o trabalho útil (do peso), vamos medir até que altura o tubo é lançado. Para isso, será necessário que pelo menos três colegas façam a tarefa juntos.

O primeiro irá lançar, enquanto outro registra, contra uma parede de fundo, o ponto mais alto atingido pelo projétil (tubo). O terceiro, então, com uma trena, mede a altura alcançada (Há a

alternativa de se marcar previamente a parede para facilitar a coleta da medida de altura máxima).

Faça cinco medidas, preencha a tabela e na última linha faça a média destas. A seguir, responda as perguntas. Considere a massa do tubo igual a 7,0 g (em média) e a aceleração gravitacional local como 9,81 m/s².

Tabela: Altura máxima (H_{máx}) atingida pelo projétil, Trabalho realizado (W) sobre o projétil, Calor cedido (Q_c) ao projétil e Energia dissipada. [Exemplo demonstrativo]

	H _{máx} /m	W (módulo) /J	Q _c / J	Energia dissipada / J
A1	5,0	0,34	132	131,66
A2	5,2	0,36	131,86	131,50
MEDIA	5,1	0,35	131,92	131,57

(g) Onde foi parar a energia não utilizada que fora fornecida pela reação? (dê pelo menos três exemplos).

(A1) “A energia se dissipou na forma de atrito (do tubo plástico com a tampa), por meio do barulho e pelo fato do sistema se abrir no momento do estouro”.

(A2) “A energia não utilizada que foi fornecida pela reação perdeu-se na forma de energia sonora, pelo atrito entre as partes do canhãozinho e pelo aquecimento do tubo plástico”.

(h) Em função das médias obtidas, calcule o rendimento deste lançador.

(A1) “ $\eta = W / Q_c = 0,34/132$ “ “ $\eta = 0,0026$ ou 0,26%”

(A2) “ $\eta = W / Q_c = 0,36/131,86$ “ “ $\eta = 0,0027$ ou 0,27%”

(i) Se este lançador pudesse aproveitar 100% da energia cedida pela reação, e convertê-la em energia potencial gravitacional, a que altura o tubo chegaria?

(A1) “ $W = m \cdot g \cdot H_{máx}$ ” “ $H_{máx} = W / (m \cdot g) = 132 / (0,007 \cdot 9,81) = 1922,2 \text{ m}$ ”

(A2) “ $W = m \cdot g \cdot h$ ” “ $h = W / (m \cdot g) = 131,86 / (0,007 \cdot 9,81) = 1920,2 \text{ m}$ ”

(j) *Pesquise o rendimento de outras máquinas térmicas, tais como carro, avião, foguete, ser humano, etc. e compare os rendimentos médios entre elas e veja quão surpreendente é o resultado! (para o lar).*

(A1) “A eficiência do motor à combustão é de cerca de 20% e a do motor a vapor é inferior a 10% (Wikipedia). Na mitocôndria, o rendimento energético pode chegar a 60% (Revista Ciência Hoje)”.

(A2) [Não respondeu a questão].

5.3. OS RESULTADOS OBTIDOS NA AVALIAÇÃO BIMESTRAL

Tabulando-se os resultados obtidos pelos alunos e apresentando-os sob a forma de uma tabela (tab. 8), temos os seguintes resultados:

Tabela 8: Número de alunos, médias das avaliações, variância das notas das avaliações para o grupo controle (G1), grupo em que os alunos não tiveram aula sobre a História das Ciências (G2) e grupo que participou das três fases do experimento (G3).

Grupo	Número de alunos	Notas												Média	Desvio-padrão
G1	10	-	-	0	0	2	3	4,5	5	6	6,5	7	9	4,3	3,3
G2	12	F	0	3	3,5	4	5	6,5	7	7	8	9	10	5,7	2,9
G3	12	3	6	6	7,5	8	8	8	9	9,5	10	10	10	7,9	2,1

Dos dez alunos do grupo G1, seis deles (60%) ficaram abaixo da média da sala (6,0) para esta atividade. Composto por três alunos situados entre os que apresentaram as notas mais baixas no primeiro bimestre, quatro alunos que tiveram desempenho mediano ao longo do bimestre inicial e três alunos com médias altas, o G1 foi o grupo de menor média aritmética entre os três grupos (4,3 pontos). Cabe, contudo, um destaque positivo: um aluno (não incluído entre os de melhor ou pior desempenho) teve nota na avaliação igual a nove (9,0 pontos), superando inclusive os alunos que no primeiro bimestre haviam tirado melhores médias bimestrais; o destaque negativo para este grupo de controle, ficou por conta de dois avaliados que tiraram zero na avaliação dissertativa.

Dos doze alunos do G2, um deles não compareceu à avaliação, apenas um não conseguiu responder às questões propostas e dois deles merecem destaque positivo em relação as notas obtidas: o primeiro tirando nota máxima e o segundo que teve nota igual a nove (9,0 pontos). É fundamental ressaltar ainda que, neste grupo, apenas cinco dos onze alunos tiveram nota menor que a média, o que equivale a 45% do G2. O grupo (G2), constituído por três alunos situados entre os que apresentaram as piores notas no primeiro bimestre, cinco alunos que tiveram desempenho mediano ao longo do bimestre inicial e três alunos com médias altas, como se pode notar na tabela 8, apresentou uma média superior ao G1 e inferior ao G3, obtendo média igual a 5,7 pontos.

Os doze alunos do G3 foram os que apresentaram as notas mais altas das avaliações bimestrais dissertativas. O destaque positivo a ser citado é relativo ao fato de um único aluno ter ficado com nota abaixo da média da sala, o que equivale a 8% do grupo G3. Composto por cinco alunos situados entre os que apresentaram as piores notas no primeiro bimestre, quatro alunos que tiveram desempenho mediano ao longo do bimestre inicial e três alunos com médias altas, o G3 superou as expectativas: nenhum dos alunos zerou a avaliação, três deles tiraram a nota máxima e, por fim, o grupo foi o que apresentou a melhor média (7,9 pontos).

Os desvios-padrão calculados (σ) por meio da tabela 8 nos mostra que no terceiro grupo (G3) a variação de notas foi menor, estando a nota de onze alunos na faixa que varia de 5,8 ($X_{\text{médio}} - \sigma = 7,9 - 2,1 = 5,8$) a 10,0 ($X_{\text{médio}} + \sigma = 7,9 + 2,1 = 10,0$). Efetuando-se cálculos semelhantes, pode-se dizer que no segundo grupo (G2), excluindo-se da média a nota do aluno que não compareceu à avaliação bimestral, o desvio-padrão foi igual a 2,9, estando, portanto, a nota da maioria dos alunos entre 2,8 e 8,6. Como a maior variância de notas ocorreu, notadamente no grupo de controle (G1), o desvio-padrão calculado para este grupo foi igual a 3,3, estando, por esta razão, a nota da maioria dos alunos situada entre 1,0 e 7,6.

Para concluir esta apresentação dos dados, seria importante ressaltar que a formação dos grupos deveu-se à disponibilidade dos alunos em poder participar de atividades no contra-período. Os dez alunos do G1, por razões diversas, não podiam estar presentes à escola no período da tarde; dos que sobraram, metade poderia vir

ao colégio apenas uma única tarde, para realizar a experiencição, e igual número dispôs-se a vir duas vezes no contra-período, assistindo assim à aula sobre a História das Ciências e realizando a experiencição.

Chamou também a atenção o fato de a média da classe, nesta avaliação, ter sido igual a 6,0 pontos – exatamente a nota mínima para a aprovação na escola analisada. Este fato, inédito para esta turma de alunos na disciplina de Química, sugere que a introdução da experiencição e da História das Ciências realmente amplia a cognição dos alunos, que, na média, apresentam melhor desempenho, no que tange às notas bimestrais.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES CIENTÍFICO-PEDAGÓGICAS

Assim como indicado anteriormente, este capítulo é tripartido: na primeira parte, tem lugar a análise da aula teórica ministrada, tendo por base a participação dos alunos; na segunda, o objeto de discussão é o experimento em si, os princípios teóricos e práticos de um roteiro estruturado e de sua modificação para um semiestruturado; na terceira, discute-se como (e se) os resultados obtidos na experiencição ajudaram na compreensão dos fatos experimentais, na construção conceitual e na resolução da prova bimestral dissertativa.

6.1. SOBRE A AULA TEÓRICA

Quando se percebeu que o desempenho dos alunos não era condizente com sua dedicação ao experimento, tentou-se entender o que lhes faltava. Parecia que os estudantes não conseguiam relacionar o que se mostrava por meio da teoria e o que se cobrava nas avaliações, mesmo que as questões fossem retiradas – palavra por palavra – do roteiro experimental. Alguns estudantes não percebiam a similaridade completa entre o que haviam respondido no relatório e as questões da prova bimestral, embora ela tivesse questões que foram amplamente tratados durante a experimentação, realizada tomando por base o roteiro estruturado.

A introdução do roteiro semiestruturado pareceu dar maior consistência relacional entre o que se fazia na prática e o que se cobrava nas avaliações. Os alunos passaram a entender que a não obviedade da História das Ciências tinha sua razão de ser. Se não, como entender a origem de certos conceitos que hoje são considerados triviais?

A maioria dos jovens estranhava, por exemplo, o fato de o conceito de espaço não existir na filosofia helênica do período clássico, mas entendiam que este fato poderia estar associado, de algum modo, à concepção aristotélica de “lugar de alguma coisa”, ou seja, que o lugar só existia quando estava preenchido por algo;

daí, talvez a dificuldade de se pensar em um lugar em que nada exista e o fato de não existir o numeral zero na matemática helênica. O próprio Einstein atribui a Descartes e a sua Geometria Analítica a “descoberta” da concepção de espaço, tal como explicado no Apêndice (A.1.1.)

O estudo da História das Ciências pode ser altamente educativo, tanto para os especialistas em Ciências quanto para os que apresentam interesse exclusivamente filosófico. Ela deve desvelar não só as teorias que dela resultaram, mas os problemas envolvendo os cientistas e o contexto a que estavam submetidos. Apesar de muitos conceitos terem sua gênese temporal desconhecida, deve-se perceber que a ciência começou a ganhar corpo no Ocidente a partir do momento que se começou a entender melhor a ciência desenvolvida no Oriente, seus princípios e os produtos dela resultantes (exemplarmente, a pólvora e a bússola).

Na opinião de Schenberg (2001, p.38), “*A História da Ciência é mais fascinante que um romance policial. O mistério [do romance] é revelado no fim, mas o da ciência nunca se esclarece*”. Assevera ainda que o estudo da História da Ciência é muito importante, sobretudo para os jovens, pois pode lhes revelar a gênese do conhecimento, coisa que o ensino universitário, extremamente dogmático, não faz.

A análise da evolução das máquinas térmicas, por exemplo, nos permite ver que Watt se preocupava em resolver problemas técnicos a elas relativos, e que foi deveras insidioso ao associar seu conhecimento tecnológico às concepções científicas de Joseph Black – primeiro cientista a separar as concepções de temperatura e de calor e o primeiro a construir um calorímetro. Some-se a isto o fato de Watt estar sempre cercado por industriais ricos – verdadeiros capitalistas – que, por interesse em auferir maiores lucros, financiavam as suas ideias.

Interessante notar como o estudo das máquinas a vapor pode ajudar a entender aspectos bem diversos da História das Ciências. Pode-se mostrar, por exemplo, que a maior parte das florestas do Reino Unido já havia sido devastada durante a fase inicial da Revolução Industrial e que a necessidade de se utilizar o

carvão mineral como combustível levou à pesquisa de máquinas que auxiliassem na retirada de água das minas. As bombas já existiam, mas necessitavam de muito trabalho braçal para funcionar; o uso do vapor ampliou grandemente a força utilizada no bombeamento, além de liberar braços para a exploração¹⁶ do carvão.

Os aspectos históricos trabalhados em sala de aula, notou-se que o conceito de calor era muito mais recente do que os alunos imaginavam. A concepção inicial, denominada de força viva, dominava o imaginário da ciência; o calor, apesar de ser uma coisa comum, não era compreendido. Só com a ideia de que o calor e trabalho eram modalidades de energia e que ambos poderiam ser associados ao conceito de energia cinética é que os cientistas puderam entender seus princípios, apesar de a Segunda Lei da Termodinâmica nunca ter sido provada a partir de equações puramente dinâmicas (SCHENBERG, 2001, p.86). Só este fato, per se, já demonstra a importância do caráter experimental – de experiência – que, há muito, está presente às Ciências, notadamente na Termodinâmica.

6.2. SOBRE A EXPERIMENTAÇÃO/EXPERIENCIAÇÃO

6.2.1. O FUNCIONAMENTO DO LTP

A construção deste artefato é muito simples: um tubo de material polimérico montado sobre uma base de madeira e que utiliza um ignitor piezelétrico para iniciar a combustão do etanol (em solução ou absoluto). O problema é que a análise do LTP, para ser minimamente inteligível, tem que ser dividida em momentos distintos: no primeiro, o combustível é aspergido no tubo; no segundo, uma faísca causa a ignição do combustível em um sistema fechado; a produção de gases que se expandem leva à abertura do sistema e marca a passagem para o terceiro momento, em que ocorre a ejeção do projétil.

¹⁶ Deve-se ter cuidado com este conceito: explorar é sinônimo de “tirar proveito” da fé das pessoas, geralmente, de maneira escusa; explorar, por seu turno, é um termo técnico utilizado quando se quer referir à retirada, extração ou obtenção de recursos naturais.

Após montar o LTP e vedar com cola quente os pequenos orifícios pelos quais passavam os fios, os alunos aspergiam o combustível no interior do tubo plástico que funcionava como projétil do artefato. Ao longo de todos esses anos, apenas uma equipe se preocupou em entender o que ocorre quando se borrifa a solução de etanol (ou etanol absoluto; efemeramente outro combustível) dentro do tubo.

Os alunos que participaram das experiências foram (praticamente) unânimes em afirmar que a entrada do etanol acarretava a saída do ar e, com este, do oxigênio, reagente tão necessário ao processo de ignição. Para entender melhor o ocorrido, buscaram-se informações a respeito do etanol: Quando puro, entra em ebulição a $78,4^{\circ}\text{C}$ à pressão de 760 mmHg, tem limite superior de 19% e inferior de 3,3% de explosividade ao ar e temperatura de autoignição de 363°C . Quando em solução, possui ponto de fulgor de $12,2^{\circ}\text{C}$ (em ambiente fechado) e densidade de 803 kg/m^3 , a 25°C . A análise dos dados nos mostrarão, mais adiante, o porquê de o etanol funcionar tão bem como combustível para o LTP.

Analisando as aproximações do roteiro estruturado

Para começar a análise, deve-se estar atento a três aproximações sugeridas no roteiro estruturado de Teixeira, Ramos e Cruz (2006): (1) que o volume de solução de etanol aspergido/borrifado era de 0,15mL; (2) que a densidade da solução poderia ser tomada como sendo 800 kg/m^3 ou $0,8\text{ g/mL}$; (3) que a massa do projétil (tubo plástico) poderia ser considerada igual a 7,0g.

Para confirmá-las, procedeu-se segundo uma lógica comum aos procedimentos analíticos em Química:

(1) Transferiu-se 5,0 mL de solução de etanol para um borrifador; borrifou-se a solução de etanol dentro de um tubo plástico (tarado, com a respectiva tampa), fechando-se o sistema rapidamente e pesando-o em uma balança analítica. As massas de solução, para dez (10) amostras aspergidas, estão presentes na tabela 9.

Tabela 9: Massa de solução de etanol aspergido, a 26°C, em tubos com tampa e cujo conjunto havia sido previamente tarado.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Massa/g	0,1198	0,1206	0,1234	0,1184	0,1196	0,1248	0,1180	0,1203	0,1179	0,1182

Os dados acima proporcionaram o cálculo da massa média da amostra (0,1201g) e respectivo desvio-médio (0,0018), os quais se mostraram condizentes com as aproximações feitas pelos autores. Utilizando-se a massa específica da solução de etanol na temperatura do experimento (803 kg/m³), o volume médio calculado seria igual a 0,1496 mL, muito próximo ao utilizado pelos autores (0,15 mL).

(2) Sobre a massa específica da solução de etanol utilizada, consultou-se uma série de publicações sobre o tema. Para a temperatura em que coletamos as medidas relativas às massas, o valor tabelado é de 803 kg/m³; se trabalhássemos com etanol puro, o valor tabelado seria de 789 kg/m³.

(3) O procedimento realizado na determinação da massa da amostra de solução serviu de base para a mensuração da massa média do tubo plástico utilizado. Para os cinco (5) tubos utilizados pelos alunos, os resultados encontram-se na tabela abaixo (tabela 10).

Tabela 10: Massa do tubo plástico, em gramas, que funciona como projétil do LTP.

Amostra	1	2	3	4	5
Massa/g	7,1275	7,1556	6,8972	6,9013	7,0087

Os dados acima proporcionaram o cálculo da massa média dos tubos de material polimérico (7,0181g) e respectivo desvio-médio (0,0988); estes se mostraram condizentes às aproximações feitas pelos autores.

Analisando a aspersão do combustível

A aspersão do combustível dentro do projétil feita por meio de um nebulizador simples tem duplo sentido: ao mesmo tempo que introduz o combustível, ela o dispersa sob a forma de minúsculas gotas, as quais poderão vaporizar com facilidade, misturando-se com o ar de modo a se conseguir a ignição da mesma.

Se compararmos a pressão de vapor dos líquidos presentes na solução a ser aspergida (água e etanol) a 20°C, veremos que o segundo líquido é mais volátil que o primeiro, uma vez que nesta temperatura a pressão de vapor do etanol (44,9 mmHg) é cerca de duas vezes e meia maior do que a da água (17,6 mmHg). É certo que a interação entre estes dois líquidos polares e miscíveis altera o regime de produção de vapor a partir da mistura que foi aspergida, mas ainda assim espera-se que o etanol se vaporize para formar com o oxigênio do ar uma mistura combustível que dará propulsão ao projétil.

Entretanto, pouca atenção é dada a dois fatos: (1) que o próprio combustível aspergido se perde neste ato, e (2) que a aspersão do etanol provoca a entrada das gotas de solução e a saída de uma parte do ar quando da vaporização da solução.

(1) Introduziu-se 5 mL de combustível no frasco nebulizador. As aspersões foram feitas repetidamente até que o frasco ficasse vazio (ou muito próximo disto). O número médio de nebulizações foi igual a 31, o que significa um volume médio aspergido igual a 0,16 mL. Utilizando-se a massa média de solução aspergida e sua respectiva massa específica, obtém-se um valor muito próximo a 0,15mL, o que representa uma perda média de 7,5% do volume borrifado.

(2) Supondo que a massa de solução aspergida seja a média dos valores da tabela 9, ou seja, 0,1201g, isto equivaleria a um volume de 0,15 mL, aproximadamente. Como o volume total do tubo de PVC é muito próximo de 34 mL, sendo 7,1 mL só de comburente, tem-se a falsa impressão de que o volume ocupado pelo combustível pode ser desprezado. O que não se pode esquecer é que,

rapidamente, o etanol vaporiza e passa a ocupar uma parte do volume do ar, expulsando-o do tubo¹⁷.

Analisando a ignição do combustível em sistema fechado.

Supondo que somente após ser fechado é que o combustível começa a vaporizar, já se introduziria uma primeira dificuldade à análise: a pressão no interior do tubo (projétil) subiria até que todo combustível estivesse vaporizado. Supondo que o volume de gases (ar) antes de tampar o tubo fosse igual a 710 mmHg (0,93 atm), a vaporização do combustível, que na forma de gás ideal ocuparia um volume de 64 mL (correspondendo a uma pressão parcial de 1430 mmHg ou 1,88 atm), elevaria a pressão interna do tubo para valor próximo a 2140 mmHg (2,81 atm).

Como a vaporização do etanol não é instantânea, não há tempo hábil para que a pressão interna suba tanto; analisando-se a pressão de vapor do etanol, o aumento causado pela vaporização do etanol pode levar a um acréscimo máximo de 150 mmHg à pressão interna do tubo.

Uma aproximação feita no roteiro estruturado para o cálculo da altura máxima atingida pelo projétil era a de que toda a energia interna do gás, logo após a ignição, seria transformada em trabalho, alçando o tubo a, aproximadamente, 1920 m de altura, por meio de um processo adiabático. Assim, se compararmos a altura máxima média atingida pelo projétil (em torno de 5 metros) com a altura máxima teórica que seria obtida se toda a energia liberada na combustão fosse transformada em trabalho (cerca de 1920 metros), obteríamos um rendimento de 0,3%, em média, para esta máquina térmica.

Teoricamente, 99,7 % da energia é dissipada sob a forma (a) de calor, o que pode ser comprovado pela descrição dos alunos sobre a “labareda” formada e o fato de a tampa do tubo plástico fundir (total ou parcialmente) por conta do calor

¹⁷ Vale aqui uma referência, se 0,1201 g de etanol puro estivesse na forma de gás ideal, ele teria volume aproximado de 64 mL.

liberado, (b) de atrito, notadamente entre a tampa e o encaixe do tubo de PVC, e até, em menor grau, (c) de energia sonora, constatada pelo estampido provocado pelo disparo do LTP.

Cabe lembrar que a temperatura do ponto de fulgor para o etanol (em solução) é de 12,2°C em sistema fechado, o que explica a dificuldade que os alunos têm de fazer o LTP funcionar em dias muito frios; daí a dica de se esquentar o tubo polimérico entre as mãos antes de se borrifar o combustível.

Analisando a abertura do sistema.

Como se pode perceber, enquanto o sistema está fechado, apenas uma parte do combustível está vaporizado. Como a ignição do combustível depende do fato de o etanol estar em fase gasosa, é muito provável que parte dele entre em combustão e que parte seja perdida durante a abertura do sistema. O LTP “ideal” seria aquele que sofreria uma expansão adiabática após a combustão completa de toda solução de etanol.

É interessante notar que a abertura do sistema é causada pela formação de gás carbônico e água (na forma de vapor) que, ao se formarem, sofrem expansão, aumentando a pressão interna do sistema e causando a separação do tubo de PVC e sua tampa (que serve como base). Como o LTP está apoiado no chão, a única forma do gás se expandir é empurrar as paredes do tubo para o lado ou o fundo para o alto, fazendo-o subir.

6.2.2. A PRÁTICA DE ROTEIRO ESTRUTURADO

A prática científica atual parte da premissa de que os fenômenos naturais são regidos por leis de caráter universal. Porém, na natureza, esses fenômenos encontram-se justapostos de modo complexo, o que é incompatível com a elucidação das leis e indica ainda porque as descrições dos dados observáveis são, amiúde, inapropriadas para a construção de conhecimentos básicos, a partir do qual se elabora o saber científico.

Autores como Chalmers (1993) defendem que a ciência requer a obtenção de dados que possuam algum significado, sendo a intervenção experimental a responsável pela ascensão da informação ao patamar no qual se encontram os “dados epistemologicamente relevantes”, ou seja, os que potencialmente podem revelar o funcionamento da natureza.

O problema é que as perspectivas didáticas desejam a comprovação do conhecimento e, para isso, pregam que os resultados finais praticamente independem dos processos de obtenção, ou seja, o ensaio está posto como algo que ocorre naturalmente e sem qualquer tipo de problema. Basta ver que, como se esclareceu no item anterior (sobre a História das Ciências), que os aspectos mais complexos da pesquisa são “sublimados” e que as condições teóricas e técnicas de sua produção são tornadas invisíveis por quem se atém a relatar o fato científico de modo desvinculado do contexto.

As experimentações de roteiro estruturado são caracterizadas pela presença de um procedimento tradicional de laboratório no qual os alunos seguem instruções, não havendo qualquer poder de decisão sobre o que fazer ou como. Muitos professores utilizam este tipo de ensaio visando comprovar leis e/ou mostrar alguns princípios científicos. Assim, é comum que professores não só queiram comprovar o ponto de fusão de uma dada amostra, mas também levar os alunos a perceberem que o procedimento utilizado para este fim é “bem simples”.

Mas o que é um procedimento simples? Se a amostra escolhida for suficiente apenas para encher um tubo capilar, como é possível notar se houve (ou não) variação na temperatura da amostra durante sua fusão? Tratava-se de uma substância pura ou de algum tipo especial de mistura?

Entre os muitos objetivos pedagógicos que se procura atingir ao se propor uma atividade laboratorial deste tipo, Hodson (1994, p. 300) sugere que, entre os principais, estão:

(a) desenvolver habilidades que vão desde a manipulação de instrumentos até a organização destes por meio da sequência revelada no procedimento e, portanto, pré-fixada;

(b) compreender a natureza da ciência ao acreditar que a simples repetição de algum experimento clássico pode fazer com que os alunos aprendam determinado princípio ou construam suas próprias concepções de ciência;

(c) ampliar a capacidade dos alunos para que desenvolvam hipóteses e/ou modelos capazes de explicar determinados fenômenos, refutando-as no caso de não haver concordância com os dados obtidos experimentalmente;

(d) fazer surgir, nos alunos, atitudes típicas dos cientistas, ou seja, a de aguçar sua curiosidade, seu interesse pela ciência ou mesmo de desenvolver o gosto pela atividade científica.

O problema é que na maior parte das vezes o aluno é um observador da aula, que dificilmente interage com os demais alunos ou com o professor por medo de cometer alguma gafe e se tornar “motivo de piada” entre os demais jovens. O aluno recebe as informações, segundo um modelo de transmissão-recepção, e tem que concluir, por conta própria, que existe um “método científico” capaz de fazê-lo compreender o funcionamento das Ciências.

6.2.3. A PRÁTICA DE ROTEIRO SEMIESTRUTURADO

Acredita-se que a experiencição deva ser não apenas orientada pelo enquadramento teórico dos jovens, que, de modo dialógico, questionem as experiências, submetendo-as a um interrogatório de respostas não definitivas (PRAIA et al., 2002, p. 255).

A transposição didática, realizada com cautela para evitar simplismos, deve ser pautada pela sugestão de propostas de atividades de ensino/aprendizagem que valorizem o papel do aluno, que é desafiado a confrontar situações que

envolvem erros (que podem e surgem naturalmente), para, em seguida, ajudar em sua retificação. Como afirma Cachapuz (1992), “uma sala de aula não é um laboratório de investigação [de pesquisa, como se prefere dizer no Brasil]”, uma vez que as estratégias de ensino devem ser capazes de harmonizar as dimensões filosófica e pedagógica com a perspectiva de construção do conhecimento por meio de ensaios científicos.

Se analisarmos as experiências, independentemente do tipo de roteiro, em todos os casos (duas turmas de 2010 e duas de 2011) os resultados causaram algum tipo de surpresa. Os estranhamentos sobre os resultados obtidos nos experimentos puderam ser considerados positivos do ponto de vista didático-pedagógico, uma vez que, possivelmente, contribuíram para a formação conceitual dos princípios relativos às modalidades de energia e de sua conservação.

Na primeira turma de 2010, pioneira na mudança do roteiro de estruturado para semiestruturado, ao fim do procedimento previsto (Anexo), os alunos foram requisitados a sugerir algum tipo de modificação que aumentasse o rendimento do lançador.

A sugestão dos alunos, implementada naquele momento, foi dobrar a quantidade de etanol no interior do tubo plástico, passando de uma para duas borrifadas – os resultados dessa experiência encontram-se na tabela 1 do capítulo anterior. O resultado causou estranhamento, uma vez que o tubo subiu até a mesma altura da registrada quando se borrifou o combustível apenas uma única vez. Este fato pareceu demonstrar que a experiencição, em nossa opinião, foi bastante rica do ponto de vista de aprendizagem, uma vez que, a partir dela, foi possível discutir o conceito de reagente limitante.

Lembrando que o próprio roteiro do LTP, a partir de 2008, já alertava para o fato de o oxigênio constituir-se no reagente limitante, cabe então questionar: Por que os alunos sugeriram tal mudança?

A maioria dos alunos possui a concepção dada pelo senso comum – ou conhecimento cotidiano, como prefere Bizzo (1999) – de que o aumento da quantidade de reagentes, não importando qual, leva, concomitantemente, ao aumento do rendimento. Mal comparando, seria como pensar que uma pessoa que come em demasia, terá mais energia para realizar as tarefas do dia-a-dia.

A segunda turma de 2010, por seu turno, resolveu propor a mudança da composição de combustível do LTP, substituindo o álcool etílico comercial (96°GL) pelo etanol absoluto. O resultado obtido (ver tabela 2 do capítulo 5) surpreendeu os alunos positivamente, revelando-lhes como uma pequena quantidade de água (da ordem de 4%) pode influenciar na eficiência do LTP. A obtenção do etanol absoluto demandou certo tempo, de modo que a segunda parte do experimento só foi realizada quatro semanas depois.

Para esta turma, a discussão mais interessante partiu dos resultados experimentais: se, ao trocarmos a solução de etanol pela de etanol absoluto, aumentamos a quantidade de etanol em quase 4%, por que o rendimento do LTP subiu quase 5%?

Para alguns estudantes, os resultados estavam dentro do esperado; a diferença (de cerca de 1%) poderia ser atribuída ao erro experimental causada pela imprecisão da medida da altura. Outros, entretanto, discutiram o fato do 1% se dever à presença de água na solução, a qual seria responsável pela absorção desta quantidade extra de energia. Quando questionados se esta absorção não deveria diminuir o rendimento do LTP, resolveram abandonar a hipótese, por constatarem sua incoerência.

Ao se reunirem para tentarem resolver o problema da diferença de rendimento, um dos alunos sugeriu que, provavelmente, a vaporização do álcool absoluto – durante a nebulização no tubo plástico – seria mais efetiva do que a da solução de etanol: se isso ocorresse, o etanol se misturaria melhor com o oxigênio, produzindo um aumento diferenciado na altura atingida pelo projétil.

A turma de 2011, cujos resultados experimentais se encontram na tabela 3 do Capítulo 5, já havia conversado com os alunos do ano anterior e estavam conscientes das modificações sugeridas e dos resultados obtidos. A hipótese desta turma era realizar o experimento com o álcool etílico comercial e verificar se, ao aumentar a distância entre as pontas dos fios no interior do tubo plástico, ocorreria formação de uma faísca maior, o que poderia levar à ignição do combustível, aumentando a eficiência do LTP.

O resultado não foi condizente com as expectativas e os jovens abandonaram esta hipótese sem discutir o porquê de tal fato: a maior parte deles se ateve a colocar a culpa pelo fracasso no grupo que havia sugerido a mudança. Cabe aqui uma constatação: uma única equipe, que não entrou na discussão sobre a culpa, sugeriu no relatório (entregue posteriormente) que o problema poderia ser a intensidade da faísca e que, ao invés do ignitor piezelétrico, se fizesse uma montagem utilizando uma vela de ignição de automóveis como faiscador. A discussão em classe foi interessante, mas os alunos não buscaram alternativas técnicas que viabilizassem essa nova montagem.

A primeira turma de 2012, por seu turno, foi a primeira turma da escola pública a fazer o experimento. Seus resultados, condizentes com os da primeira turma de 2010, encontram-se na tabela 4 do capítulo 5. Assim como a de 2010, por sugestão dos alunos, dobrou-se a quantidade de etanol no interior do tubo plástico, passando de uma para duas aspersões.

O resultado, mais uma vez, causou estranhamento. Entretanto, antes dos testes começarem, duas equipes já questionavam o fato do etanol estar em excesso; elas acabaram entrando em um acordo: o experimento seria realizado com a intenção de se mostrar que o etanol estava em excesso. Alguns alunos, inclusive, acharam óbvio o fato de o etanol estar em excesso, uma vez que a borrifada dada no interior do tubo plástico expulsava de seu interior uma parte do ar, que era substituído pelo vapor de etanol.

A segunda turma de 2012 aproveitou o fato de o laboratório da escola ter etanol absoluto e rapidamente aceitou a sugestão de se trocar o combustível. Realizaram o teste com a solução de etanol e, então, testaram o querosene. Este combustível liberou grande quantidade de calor, que os alunos associaram a uma forte chama (que os alunos identificaram pelo termo “labareda” em seus relatórios) e ao fato de o calor ter provocado a fusão do material polimérico que constituía a base do LTP.

Para esta turma não se constatou o mesmo tipo de estranhamento do causado frente aos alunos da segunda turma de 2010. Para os estudantes em questão, o rendimento aumentar era normal, uma vez que se utilizava uma maior quantidade de combustível, estando o 1% que faltava dentro do erro experimental. Contudo, eles ficaram em dúvida se o estrago causado pelo querosene – com a fusão parcial da base – e sua respectiva troca não poderia ter afetado o rendimento. Eles descartaram as primeiras medidas de altura máxima que haviam sido tomadas pela utilização de outra base e repetiram o ensaio experimental. Os resultados obtidos encontram-se tabelados (tab. 5) no capítulo anterior.

A primeira turma de 2013, cujos resultados encontram-se na tabela 6 do Capítulo 5, resolveu replicar a tentativa feita pela turma de 2011, passando a distância entre os terminais de 2 para 5 milímetros. Assim como aquela turma, a de 2013 também não constatou qualquer modificação significativa na altura atingida pelo projétil.

Diferentemente da turma de 2011, eles buscaram uma solução viável e introduziram uma modificação à montagem experimental, substituindo o piezelétrico do isqueiro por outro piezelétrico, retirado de um acendedor de fogões. A montagem, contudo, foi bastante complicada e o LTP modificado, a cada disparo, apresentou um “defeito” diferente: na primeira vez, tudo pareceu funcionar bem; na segunda, a cola utilizada para prender a haste do acendedor sofreu fusão; na terceira, o tubo do LTP, que parecia íntegro, teve de ser trocado, pois estava rachado.

Para esta turma, ocorreu um fato que chamou-me a atenção; uma discussão entre os membros do grupo fez com que se abortasse a última tentativa de disparar o LTP: um dos jovens sugeriu que a mudança no tubo plástico deveria ser acompanhada de um novo disparo feito com o piezelétrico antigo e segundo as condições do primeiro disparo, de modo a comparar estas duas situações, o que implicava em desmontar, mais uma vez o LTP. A falta de tempo para repetir o experimento (já havia se passado quase 6 horas desde o início da experiência) levou-os a não seguirem tentando.

A segunda turma de 2013 preocupou-se em melhorar a eficiência do artefato a partir de uma mudança estrutural do LTP: (1) fixou-se inicialmente o tubo plástico à tampa montada sobre a base de madeira; (2) fez-se um orifício na parte superior do tubo plástico; (3) aqueceu-se a boca de um segundo tubo plástico (sem tampa), de modo a encaixar a boca deste na parte superior do tubo já fixado (fig. 6).



Figura 6: LTP semelhante ao modificado pelo grupo N da segunda turma de 2013
(Foto: José Roberto Serra Martins – 10 ago. 2014)

O aumento do volume interno, somado à diminuição da força de atrito estático entre o tubo a ser lançado e sua base levaram esta turma a conseguir maior eficiência do LTP. Os resultados dessa experiência encontram-se na tabela 7 do capítulo anterior. Assim como nos experimentos já descritos em relatórios anteriores, os resultados demonstraram que o oxigênio era o reagente limitante e que a distância entre a ponta dos fios do ignitor não conduzia a uma faísca capaz de aumentar o rendimento do LTP.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados em 2012 (tabelas 4 e 5) e 2013 (tabelas 6 e 7) mostraram-se de pleno acordo com os obtidos em 2010 e 2011. Neste caso, confirmou-se que a utilização de etanol (P.A.) em lugar do etanol comercial (96%) também não alterou o rendimento do LTP, considerando-se as alturas médias atingidas e os respectivos desvios médios.

A mudança do tipo de roteiro – de estruturado para semiestruturado – ocorreu concomitantemente à transformação da experimentação em experientiação. Nesta mudança, destacou-se a troca de informações entre os alunos das turmas de 2010 e 2011 (Campinas) e as de 2012 e 2013 (São João da Boa Vista), o que fez com que os alunos das turmas de 2011 e 2013 propusessem transformações originais. Os estudantes atrelaram o aumento de eficiência a modificações estruturais no projeto do LTP, fixando o primeiro tubo à base e encaixando sobre este um segundo tubo, sem que se alterasse o combustível – ou sua quantidade – ou mesmo a distância entre os fios.

A execução de trabalhos práticos por meio de um roteiro semiestruturado levou os alunos a simularem uma situação na qual poderiam atuar como cientistas. As sugestões de modificação para o roteiro do LTP propiciaram a inserção dos estudantes no processo de construção do conhecimento e uma atuação que os aproximou de uma vivência mais concreta das descobertas científicas.

6.3. SOBRE A AVALIAÇÃO BIMESTRAL

Como dito na apresentação dos resultados, 60% dos alunos do grupo de controle (G1) apresentaram notas mais baixas que a média da classe no que tange às avaliações bimestrais dissertativas. Teoricamente, se esperava que os três alunos pertencentes ao terço superior da classe (analisando apenas as notas obtidas no primeiro bimestre) deveriam apresentar desempenho próximo aos verificados anteriormente.

O que chamou nos chamou mais a atenção foi o fato de a melhor nota na avaliação bimestral ter sido alcançada por um dos alunos que: (1) ao longo do primeiro ano demonstrava dificuldade em construir os conceitos químicos e (2) não ter participado de nenhuma das atividades no contra período. Em conversa realizada posteriormente, este aluno mostrou sua afinidade com – e vontade em – aprender o assunto tratado (Termoquímica).

Dos doze alunos do G2, um deles acabou excluído da análise das notas por não ter comparecido à avaliação bimestral. Como se pode depreender da tabela 8, apenas um aluno deixou não conseguiu responder às questões propostas. É fundamental ressaltar que, neste grupo, apenas cinco dos onze alunos tiveram nota menor que a média da turma, o que equivale a menos da metade dos alunos avaliados no grupo G2.

Os doze alunos do G3 foram os que apresentaram as notas mais altas das avaliações bimestrais dissertativas. O destaque positivo a ser citado é relativo ao fato de um único aluno ter ficado com nota abaixo da média da sala, o que equivale a 8% do grupo G3. Composto por cinco alunos situados entre os que apresentaram as piores notas no primeiro bimestre, quatro alunos que tiveram desempenho mediano ao longo do bimestre inicial e três alunos com médias altas, o G3 superou todas as expectativas: nenhum dos alunos zerou a avaliação e três deles tiraram nota máxima, o que elevou a média do grupo para quase oito pontos.

É interessante notar que alunos com baixo desempenho no primeiro ano do ensino médio e no primeiro bimestre do segundo ano superaram as expectativas de desempenho. Esta melhora no rendimento médio dos alunos (com maior dificuldade) na avaliação bimestral influenciou diretamente sobre as médias dos grupos G2 (= 5,7) e G3 (=7,9).

Discute-se neste momento se a formação dos grupos pode, de algum modo ter influenciado na nota dos alunos ao G1, ao G2 e ao G3, uma vez que a formação dos grupos se baseou na disponibilidade dos alunos em poder (ou querer) participar de atividades no contra-período.

Um ponto importante desta discussão sobre a prova é o de mostrar em que questões da prova os alunos tiveram mais baixo desempenho. Avaliadores sugerem que se analise as notas das questões individuais por meio de uma “lente” que leve em consideração que o excesso de itens pode levar os estudantes a se cansarem enquanto demandam energia para responder às questões iniciais.

Em nosso caso, o menor desempenho dos alunos foi verificado no item (d) da questão 01; a maior parte deles deixou o item em branco e, durante a correção da prova, percebeu o quão fácil era chegar a uma resposta mais adequada. Para os que erraram a questão e não deixaram este item sem resposta, parece que não ocorreu uma conexão entre o que havia se calculado no item anterior (c) e a proposta do item aqui elencado. Quero ressaltar que o item servia para analisar – sem que isto fosse mencionado – como o estudante se comportaria se, durante a experimentação, tivesse que substituir um combustível por outro.

Quanto aos demais itens da prova, pode-se verificar que os alunos ainda apresentam dificuldades relacionadas à execução de cálculos, mesmo que os próprios estudantes, depois de corrigida a avaliação, digam que a questão era fácil. Divisões envolvendo números decimais, montagem e/ou análise de proporções são operações que os jovens executam de modo confiante se possuírem uma calculadora.

Outro fato que a avaliação esclareceu foi o que estabelecia uma análise entre as quantidades relativas de combustível e de comburente (questão 3). A maior parte dos jovens não compreende/ não construiu o conceito de reagente limitante e/ou reagente em excesso. Quando perguntados sobre as quantidades relativas de hidrazina e hidrogênio, os alunos até entendiam como obter as informações pertinentes ao item (quantidade de matéria), mas não eram capazes (em metade dos casos) em relacioná-los aos termos “excesso” e “limitante”.

Outra questão que discuto é relativa ao posicionamento dos alunos frente ao conhecimento (pág. 53). A análise dos alunos da turma revelou que quase todos os que participaram da experimentação estavam engajados em superar o desafio proposto, ou seja, aumentar o rendimento do LTP. A interação entre professor e estudantes revelou a presença de, pelo menos, três tipos de posicionamento (o que sugere a existência de outros), a saber:

No primeiro tipo, os estudantes eram inseguros e questionavam a maior parte dos passos que iriam dar, esperando o consentimento do professor-mediador para poder avançar. Nesse caso, parecia haver uma desconfiança de que seus atos/attitudes poderiam ser incorretos, devido ao fato de seus conhecimentos não terem sido postos à prova ou que os conceitos recém construídos poderiam ser falhos.

No tipo seguinte, vislumbravam-se alunos com maior autonomia e que avançavam, geralmente, sem muito cuidado, tentando superar uma dada situação-problema pela aplicação de uma série de métodos diversos, aí se incluindo o de “tentativa e erro”. Nesse tipo era muito comum ouvir-se, durante a experimentação, alunos chamarem a atenção dos outros membros da equipe para que se fizesse algo que perpassava o procedimento experimental, mas que aos olhos de alguns estudantes não faziam a menor lógica. Nesses grupos as divergências foram consideradas positivas, pois ocasionaram discussões nas quais todos eram ouvidos, esclareciam suas posições e, a seguir, determinavam como seguir em frente.

No último tipo, destacam-se os aprendizes mais “focados”, capazes de utilizarem seus erros como momentos de reflexão, ponderando o que havia ocorrido de errado, selecionando opções para o passo seguinte e, ao chegar à solução do problema, buscar outras situações-problema que demandassem esse mesmo tipo de solução. Ou seja, a estes alunos não bastava achar a resposta, mas também divulgar seu conhecimento de modo a evitar que uma dada situação transforme-se em um problema.

Que fique bem claro, um dos problemas apresentados por este tipo de análise é o seguinte: Comparar alunos por meio do desempenho em uma única prova pressupõe que estes possuam a mesma história de vida, a mesma condição em construir conhecimentos, e sejam todos iguais e, portanto, comparáveis. Uma única avaliação não tem o “poder” de mostrar que os alunos entenderam a matéria e/ou souberam construir seus saberes.

Para tal, basta lembrar que fatores que envolvem a realização de medidas e tratamento de dados, tão importantes às Ciências, ficam de fora das análises relativas ao conhecimento. Infelizmente, a nota que os alunos tiram nas provas constituem o único diferencial utilizado pelos professores para classificar os alunos como bons, medianos ou ruins.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Analisando aspectos dos mais variados presentes a esta dissertação, concluí que a experiencição possui uma virtude: ela é capaz de funcionar como um possível mecanismo de reelaboração do conhecimento, mas que ainda carece de refinamento. Parece que, ao partir da História das Ciências, a experiencição pode conduzir os alunos a compreenderem as bases da Termoquímica, e, em alguns casos, a demonstrarem concepções que estavam em acordo com as perspectivas históricas e filosóficas do conhecimento.

Esclareço que esta dissertação tentou mostrar que os relatos colhidos para sua confecção sobre o processo de ensino/aprendizagem (PE/A) das ciências (Física, Química ou outra) levou em consideração a natureza do conhecimento a ser ensinado. Assim, defendeu-se a posição de que na Educação em Ciências é fundamental considerar o saber científico como algo simbólico, por sua origem, e socialmente negociado.

Por estas características, a atuação do professor (negociando sentidos e significados, mediando o PE/A e a construção de concepções) não pode se limitar a organizar o processo assinalado; ele deve auxiliar os aprendizes a conferir sentido pessoal à maneira como as asserções dos conhecimentos (científicos ou cotidianos) são geradas e validadas. Mais uma vez, sugere-se que a construção dos saberes também se dá pelo engajamento coletivo dos alunos nas discussões e nas atividades sobre problemas comuns.

Esta dissertação tentou mostrar que a experiencição pode levar os alunos a entenderem que o conhecimento científico não pode ser encarado como um conhecimento comprovado. A aula teórica, por sua vez, priorizou revelar que a História da Química e da Física é repleta de modelos que não vingaram ou foram destituídos, e que os cientistas, assim como todas as pessoas, são passíveis de cometer erros; não sendo tal fato contrário ao método científico.

Acredita-se que o ideal seria deslocar o olhar do conteúdo disciplinar puro e simples, enfocando as necessidades (ou demandas) dos alunos. De outra forma, poder-se-ia transformar a sala de aula em um ambiente propício para a problematização de situações, o que poderia levar os estudantes a construir seu conhecimento de modo diverso do atual.

Atualmente, é triste reconhecer que muitos professores ainda se encontram fortemente vinculados às concepções positivistas da ciência, mesmo que haja boa vontade em se criar outras condições ao bom andamento do processo de ensino/aprendizagem (PE/A). Por esta razão, *optei por substituir a experimentação*, que reproduz conceitos sistematizados, *pela experiencição*, a qual colocou, a mim e meus alunos, em conexão com outras possibilidades de construção dos saberes, fazendo-nos atuar de modo diferenciado: eu como mediador e eles como idealizadores das transformações – apesar de minha influência sobre os grupos, propondo aos mesmos modos de resolver certos problemas técnicos relativos ao LTP.

Em minha opinião, o saber deve estar fundamentado nas noções (transdisciplinares) de complexidade de um mundo cada vez mais “unificado” e ao mesmo tempo mais desigual; um conhecimento que possibilite o surgimento de novas potencialidades como decorrentes de ações que sejam, concomitantemente, reflexivas e vivenciadas.

Ao propor, na experiencição, uma atividade aberta de roteiro semiestruturado, pretendia atingir duas metas distintas: (1) responder à pergunta de pesquisa e (2) entender o quanto seria possível transformar este roteiro em um possível roteiro não estruturado.

No que diz respeito à primeira, não há como se ter certeza de que a experiencição resultou em aprendizagem significativa; pode-se, no máximo, sugerir que o fato de se colocar os alunos em contato com um maior número de elementos de cognição fez com que eles ampliassem suas concepções a respeito do tema, em particular, e das ciências, como um todo, o que conduziu, muito provavelmente, a um

melhor desempenho escolar – mesmo considerando que os relatórios dos grupos (G2 e G3) e a prova bimestral constituam objetos parciais de análise, no que se refere à avaliação do rendimento dos estudantes.

No que tange à segunda, é mister que se tenha em mente problematizações outras, vinculadas aos saberes em Química ou Educação, e que possam gerar novos conhecimentos relativos à aplicação de roteiros não estruturados, que partam de gêneros textuais diversos (filme, entrevistas etc.), e que podem (ou devem?) ser utilizados na formulação de situações-problemas, seja sob a forma de “questões abertas”, cujas respostas possam ser construídas a partir de uma metodologia definida pelos alunos. Para tal, os alunos serão convidados a produzir continuamente registros textuais sobre todo o processo, de modo a se buscar a real apropriação do conhecimento pelo aluno, ou seja, que se possa discutir criticamente a incorporação de conhecimentos aos processos didáticos.

Um fato importante no tocante a esta dissertação é o posicionamento do professor que não pode se limitar a transmitir informações. Ele deve, antes de tudo, cultivar nos alunos a liberdade de criar fatos novos, sugerindo soluções e mudanças, seja em âmbito social ou científico. Para isso, espera-se que o professor saiba discutir a pertinência das sugestões, respeitando o posicionamento dos alunos. Para isto, é fundamental que os cursos de formação inicial de professores também sejam reestruturados, passando inclusive a transgredir os limites das disciplinas.

No que tange à história do LTP, espera-se que esta funcione como um modelo metodológico que possa levar à construção e evolução de novas concepções. No caso do LTP, a periodização proposta no início dessa dissertação visava mostrar como se deu o processo ampliação dos estudos relativos à Termodinâmica e sua relação com a Termoquímica, mudando de um experimento estruturado para outro semiestruturado e, quem sabe um dia, um não estruturado. Estas “evoluções” são, realmente, construções sociais que visam a edificação de novos saberes.

Quando Teixeira propôs o LTP como uma prática experimental ele visava a construção dos saberes por meio da construção do “canhãozinho”, que de objeto lúdico se transformou em instrumental didático, capaz de ampliar saberes não limitados a um dado valor (nota bimestral, de uma avaliação etc.). Cruz, por sua vez, viu no LTP uma chance de extrapolar os limites da termodinâmica, associando-o à construção de conceitos químicos. A tentativa que fiz de introduzir a História da Ciência, de algum modo, ampliou a cognição dos alunos, mas só com o a experimentação e a liberdade de se criar é que pude vislumbrar a importância do LTP, cuja finalidade principal – e também o maior desafio – seria a de criar nexos inexistentes nas práticas escolares.

Para encerrar esta dissertação, permito-me uma digressão crítica quanto à metodologia que adotei: utilizar a nota da avaliação como único diferencial cognitivo, restringiu-me a análise. Como acabo de asseverar, outras variáveis também poderiam auxiliar a compreender melhor o processo de construção dos saberes pelo qual os estudantes passam, entre elas, estudar se ocorreu mudanças na capacidade dos discentes em tratar os dados obtidos por meio da experimentação ou mesmo realizar medidas pertinentes.

A concepção inicial desta dissertação era analisar o discurso dos alunos e relação deste com o processo de ensino/aprendizagem (PE/A). As conversas deixariam de ser informais e se tornariam entrevistas, provavelmente semiestruturadas, que permitiriam estabelecer, a partir do discurso polissêmico dos estudantes, conexões entre: o que aprenderam e o que lhes faltou; o que se falou e o que se calou; o que se fez e o que ficou por fazer; o que se sabia e o que se construiu, em termos de novos conhecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-EL-KHALICK, Fouad; LEDERMAN, Norman G. Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 7, p.665-701, 2000.

AMARAL, Edenia Maria Ribeiro; MORTIMER, Eduardo Fleury. Uma proposta de perfil conceitual para o conceito de calor. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências – RBPEC – ABRAPEC**, v.03, p. 05 – 18, 2001.

ASIMOV, Isaac. **Breve storia dela chimica**: Introduzione alle idee dela chimica. Roma: Zanichelli, 1977. 185p.

AURANI, Kátya Margareth. **Ensino de conceitos**: estudo das origens da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII. 1986. 166f. Dissertação (Mestrado em Física) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

AZEVEDO, Maria Cristina P. Stella de. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, Ana Maria Pessoa de (org.). **Ensino de Ciências**: unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

BEST, Michael. **Qualities, elements, seasons, humours**. Internet Shakespeare Editions. Victoria: University of Victoria, 2010. Disponível em: <<http://internetshakespeare.uvic.ca/Library/SLT/ideas/order/elements.html>>. Acesso em 24 ago. 2012.

BIZZO, Nélío Marco Vincenzo. **Ciências**: fácil ou difícil? São Paulo: Ed. Ática, 1999. 144p.

BRAGA, Marco; GUERRA, Andreia; REIS, José Claudio. **Breve história da ciência moderna**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2005, 158p. (volume 3).

BRAGA, Washington. **Problemas com a teoria calórica**. Disponível em: <<http://www.users.rdc.puc-rio/wbraga/transcal/pdf/Termo/Calorica.PDF>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

CABRAL, Paulo. **Breve história da medição de temperatura**. Disponível em: <http://www.help-temperatura.com.br/html/interesse/files/HistoriaMedicaoTemperatura.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2007.

CACHAPUZ, Antônio. Filosofia da ciência e ensino de Química: repensar o papel do trabalho experimental. **Anais...** Congresso de las didáticas específicas em la formación del professorado, tomo II, v.1, pp. 357-363. 1992

CARVALHO, Ana Maria Pessoa de; GIL-PÉREZ, Daniel. O saber e saber fazer dos professores. In: CASTRO, Amélia Domingues de; CARVALHO, Ana Maria Pessoa de (org.). **Ensinar a ensinar**: didática para a escola fundamental e média. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2000.

CERVO, Amado Luiz; BERVIAN, Pedro Alcino. **Metodologia científica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2010. 158p.

CHAGAS, Aécio Pereira. **A história da química do fogo**. Campinas: Átomo, 2006. 120p. (Col. Ciência & Entretenimento).

CHALMERS, Alan F. **O que é ciência, afinal?** Tradução de Raul Filker. São Paulo: Brasiliense, 1993. 238p.

CHILDE, Vere Gordon. **A evolução cultural do homem**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1986. 229p.

CINDRA, José Lourenço; TEIXEIRA, Odete Pacubi Baierl. Calor e temperatura e suas explicações por intermédio de um enfoque histórico. In: MARTINS, L. A. C. P.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H. (eds). **Filosofia e história da ciência no Cone Sul**: 3º Encontro. Campinas: AFHIC, 2004. pp.240-248.

CINDRA, José Lourenço; TEIXEIRA, Odete Pacubi Baierl. Discussão conceitual para o equilíbrio térmico. **Cad. Brás. Ens. Fis.**, v.21, p. 176-193, ago. 2004b.

CINDRA, José Lourenço; TEIXEIRA, Odete Pacubi Baierl. **A evolução das idéias relacionadas aos fenômenos térmicos e à eletricidade: algumas similaridades**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/viii/PDFs/CO_31_2.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2007.

CLAXTON, Guy; SÁNCHEZ-BARBERÁN, Genís. **Educar mentes curiosas**: el reto de la ciencia en la escuela. Madrid: Ed. Visor, 1994.

DENNETT, Daniel Clement. Como cometer erros. In: BROCKMAN, John; MATSON, Katinka (org.) **As coisas são assim**. São Paulo: Cia. das Letras, 2008.

FRANCO, Ariovaldo. **De caçador a gourmet**: uma história da gastronomia. 3 ed. São Paulo: SENAC - São Paulo, 2004. 288p.

GIL-PÉREZ, Daniel; FERNÁNDEZ-MONTORO, Isabel; CARRASCOSA-ALIS, Jaime; CACHAPUZ, António; PRAIA, João. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, p.125-153. 2001.

GOMBRICH, Ernest Hans Josef. **História da arte**. 16 ed. Tradução de Álvaro Cabral. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico e Científico, 1999. 688p.

GRINGS, Edi Terezinha de Oliveira; CABALLERO, Concesa; MOREIRA, Marco Antonio. Possíveis indicadores de invariantes operatórios apresentados por estudantes em conceito de termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.28, n. 4, p. 463 – 471, 2006.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S.. **Física**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos Científicos, v. 2, 1996. p. 167 – 224.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Artmed, 2002. p. 269-292.

HODSON, Derek. **Teaching and learning about sciences**: language, theories, methods, history, traditions and values. Rotterdam: Sense Publishers, 2009.

HODSON, Derek. Hacia un enfoque más crítico del trabajo de la laboratorio. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 12, n 3, 1994, p. 299-313.

JOHSUA, Samuel; DUPIN, Jean-Jacques. **Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques**. Paris: Presses Universitaires de France, 2003. 448p.

KENNY, Anthony. **História Concisa da Filosofia Ocidental**. Tradução de Desidério Murcho, Fernando Martinho, Maria José Figueiredo, Pedro Santos e Rui Cabral. Lisboa: Temas e Debates, 1999. 500p. Disponível em: <www.institutoveritas.net/livros-digitalizados.php?baixar=58>. Acesso em 25 dez. 2010.

KLOOSTER, John W. **Icons of invention**: the makers of the modern world from Gutenberg to Gates. Santa Barbara, USA: ABC-CLIO, 2009, pp. 25-53 (vol. 1).

LEAL, Maria Leonor de Macedo Soares. **A história da gastronomia**. Rio de Janeiro: SENAC Nacional, 1998. 144p.

LIBERA, Alain de. **A filosofia medieval**. Lucy Magalhães (trad.) Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1990. 105p. (Col. Cultura contemporânea, 15).

LIMA, José Expedito Passos. **A estética entre saberes antigos e modernos na Nuova Scienza, de Giambattista Vico**. 2006. 388 f. Tese (Doutorado em Filosofia). Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2006.

LOCKE, John. **Ensaio acerca do entendimento humano**. 5. ed. Tradução de Anoar Aiex. São Paulo: Nova Cultural, 1991 [1640]. 319p.

MARCONDES, Danilo. A crise dos paradigmas e o surgimento da Modernidade. In: BRANDÃO, Zaia (org.). **A crise dos paradigmas e a educação**. 10 ed. São Paulo: Cortez Editora, 2007. pp.16-32 (Col. Questões da nossa época).

MARTINS, José Roberto Serra. **Plataforma continental jurídica**: incorporação ao território nacional e ao ensino de geociências. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado em Ensino e História de Ciências da Terra). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

MARTINS, Roberto de Andrade. **O universo**: teorias sobre sua origem e evolução. São Paulo: Editora Moderna, 1994. 182p.

MATTHEWS, Michael. **Science teaching**: the role of history and philosophy of science. New York: Routledge, 1994.

MATTHEWS, Michael. Teaching the philosophical and worldview dimension of science. **Science & Education**, vol.18, n.6-7, pp. 697-728, 2009.

MATTOS, Carlos Lopes de. **São Tomás de Aquino**: vida e obra. In: CIVITA, Victor (Org.). Tradução de Luiz João Baraúnas. São Paulo: Editora Nova Cultural, 2000. 288p. (Col. Os Pensadores).

MATTOS, Cristiano; DRUMOND, Ana Valéria Nantes. Sensação térmica: uma abordagem interdisciplinar. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 21, n. 1, p. 7-34, abr. 2004.

MEDEIROS, Alexandre. *A Termometria*: de Galileu a Fahrenheit. Recife: Editora Liber, 1999. 75p.

MEDEIROS, Alexandre. O desenvolvimento histórico da escala Fahrenheit e o imaginário de professores e de estudantes de física. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 24, n. 2: p. 155-173, ago. 2007.

MELO, Ana Carolina Staub de. **Transposição Didática do Modelo de Huygens**: uma proposta para a física escolar. 2010, 198p. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MIDDLETON, William Edgar Knowles. **A History of the Thermometer and its use in Meteorology**. Baltimore: John Hopkins University Press, 1966. 262p.

MILLAR, David; MILLAR, John; MILLAR, Ian; MILLAR, Margaret. **The Cambridge Dictionary of Scientists**. Cambridge: University Press, 1996. 399p.

MORAES, João Francisco Regis de. **Filosofia da ciência e da tecnologia**: introdução metodológica e crítica. 5 ed. Campinas: Ed. Papirus, 1988. 181p.

MULTHAUF, Robert Phillip. **The origins of chemistry**. Langhorne: Gordon and Breach, 1993. 412p.

NIEDA, Juana; MACEDO, Beatriz. **Un currículo científico para estudiantes de 11 a 14 años**. Madrid: UNESCO/OEI, 1997.

PADOVANI, Humberto; CASTAGNOLA, Luís. **História da Filosofia**. 5 ed. São Paulo: Editora Melhoramentos, 1962. 527p.

PAIXÃO, Maria de Fátima. **Do uso da balança ao princípio da conservação da massa**. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala21/21_19.asp>. Acesso em: 30 jul. 2007.

PESSANHA, José Américo Motta. Vida e obra. In: CIVITA, Victor (Org.). **René Descartes**. Tradução de Jacob Guinsburg e Bento Prado Jr. São Paulo: Nova Cultural, 1999. 335p. (Col. Os Pensadores).

PIRES, Denise Prazeres Lopes; AFONSO, Júlio Carlos; Chaves Francisco Artur Braun. Do termoscópio ao termômetro digital: quatro séculos de termometria. *Revista Química Nova*, v. 29, n. 6, p.1393-1400, 2006.

PRAIA, João; CACHAPUZ, Antônio; GIL-PÉREZ, Daniel. Problema, teoria e observação em ciência: para uma reorientação epistemológica da Educação em Ciência. *Ciência & Educação*, v.8, n.1, pp. 253-262, 2002.

QUADROS, Sérgio. **A termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas**. São Paulo: Ed. Scipione, 2004.

QUINN, Terry J. **Temperature**. 2 ed. London: Academic Press, 1990. 495p.

RANDLES, William Graham Lister. **Da terra plana ao globo terrestre**: uma mutação epistemológica rápida (1480-1520). Tradução de Maria Carolina F. de Castilho Pires. Campinas: Ed. Papirus, 1994. 162p.

RIVAL, Michel. **As grandes invenções da humanidade**. Tradução de Antônio de Pádua Danesi. São Paulo: Larousse, 2009. (vol. 2).

ROSMORDUC, Jean. **Uma história da Física e da Química**: de Tales a Einstein. Tradução de Leila Velho Castro Faria. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1985.

ROCHA, Gustavo Rodrigues. **História do atomismo**: como chegamos a conceber o mundo. Belo Horizonte: Argumentum Editora, 2007. 122p.

RONAN, Colin Alistair. **História Ilustrada da Ciência**. Tradução de Jorge Enéas Fortes. São Paulo: Círculo do Livro, 1987. vol. III, 161p. (Da Renascença à Revolução Científica)

RUDWICK, Martin John Spencer. **El significado de los fósiles**. Tradução para o espanhol por Antonio Resines. Espanha: Hermann Blume Ed., 1987. 347p. (Serie: Ciencias de la Naturaleza).

SANTORO, Fernando. **Arqueologia dos prazeres**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2007. 268p. (Coleção Filosófica, 3).

SCHENBERG, Mario. **Pensando a física**. São Paulo: Ed. Landy, 2001. 208p.

SILVA, Adriana Aparecida; TAGLIATI, José Roberto. **Investigação dos conceitos em termodinâmica utilizando a teoria de argumentação de Chaim Perelman**. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/resumos/T0_233-1.pdf>. Acesso em 21 jul. 2007.

TEIXEIRA, Marcelo Eduardo Fonseca; RAMOS, Eugenio Maria de França. Lançador termodinâmico de projéteis. **Anais... XV Simpósio Nacional de Ensino de Física**. Curitiba, PR. 21-26 mar. 2003. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xv/cursos/popup_curso.asp?curl=OF02>. Acesso em 02 ago 2012

TEIXEIRA, Marcelo Eduardo Fonseca; RAMOS, Eugenio Maria de França; CRUZ, Guilherme Blasi. Lançador de Projéteis: a termodinâmica numa perspectiva interdisciplinar. **Anais...** LVIII Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Florianópolis, jul. 2006.

TEIXEIRA, Marcelo Eduardo Fonseca; RAMOS, Eugenio Maria de França; CRUZ, Guilherme Blasi. **Oficina Pedagógica**: lançador termodinâmico de projéteis. Campinas: Anglo/Campinas, 2008.

TOZONI-REIS, Marília Freitas de Campos. **Educação ambiental**: natureza, razão e história. Campinas: Autores Associados, 2004. 180p.

WALDEN, Paul. **Histoire de la chimie**. Eugène Darmais (trad). Paris: Lamarre, 1953. 127p.

WITKOWSKI, Nicolas. **Uma história sentimental das ciências**. Tradução de André Telles. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2004.

APÊNDICES (A.1.)

A.1.1. FOGO E LUZ: DA PRÉ-HISTÓRIA À IDADE MÉDIA

“A natureza, para ser comandada, tem de ser obedecida.”

Francis Bacon

A.1.1.1. NO ALVORECER DOS TEMPOS

Gordon Childe, na obra *“A história cultural do homem”*^{18,19}, apresenta o mamute como animal típico dos períodos glaciais; afirma que um dos fatores que levou este animal a resistir às baixas temperaturas foi o fato de ter herdado, por seleção natural, uma grossa pelagem protetora. Entre seus predadores, existia um grupo de animais caracterizado pela quase ausência de pelos, que evitava o frio por meio da utilização controlada de fontes de calor, tais como fogueiras ou águas termais. Os membros deste grupo faziam casacos de peles a partir de animais abatidos ou que tivessem morrido recentemente. Assim, a ausência ou excesso de pelos não denotara qualquer tipo de desvantagem a estas espécies, uma vez que *“tanto homens quanto mamutes ajustaram-se com êxito aos ambientes glaciais”* (CHILDE, 1971, p.35).

Childe (1971, p. 35-38) também afirma que animais do gênero *Elephas* se adaptaram eficientemente ao ambiente glacial e a evolução deste gênero acarretou em um processo de especiação que originou ao *Elephas primigenius* (mamutes). Estes animais transmitiram à sua prole, por meio de seu genótipo, a grossa pelagem que possuíam. No caso do gênero *Homo*, diz-se que processo equivalente deu origem a espécies que podem ser consideradas contemporâneas aos mamutes e

18 Esta obra possui como título original *Man Makes Himself* (1936) e é considerada leitura obrigatória a todos os que pretendem iniciar seus estudos sobre a pré-história.

19 Os termos grafados em itálico serão utilizados para termos científicos, palavras em língua estrangeira ou nome de livros e/ou artigos.

que denominamos *H. habilis*, *H. erectus* e *H. sapiens*. Por sua capacidade de raciocinar, decorrente da evolução de seu encéfalo, o gênero *Homo* sobreviveu por tornar-se mais adaptado ao meio, uma vez que aprendeu a manufaturar roupas em peles de animais e a fazer – e manter – o fogo. Estas eficientes adaptações, bem como o desenvolvimento cultural garantiram a sobrevivência de nosso gênero durante os períodos glaciais.

O ambiente compartilhado por mamutes e humanos não era fruto exclusivo de condições climáticas, mas de características e transformações específicas que estavam a ocorrer ao longo dos períodos geológicos. O clima, por exemplo, deve ter exercido grande influência no que tange ao aparecimento de culturas materiais diversas: por interferir diretamente sobre distribuição geográfica da fauna e flora, afetou também o comportamento e as características morfológicas de animais e vegetais.

A vontade de viver e o instinto de conservação da espécie podem, parcialmente, nos explicar os motivos que levaram a humanidade a utilizar materiais e técnicas diversas em eventos cotidianos que vão da confecção de roupas ao auxílio à alimentação, da conservação da própria saúde à defesa do grupo contra os maiores perigos do ambiente. A utilização de materiais com origens diferentes levou à aquisição de novos saberes, incluindo a composição do material e as propriedades do mesmo, testadas sob múltiplas condições por meio de experimentos – conscientes ou não.

Dos experimentos, observações e testes de numerosas gerações humanas, resultou a concepção de um mundo exterior objetivo (pautado conceitualmente na utilidade de objetos, considerados estáveis, uma vez que sua transformação ao longo do tempo era sutil), no qual é possível a reprodução de eventos e situações experimentais (WALDEN, 1953).

Uma das grandes conquistas da humanidade foi aprender a fazer, manter, combater e controlar o fogo, conhecendo-o, paulatinamente, com profundidade cada vez maior. Com isso, a humanidade passou a não mais temer o frio ou as trevas da

noite; conseguiu afugentar os predadores que ameaçavam os grupos familiares, ou mesmo comer alimentos, obtidos por meio de coleta e caça, de maneira mais apetitosa.

Do ponto de vista tecnológico, pesquisas realizadas por Brown et al. (2009, p.859) concluíram que o aspecto brilhante presente na parte pétrea de ferramentas encontradas em sítios arqueológicos de Pinnacle Point (África do Sul) devia-se a um tipo de tratamento térmico aplicado sobre um tipo específico de rocha (silcreto), o que sugere a utilização do fogo há, no mínimo, 72.000 anos.

A utilização do fogo acarretou no surgimento da indústria cerâmica e das técnicas metalúrgicas, as quais se tornaram mais eficientes, facilitando a obtenção de metais. O homem fez do fogo uma arma capaz de lhe conferir poder sobre a vida de seu semelhante e sobre a natureza, além de provocar, em si, sentimentos tão antagônicos quanto fascínio e medo (CHAGAS, 2006).

Historicamente, fogo e calor foram tratados como manifestações conexas entre si, sendo o conhecimento cotidiano (BIZZO, 1999) – ou cultura do senso comum (MORAES, 1988; JOHSUA & DUPIN, 2003) ou ainda conhecimento vulgar (CERVO & BERVIAN, 2010) – responsável pela crença que associava a existência do calor à presença do fogo. Indutivamente, este fato levou as pessoas a acreditarem que o calor, que sentimos e nos mantém vivos, nos é inerente e tem origem interna.

Há muito tempo, o fogo supre as necessidades básicas da humanidade, sendo responsável: (1) pelo calor, capaz de ajudar no preparo dos alimentos e nos aquecer nas noites frias; (2) pela luz, capaz de clarear o ambiente, possibilitando proteção ao grupo familiar por meio da visualização de possíveis perigos (o fogo utilizado em tarefas cotidianas cuja execução, por necessidade ou urgência, estaria restrita ao período de menor quantidade de luz); (3) pela intimidação imposta a grupos rivais ou animais predadores, geralmente mais ágeis e/ou fortes. Este último aspecto mostra que o fogo, desde a antiguidade mais remota, não é apenas uma arma, mas um símbolo de poder, capaz de prover distinção àqueles que o possuem.

Uma rápida digressão sobre os pontos acima nos mostra que esta fonte emissora de luz, calor e poder possibilitou hegemonia e evolução a determinados grupos humanos em detrimento dos demais. Lembremos que:

- As noites frias podem dizimar grupos humanos inteiros, levando-os à morte por hipotermia, uma vez que as peles utilizadas para evitar o frio não eram em número suficiente a todos os membros do grupo. Por esse motivo, grupos que dominaram com mais eficiência a técnica de fazer e manter fogo adquiriram maiores vantagens adaptativas;
- A descoberta da utilização do fogo no preparo de alimentos fez com que os caçadores passassem a assar os animais abatidos diretamente sobre as chamas ou em brasas. Leal (1998, p.17) afirma que “*o fogo foi o primeiro ‘tempero’ descoberto pelo homem, uma vez que o sabor da comida depende da temperatura em que é consumida*”; contudo, Franco (2004, p.17) irá apontar a possibilidade de a humanidade ter aprendido a cozinhar seus alimentos antes mesmo de dominar o fogo, pois existem indícios que apontam a possibilidade de hominídeos ancestrais terem utilizado o calor proveniente das fontes termais para diminuir sua sensação de frio e ainda devolver à caça o sabor de presa recém-abatida²⁰;
- Os processos de secagem, defumação e cocção de alimentos (assados ao fogo ou cozidos em potes) possibilitaram melhores condições para a esterilização do alimento servido – dado que a perda de água tem ação direta sobre os micro-organismos, os quais levam à putrefação dos alimentos e são responsáveis pela proliferação de doenças –, aumentando a expectativa de vida dos indivíduos;
- As tarefas que exigiam resguardo da umidade ou da chuva direta eram, em geral, realizadas no interior de abrigos úmidos e, por vezes, escuros, tais como grutas e cavernas. Uma fonte de luz possibilitava maior rapidez

20 Wrangham (2010) possui tese originalíssima sobre este tópico. Ao contrário do sugerido por teses evolutivas formuladas a partir das teorias de Darwin (1859), aquele autor afirma que as pessoas não apenas aprenderam a cozinhar antes de adquirirem certos ‘aspectos de humanidade’, *mas que só se tornaram humanos por esta razão* [destaque meu].

e eficiência na realização das tarefas, pois a maioria dos processos (confeções de machados, raspadores, pontas de lança e a costura de peles) era manual, exigindo perícia e razoável precisão, daí a necessidade da fonte luminosa;

- A intimidação se dava, em parte, ao fato de o gênero humano temer o desconhecido, no caso, o fogo. Parece, contudo, que o manuseio e a posse de uma tocha se tornaram responsáveis por parte do sentimento de medo e/ou apreensão sentido por outros membros do grupo, por grupos rivais ou mesmo por animais predadores. Assim, uma tocha, passou a representar bem mais que uma ‘arma’; tornou-se um símbolo de poder.

O fogo também teve destacado papel em uma técnica dominada pela humanidade desde a pré-história: a metalurgia. Nesta técnica, metais como o cobre e o ferro passaram a ser produzidos em fornos primitivos a partir da utilização do carvão, como combustível, e dos foles de couro animal; com estas modificações, atingiram-se temperaturas maiores e tornou-se possível a fusão dos metais citados. A utilização do fole levou ao reconhecimento da importância do suprimento de ar, tão necessário à manutenção da chama (CHAGAS, 2006, p.39).

A.1.1.2. FIAT LUX ²¹

A ideia de poder, proporcionada pela posse da fonte de luz e calor, atravessará os séculos, estando presente na Roma Clássica. Um dos melhores exemplos sobre a importância do fogo como símbolo de poder pode ser emprestado da peça “Aulularia”, de autoria de Titus M. Plautus (250-180 a.C.). Nela, o avarento Euclião, tentando dissimular sua boa condição financeira, ordenava à escrava Estáfila que removesse todos os sinais comprobatórios da existência de algum tipo de bem em sua casa, visando não ser importunado pelos vizinhos. Assim, diz Euclião

21 Literalmente: “Faça-se a luz!”. Entretanto, o significado real pode ser outro, tal como assevera Tomás de Aquino em suas obras. Esta controvérsia sobre o sentido da frase provocou incertezas e acalorados debates entre cientistas e religiosos por décadas a fio.

à escrava: “*Abi intro et ianuam occlude. (...) Si uicinus adit et ignem rogat, ignem statim exstingue*”²².

É importante esclarecer que a presença de escravos, por si só, não denotaria qualquer tipo de condição especial a Euclião, uma vez que a maioria dos cidadãos romanos possuía servos para ajudar nas tarefas cotidianas. Contudo, somente os cidadãos abastados possuíam escravos para cuidar exclusivamente da manutenção do fogo. A chama representava a veneração pelo centro vivo da casa (a lareira) e o respeito ao deus Lar, protetor das famílias.

O culto ao fogo, entretanto, não era exclusivo aos habitantes do Lácio; egípcios e gregos também cultuavam tal fonte de luz e calor:

- Para os egípcios, Rá, o deus-sol, fonte de energia e responsável pela criação do universo, era a principal divindade. O deus-sol era comumente representado sob a forma de um disco solar (Atom) ou sol nascente (Hórus).
- Para os gregos, o fogo sagrado encontrava-se associado à deusa Héstita (Vesta, para os romanos). A presença desta deusa era obrigatória nas núpcias e em outros importantes rituais. No casamento, a mãe da moça acendia uma tocha na lareira de sua própria casa, levando-a ao lar do novo casal. Este ritual visava trazer boa sorte ao lar em formação. No que tange à cultura helênica, também se sabe que o fogo possuía relevante papel mitológico. Tal comprovação é obtida por meio do episódio no qual Zeus castigou Prometeu, por este ter revelado à humanidade o segredo do fogo, uma das maiores dádivas divinas.

A filosofia helênica clássica, influenciada diretamente pela história e por mitos pré-clássicos, conjugou, de maneira exemplar, interpretações sobre o fogo. Sob a influência de sábios como Pitágoras (570-497 a.C.), Empédocles (490-430 a.C.), Platão (428-347 a.C.) e Aristóteles (384-322 a.C.), desenvolveram-se

²² “Venha para dentro e feche a porta. (...) Se um vizinho se aproximar e pedir fogo, imediatamente apague o fogo” [tradução própria]

ideias originais que buscavam explicar o universo como um todo e, por vezes, sua criação.

Para Empédocles, todas as coisas existentes decorrem de uma mistura de quatro princípios elementares (ar, fogo, terra e água – associados aos deuses Zeus, Hera, Nestis e Hades) sujeitos aos ímpetus agregadores e desagregadores da natureza, ou seja, amor e ódio. Para este filósofo, o que individualiza as coisas é a proporção de mistura entre os princípios elementares, a qual se baseia na inclinação ou direção dos ímpetus (SANTORO, 2007, p.36-38).

Aristóteles, por seu turno, contribuiu decisivamente para o desenvolvimento da filosofia de cunho científico, deixando para a posteridade uma gnosiologia que incluía conceitos herdados de seus predecessores. Adotando como ponto de partida as ideias de Empédocles sobre os quatro princípios elementares, Aristóteles supôs a existência de uma matéria única, indeterminada e desprovida de características, à qual se somavam quatro qualidades fundamentais, de tal sorte que a matéria e as qualidades só existiriam uma em função da outra (ROCHA, 2007, p. 28).

Aristóteles passou a defender a ideia de que os princípios elementares constituíam aspectos da substância primordial, sendo, cada um destes caracterizado pela associação de uma qualidade primária ativa (quente ou frio) e uma passiva (seco ou úmido). Não bastasse tal fato, Aristóteles também postulou a associação entre (i) os quatro princípios elementares característicos do mundo sublunar, (ii) os pontos cardeais e (iii) as qualidades materiais:

No que tange aos pontos cardeais, o fogo era associado ao quadrante sul desde o quinto século antes de Cristo. Sua associação, provavelmente decorrente da Teoria das Zonas Terrestres, foi atribuída a Parmênides (530-460 a.C.). Esta teoria apregoava que existiram em nosso planeta cinco zonas, sendo duas muito frias (os polos terrestres), duas temperadas (as únicas capazes de acolher populações humanas) e uma tórrida intransponível e inóspita, localizada em torno do que

atualmente se denomina equador terrestre, portanto, ao sul do continente europeu (RANGLES, 1994, p. 14-15).

Para Aristóteles, o tato – aqui tomado como caso exemplar – é um sentido no qual estão presentes diversas qualidades polares: quente/frio, úmido/seco, pesado/leve, rijo/frágil, etc. Destas qualidades, destacam-se quatro primárias, consideradas fundamentais e irreduzíveis: duas ativas e duas passivas (acima citadas); as demais – denominadas secundárias – a elas se reduzem. Não se trata, contudo, de diferenças tão somente filosóficas; estas são, antes de tudo, físicas. A associação das qualidades levaria ao estabelecimento dos quatro ‘elementos’ (fogo, ar, terra e água). Importante citar que Aristóteles acreditava na transformação de uma substância em outra, bastando para tal mudar a proporção entre os elementos que davam origem à matéria.

Para entender um pouco das ideias de Aristóteles deve-se examinar uma categoria de fundamental importância denominada substância, que pode ser identificada como algo de existência independente e pertencente a uma ‘espécie particular’. As coisas, por sua vez, pertencem a uma categoria dependente das demais, denominada ‘acidente’ (tal como defendido pelos aristotélicos, entre os quais se destacam os tomistas) e que existe apenas como propriedade ou modificação da substância. Uma cor, por exemplo, sempre está associada a algo que existe para os nossos sentidos: o verde, por exemplo, não existe por si só; está presente nas folhas das árvores, na pele de alguns gêneros de anfíbios e reptéis, ou nas penas de algumas espécies de aves. Assim, Aristóteles afirma que na natureza existe o lugar de cada coisa ou que cada coisa tem seu lugar, vinculando, dessa forma, o espaço ao seu conteúdo intrínseco (SCHENBERG, 2001, p. 62 e 80).

No que diz respeito ao fogo, Aristóteles estabeleceu importante associação entre calor e luz e, ao contrário de Platão, não acreditava ser o calor um tipo de fogo. Por meio de observações simples, Aristóteles verificou que a extinção do fogo era acompanhada, em geral, pelo cessar da luz. Entretanto, advertia que um

caldeirão e seu conteúdo ainda permaneciam quentes por algum tempo, apesar da ausência da chama.

Aristóteles propôs que os quatro princípios elementares tivessem seu lugar natural no cosmos: a terra ocuparia o centro do universo e ao seu redor haveria uma sucessão de esferas concêntricas – nas quais predominariam os demais princípios – responsáveis pela sustentação da esfera celeste, na qual se encontrariam a lua, o sol e os demais planetas. Os corpos celestes, por sua vez, não seriam constituídos pela combinação dos quatro princípios elementares; eles derivariam de uma quintessência ou éter e possuiriam uma “alma” responsável pelo movimento e condutora de suas viagens celestiais (KENNY, 1999, p.113).



Figura 7: *Os Quatro Elementos* (1472). Parte integrante do *Liber de responsione mundi* de Isidoro de Sevilha. Huntington Library, San Marino: USA.

Fonte: <http://internetsakespeare.uvic.ca/Library/SLT/ideas/order/elements.html>. Acesso em 28 jun. 2014.

A figura 7 (na página anterior) mostra as relações existentes entre princípios elementares, qualidades primárias, estações do ano, qualidades intrínsecas dos seres humanos e pontos marcantes do ciclo circadiano

O pensamento aristotélico, aqui exposto em parte, ganhou notoriedade e difundiu-se pela Europa durante a Idade Média com auxílio da Escolástica. Em seu esteio, a ideia de quinto elemento também ganharia importância no estabelecimento das “estruturas mentais” (FRANCO Jr., 1986, p.149-150) do fim do medievo, chegando a influenciar sábios como Isaac Newton (1643-1727).

A.1.1.3. FOGO E LUZ NAS ‘TREVAS’²³

No início do período medieval, caracterizado pelas cosmogonias fantásticas e pela exegese teológica, os neoplatônicos, e, em consequência, as ideias platônicas voltaram a se destacar na cena filosófica, por conta da forte influência gnosiológica destas sobre os sábios daquele período, entre os quais se sobressai o santo católico Agostinho de Hipona (354-430). O passar das décadas, entretanto, revelaria a maior importância dos comentários dos *Libri naturales* e a supremacia da ciência aristotélica.

Como decorrência da teoria aristotélica, passou-se a acreditar em uma cosmologia que dividia o universo em dois mundos distintos: *o terreno* (ou sublunar), considerado imperfeito, sujeito a mudanças e formado pelos quatro princípios elementares, e *o celeste*, perfeito e imutável, localizado para além da esfera do fogo, concêntrico às demais e constituído pela quintessência em movimento perene.

A presença do éter, que permaneceu por séculos como um dogma aceito pelas cosmogonias medievais, explicava o movimento dos planetas situados para além da esfera lunar. Acreditava-se, assim, que todo corpo presente no mundo sublunar era formado pela associação dos quatro princípios elementares, em proporções variáveis, sendo seu lugar no mundo terreno determinado pela prevalência de um dado princípio. Assim, corpos formados por grande porcentagem do ‘elemento’ terra estariam mais próximos do centro do universo; seguindo-os na

23 Filósofos e historiadores iluministas alegavam que o período compreendido entre os séculos V e XV fora marcado pelo retrocesso do pensamento e pelo atraso intelectual, científico e cultural da humanidade. Para estes, o domínio da fé obscureceu as ‘luzes da razão’; por conta disto, cunharam o termo pejorativo “Idade das Trevas”.

ordem, os formados pela água, pelo ar e pelo fogo, sendo o sol (presente à esfera celeste) seu mais digno representante.

No terço final da Idade Média, frente aos problemas em se explicar os fatores naturais e tendo a Sagrada Escritura por fundamento, procurou-se adaptar as ideias de Aristóteles ao cristianismo. Tal tarefa, executada com afinco pelo dominicano Tomás de Aquino (1225-1274), resultou em um sistema filosófico de bases sólidas, o tomismo, e em sua vertente escolástica.

Entre os assuntos discutidos pelos tomistas, encontrava-se a noção primordial de luz; como no início dos tempos ‘só havia o verbo’, Deus ordenou: *Fiat Lux!* Para Tomás de Aquino, tal luz pode ser entendida por meio de seu sentido original (tal como percepção sensível) ou metafórico.

Já no período medieval, o fogo era considerado um elemento capaz de purificar os males que afligiam as pessoas. A morte dos pecadores na fogueira, por exemplo, se justificava por este fato. O fogo purgava o mal, anulava as máculas do pecado cometido e permitia vida eterna da pessoa ao lado de Deus. O pensamento agostiniano reforçava a ideia de existência do inferno e afirmava a natureza essencialmente moral do fogo eterno, embora não negasse a existência de chamas reais e de grande suplício. É importante lembrar que até o final do século XII não há registro do termo *purgatorium* em qualquer obra, ou seja, a palavra simplesmente não existia, uma vez que só existiam dois caminhos possíveis à alma após a morte: ou dirigia-se ao paraíso, para desfrutar da presença divina, ou arderia no eterno fogo do inferno.

Na Idade Média, luzes e trevas coexistiram: uma por oposição à outra, eram mutuamente dependentes. O castiçal de bronze (fig. 2) representa, de forma adequada, tal ambiguidade. Nele, se vê escrito, ao redor da coroa e do pedestal, uma inscrição latina que afirma: “*Este porta-luz é obra de virtude: com seu brilho prega a doutrina, para que muitos não se percam nas trevas do vício”*. Nele também se pode notar a ferrenha luta da humanidade contra serpentes e monstros; não se trata de uma batalha irremediavelmente perdida, mas sim que a luz [ou o poder

divino] que brilhou na escuridão possibilitaria o triunfo da humanidade sobre o poder das trevas, sobre o mal (GOMBRICH, 1988, p.130).



Figura 8: Castiçal da Catedral de Gloucester (c.1104-13)

Bronze dourado, altura 58,4cm; Victoria & Albert Museum, Londres.

Fonte: Gombrich, E.H. *História da arte*. Rio de Janeiro: LTC, 1995. Acesso em 28 jun. 2014.

O fim do período medieval foi marcado pelo surgimento de grande número de questões – aparentemente insolúveis – sobre a natureza, uma vez que somente a interpretação das Escrituras não possibilitava a resolução de muitas destas. Entre as questões destacam-se as concernentes à importância e à origem do fogo ou da luz.

Respostas, ainda que preliminares, surgiram no início do século XIII por meio da análise metafísica da luz.

Conhecida por seus efeitos e concebida como símbolo divino, a luz passou a ser apreendida, na visão de Robert Grosseteste (1168-1253), por meio da autodifusão (multiplicação de si) e da propagação instantânea. Grosseteste aliou a geometrização às causas e efeitos da luz, além de propor uma teoria em que a luz tornou-se um princípio de explicação física extensível a toda natureza. Mais que isso, contudo, Grosseteste estabeleceu um procedimento que passou a fundamentar toda ciência experimental – incluindo a Física – e que exerceu influência direta sobre Francis Bacon e sobre o método científico dos séculos vindouros.

Como se percebe, a física grega (*physis*), assim como a praticada durante o medievo, era fortemente animista. Esta corrente filosófica afirmava que “*para cada corpo em movimento deveria existir um motor; não existindo tal motor, mas havendo movimento, o corpo seria considerado automovente*” (ROCHA, 2007, p.68). Entretanto, a análise da física praticada no início da Idade Moderna permitiu o surgimento de duas vertentes, tais como descritas por Schenberg (2001, p.70):

- A primeira, denominada física matemática ou racionalista, apoiada sobre a filosofia grega clássica, mas substancialmente diferente desta, que chegou ao século XVII por meio da difusão proporcionada pela Escolástica. Intrinsecamente conceitual, dela decorreram a óptica geométrica e os princípios rudimentares da estática e da hidrostática²⁴.

24 A astronomia constituía uma ciência à parte; que se relacionava com a música por meio da Harmônica; sua relação com a Física só tornou-se possível com o advento da acústica.

- A segunda, denominada física baconiana ou empirista, formou-se a partir da compilação de experimentos realizados por artesãos, alquimistas e sábios interessados na resolução de problemas de ordem prática. Destas experiências, decorreram descobertas de importantes instrumentos de medida, entre eles, o termômetro, descoberto pelo próprio Galileu, em 1592, e por Sanctorius Santori (1561-1636), em 1612, e o barômetro, por Evangelista Torricelli [1608-1647], em 1643²⁵.

Embora mutuamente em antítese, o racionalismo e o empirismo concordam que “(...) o homem não conhece mais as coisas, mas sim as impressões que as coisas exercem sobre seu intelecto (racionalismo) e sobre seus sentidos (empirismo)” (PADOVANI e CASTAGNOLA, 1962, p.233).

Deve-se notar que Galileu Galilei, mesmo agindo de forma diversa aos princípios fundamentais do Empirismo, foi um dos primeiros sábios a congregar as duas vertentes. Para isso, deve-se perceber o profundo conhecimento matemático daquele sábio, capaz de estabelecer relações matemáticas fundamentais, mesmo desconhecendo o conceito de funções – conceito que só figuraria na Geometria Analítica de René Descartes (1596-1650) – e da utilização de experimentos originais feitos por ele, dos quais obtinha dados comprobatórios de suas teses.

Isaac Newton foi outro cientista que dominou a ambas vertentes. Em sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, de 1687, Newton utilizou-se do método matemático tradicional. Na obra *Optica*, de 1704, além de tratar de assuntos relacionados à Química, apresentou teses originais vinculadas a um novo tipo de

25 O termômetro constituir-se-á em objeto de investigação a ser analisado no Capítulo 3.

óptica que, superando a visão geométrica, propõe conceitos fundantes da ondulatória.

Muitos dos cientistas que escreveram neste período não utilizaram recursos matemáticos que atualmente são considerados de suma importância à compreensão dos fenômenos relacionados ao calor, uma vez que estes ainda não haviam sido descobertos ou introduzidos. Entre os recursos matemáticos utilizados na análise do calor, encontram-se a geometria analítica, seu sistema de coordenadas e a definição cartesiana de funções, e a técnica de derivadas parciais (descoberta apenas no século XVIII). Esta técnica introduziu “linguagem” e teoria originais, que fixaram as bases da física matemática, e estabeleceu, a partir de um enfoque empirista, os princípios norteadores da termodinâmica e do estudo dos fluidos.

A.1.2. TEMPERATURA: DA SENSACÃO À MENSURAÇÃO

“... quando li que a água fervia a um determinado grau de calor, senti imediatamente grande vontade de construir um termômetro...”

D. G. Fahrenheit [1686-1736]

A.1.2.1. REVOLUÇÃO CIENTÍFICA E MUDANÇA PARADIGMÁTICA

Para que a diferença entre as Idades Média e Moderna se torne evidente, deve-se analisar, como caso exemplar, a hierarquia dos seres. Surgida durante a Idade Média, esta pregava que, em seu nível hierárquico mais baixo, estaria a ‘natureza sem alma’, funcionando apenas como um recurso necessário à manutenção do corpo humano, enquanto não ocorresse a passagem para junto do Criador. O papel dos homens, por sua vez, seria o mais importante de todos, uma vez que só a humanidade, constituída por animais dotados de corpo e alma, poderia desfrutar de tal passagem (MATTOS, 2000, p.30). Haveria, assim, predomínio da ideia de transcendência da natureza pela humanidade, bem como da visão utilitarista do meio.

Com o fim da Idade Média, a ciência tornou-se um campo sem vínculos com a religião. Cientistas e filósofos afastaram-se das doutrinas tomistas, uma vez que questões fundamentais da natureza ainda não haviam sido respondidas. “A superação das incertezas não poderia resultar de correções parciais que tentassem aproveitar as ruínas da visão de mundo medieval” (PESSANHA, 1999, p. 9).

Era necessário, portanto, que se encontrasse um método capaz de evitar os labirintos da incerteza e das construções meramente verbais que dominavam o medievo. O domínio filosófico da Escolástica, resultante da hibridação entre o método aristotélico e a doutrina das Sagradas Escrituras, estava, pois, próximo do fim.

O surgimento da “*scienza nuova*”²⁶ representou muito mais que a formulação de uma nova teoria científica que veio substituir as teorias tradicionais, em vigor desde a Antiguidade. Pode-se dizer que foi, realmente, uma crise de âmbito metodológico/gnosiológico, dado que afetou a concepção tradicional de método científico. Suas mudanças repercutiram profundamente para além do plano lógico-epistemológico, pois representaram “(...) *o abandono da concepção de um mundo fechado e hierarquicamente ordenado em que cada coisa tem seu lugar, que é a concepção aristotélica de cosmo*” (MARCONDES, 2007, p. 19-20, grifo meu).

Utilizando teorias e princípios por vezes muito diversos de seu antecessor, o método científico passou a ter, como uma de suas metas principais a descoberta do conhecimento necessário ao controle da natureza. Essa sensação de poder sobre o meio natural atraiu de camponeses a nobres, de leigos a religiosos, de burgueses a filósofos, dando aos indivíduos capacidade de (1) analisar problemas, (2) sugerir hipóteses, (3) arquitetar modelos e (4) realizar experimentos que levassem à descoberta de leis gerais.

A Revolução Científica despojou a natureza de qualquer vestígio de sacralidade. Passou a prevalecer, então, a visão mecanicista do universo, tal como defendida por Descartes. Para este filósofo, o universo podia ser encarado como um local em que engrenagens, colocadas a trabalhar por meio da Providência Divina, funcionavam harmonicamente. Seu cientificismo, além de atestar valor à natureza, relegava o utilitarismo, tornando possível conceber a separação entre razão e emoção, corpo e mente, e, em consequência, entre homem e natureza.

Na Idade Moderna, o homem, em seu sentido lato, tornou-se figura central do universo, sendo a relação Deus/homem substituída pela relação homem/ambiente. Dessa forma, ocorreu uma valorização da capacidade da humanidade em conhecer e transformar a realidade. A filosofia aristotélica, que havia

26 Em uma época na qual predominam métodos analíticos, a ideia de “*scienza nuova*” surge como “(...) *uma resposta a favor do saber engenhoso, que integra saberes antigos e modernos para a compreensão do facere humano na criação do mundo*” (LIMA, 2006, p. 249-250). O termo “*scienza nuova*”, cunhado por Giambattista Vico [1668-1744], é antecipado por Galileu, que o utiliza com acepção equivalente.

sido reinterpretada pelos teólogos medievais – e que se tornara a visão predominante durante a Idade Média – não era mais suficiente para a explicação da gênese e existência do meio natural.

Indícios do método utilizados pelos naturalistas – estudiosos da fauna e da flora – mostravam um retorno às ideias clássicas: dava-se voz ao maior número possível deles para, no fim, acrescentarem-se juízos originais, da autoria destes ou de seus contemporâneos, o que levava à formulação de novas teses. O método, portanto, não desejava apenas

“recuperar escritos da Antiguidade clássica e documentos bíblicos, *[também]* tinha por meta ir além das corrupções acumuladas no transcurso dos séculos anteriores até chegar à pureza dos textos originais” (RUDWICK, 1987, p.25).

É importante notar que os métodos empregados pelos estudiosos da natureza, pelos físicos e pelos filósofos eram muito diversos entre si, resultando em importantes divergências metodológicas. Mas isso também ocorria com certa frequência entre cientistas que compartilhavam o mesmo objeto de estudo: citem-se as duas correntes de filiação entre os naturalistas, cujos membros eram denominados:

- Enciclopedistas, como Conrad Gesner [1516-1565], os quais acreditavam que para se atingir o ‘estado de pureza’ dos textos clássicos e sagrados fazia-se necessário o estudo aprofundado de línguas, tais como o grego, o latim e o hebreu, de forma que fossem minoradas as perdas ocorridas por ocasião da tradução dos textos acima citados; ou
- Reformistas, como Bernard Palissy [c.1510-c.1590] e Nicolau Steno [1638-1686] – ambos filiados à Reforma Cristã – e que persistiram no uso de um novo enfoque metodológico, segundo o qual os naturalistas abandonariam a tradição clássica de compilar todas as opiniões sobre o tema, e se limitariam apenas a citar as obras de seus contemporâneos consideradas ‘inéditas’ (RUDWICK, 1987, p.19-29 e 75-98).

Martins (1994, p.68) assevera que o Renascimento, ocorrido na transição entre as Idades Média e Moderna, proporcionou uma maior atenção dos sábios em relação aos trabalhos executados durante o período clássico ocidental e oriental. Este retorno levaria ao ressurgimento de importantes princípios filosóficos da Astronomia/Astrologia à consolidação da Alquimia; todos apoiados no neoplatonismo²⁷, no panteísmo²⁸ e na crença da existência de um microcosmo (modelo que considerava o homem como um universo em miniatura).

Na Física do séc. XIV aparecem as primeiras ‘linguagens conceituais’ matemáticas, as quais proporcionam a descoberta e o aperfeiçoamento de métodos que conduziram à remissão das formas e dos conceitos de graus formais, bem como àquela capaz de revelar e aprofundar o estudo das proporções. Estas vêm se juntar às chamadas ‘linguagens analíticas’, em voga desde a antiguidade clássica, que permitiam a resolução de problemas tradicionais da ciência natural e, por vezes, de alguns inéditos (MURDOCH, 1975, apud LIBERA, 1990, p.55).

No fim da Idade Média, a teoria dos quatro princípios elementares e a versão tomista da filosofia aristotélica tem sua importância retomada e, por vezes, exacerbada, quer a analisemos do ponto de vista dos orbes ou da mudança epistemológica ocorrida entre as décadas de 1480 e 1520 e proporcionada por Nicolau Copérnico [1473-1543], à qual se deu o nome de Teoria Heliocêntrica (RANDLE, 1994, p.16). Por meio desta, o sol, fonte de luz e calor, ascendia ao posto de centro do universo, relegando a Terra a uma posição periférica, tanto do ponto de vista geométrico quanto filosófico.

A perda de influência do aristotelismo, causada pela falta de respostas a certos fenômenos naturais, como já visto, levou à substituição dos estudos gerais sobre grandezas qualitativas, tais como frio e calor, por experimentos envolvendo

27 O neoplatonismo pode ser interpretado como o esforço supremo do pensamento clássico em resolver o dualismo grego (tido como obstáculo intransponível); acreditava na superação do dualismo pela utilização de quadros lógicos aristotélicos e pela interpretação por meio do monismo estoico.

28 Panteísmo: Doutrina filosófica que afirma a identidade substancial de Deus e do universo em uma unidade indivisível. O mundo emana de Deus, tal como a luz emana de sua fonte. O ser gerado existe junto ao gerador, dele não se separando, sendo meramente parte ou aspecto deste.

grandezas quantitativas, as quais proporcionavam a descoberta de possíveis explicações sobre os resultados obtidos pelos cientistas de então.

Os cientistas do século XVII, muitos dos quais possuidores de forte conhecimento matemático, preocuparam-se em separar os conceitos matematizáveis dos vinculados à metafísica clássica ou aos ‘dogmas’ tomistas. Vale lembrar que tais cientistas trabalharam em sintonia com os artífices – detentores da técnica – e que, em algumas ocasiões, foram estes os responsáveis pela criação e/ou aperfeiçoamento dos novos instrumentos de medida.

Mesmo sendo conhecido desde a antiguidade clássica, o calor (ou grau de calor, a distinção ainda não se tornara importante no séc. XVII) ainda prescindia de um estudo que o caracterizasse e interpretasse, revelando-o em sua totalidade. Daí a importância dos estudos preliminares, clássicos e medievos, sobre o calor e sua gênese, bem como dos realizados na Idade Moderna, objeto de estudo desta seção, os quais tornaram possíveis: (i) a distinção entre calor e temperatura e (ii) o aparecimento e a rápida evolução das primeiras máquinas térmicas.

A.1.2.2. O TERMOSCÓPIO

Fílon de Bizâncio [280-220 a.C.] realizou os mais antigos experimentos sobre a expansão do ar por meio de aquecimento e criou um aparelho que consistia em um tubo conectado a uma esfera oca colocada sobre um jarro com água. Fílon observou que se a esfera fosse colocada ao sol, bolhas eram liberadas no jarro e o ar expandido saía da esfera. Se o mesmo dispositivo fosse colocado em local mais fresco, o ar contraía devido à temperatura mais baixa, ocorrendo a ascensão da água pelo tubo.

O primeiro instrumento utilizado para medir variações de temperatura por meio de variações sensíveis de outras propriedades foi o termoscópio (fig. 8), cujo nome é derivado do grego *thermé*, temperatura, e *skopeo*, eu vejo.

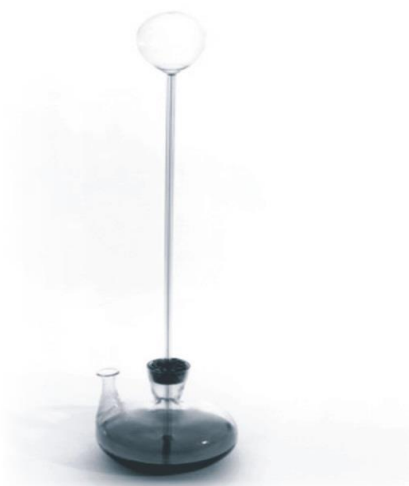


Figura 9: Reprodução do termoscópio de Galileu (Fonte: Istituto i Museo di Storia della Scienza (IMSS), Florença, Itália. Acesso em: 23 jun. 2014).

Provavelmente na última década do século XVI, durante o período em que esteve radicado em Pádua, Galileu trouxe à luz seu termoscópio. O biógrafo de Galileu, Vincenzo Viviani [1622-1703], afirma que o termoscópio foi posto à prova em Pisa, no ano de 1597, sendo seu testemunho confirmado pela correspondência enviada em 20 de setembro de 1638 pelo frade Benedetto Castelli [1548-1643] a Ferdinando Cesarini, [1578-1643] a qual se encontra reproduzida, em parte, na figura 10.

O catálogo virtual do *Istituto i Museo di Storia della Scienza* (IMSS, Florença, Itália) assevera que um instrumento provido de escala e análogo ao descrito foi testado em 1612, em Veneza, por Sanctorius Santori. Construído em vidro, o termoscópio consistia em um bulbo (do tamanho aproximado de um ovo) que terminava em um tubo longo e fino. A extremidade deste tubo era emborcada em um recipiente maior contendo água e corante dissolvido. Um pouco do ar no tubo era expulso antes da colocação do líquido, o que levava à elevação do nível do líquido. Quando o ar restante no bulbo era aquecido ou resfriado, o nível do líquido no tubo variava (qualidade sensível), refletindo uma mudança no valor da temperatura do ar. A observação, facilitada pela fixação de uma escala graduada permitia avaliar, quantitativamente, o aumento ou diminuição dos graus de calor ou frio.

Forsi colla considerazione dello strumento di sopra nominato mi dichiarerò meglio. Sia dunque la caraffella A, il suo collo BCD, colla bocca D nel vaso, nel quale sia l'acqua sino al livello EF: è manifesto, che riscaldata la caraffella A e poi collocata la sua bocca nell'acqua del vaso, tosto che la caraffella sarà libera dal calore, ristrignendosi in minor mole l'aria A, l'acqua del vaso sormonterà pel collo in C e poi in B e più in alto, non potendo rientrare altro corpo per l'istesso canaletto, più facile ad esservi tirato. Ma se potesse entrarvi altra materia, l'acqua non salirebbe a riempire lo spazio lasciato dall'aria condensata; e se fosse totalmente proibito l'ingresso nella caraffella ad ogni altro corpo esterno, in tal caso o rimarrebbe l'aria in A rarefatta, ovvero si spezzerebbe la caraffella. E forse (siami lecito per digressione aggiugnere) da questo accidente si può risolvere il quesito, per qual cagione i vetri, et anche altri corpi, alle volte da sè stessi si spezzano, ovvero con immergerli nell'acqua notabilmente fredda o notabilmente calda; la qual cosa direi che potesse avvenire, perchè ritrovandosi sparse per la sostanza del vetro molte

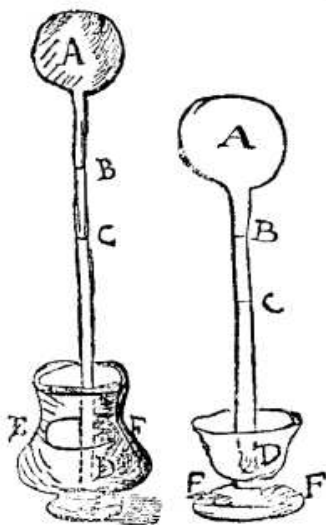


Figura 10: Parte da carta enviada por Castelli a Cesarini, em 1638, e impressa na *Le Opere di Galileo Galilei*, vol. XVII, p. 378. (Fonte: <http://fig.if.usp.br/~oliveira/ceul.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2014).

O maior inconveniente do termoscópio, a falta de exatidão, se devia principalmente ao fato: (1) do aparelho consistir em um sistema aberto e, portanto, fortemente influenciado pela pressão atmosférica; (2) do fluido, ou sensor, termométrico evaporar-se com o tempo (PIRES *et al.*, 2006).

Como se percebe, este aparelho refletia uma tendência moderna: sua utilização empírica possibilitava a transformação de sensações subjetivas (como as de frio ou calor) em grandezas objetivas e mensuráveis, colocando-as em consonância com a filosofia científica de então.

A.1.2.3. TERMÔMETROS E ESCALAS TERMOMÉTRICAS RELATIVAS

A perda de influência das ideias aristotélicas colaborou com a substituição dos estudos de natureza qualitativa pelos de natureza quantitativa, tal como se percebe na invenção e aperfeiçoamento dos termômetros. Os matemáticos de então preocuparam-se em separar os conceitos matematizáveis, presentes na doutrina

aristotélica, dos provenientes da intuição de Aristóteles e sábios afins, os quais estavam fortemente vinculados às ideias tomistas. (MULTHAUF, 1993, p.278).

Inicialmente, deve-se lembrar de que a noção de graus de calor (ou de frio) remonta ao séc. II. Claudius Galenus [c.129-c.200] foi o primeiro a utilizar um sistema composto por massas iguais de gelo e água fervente, denominado *padrão neutro*. Em ambos os lados deste padrão havia quatro graus de calor e quatro graus de frio, tal como declara Quinn (1990, p.25). Este sistema era utilizado para determinar os graus de calor ou temperatura, como posteriormente denominada, de um determinado corpo.

Na década de 1620, os cientistas devotados à Termologia começaram a utilizar o termoscópio de forma quantitativa, de modo a estimar a temperatura dos ensaios médicos, físicos e meteorológicos. Benedict (1969) e Longair (2003) afirmam, no entanto, que a palavra termômetro precedeu o surgimento do instrumento, sendo utilizada pela primeira vez na obra *La Récréation Mathématique* (1626), de autoria do jesuíta francês Jean Leucheron [1591-1670], que descreve com clareza o termômetro criado por Cornelius Drebbel [1572-1633], apresentando-o por meio da ilustração reproduzida – sem modificações – na figura 11.

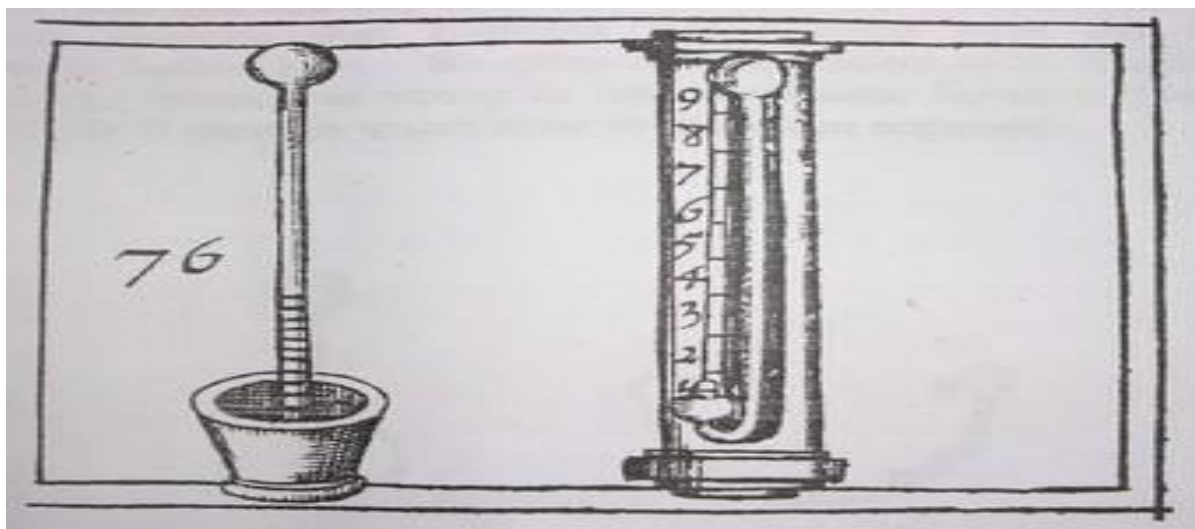


Figura 11: Termômetro de Drebbel (dir.) “*Les Récréations Mathématiques*”, 1626
(Fonte: http://www.zytemp.com/infrared/thermometry_history.asp. Acesso em: 27 jun. 2012).

O primeiro termômetro de vidro (1654), provavelmente por encomenda do grão-duque Ferdinando II da Toscana [1610-1670], foi construído em sistema fechado e preenchido com solução de álcool etílico pelo artífice Mariani [1584-1654] para a *Accademia Del Cimento di Firenze* (Academia Experimental de Florença), a qual se dedicava a “perpetuar e estender os enfoques experimentais e matemáticos às ciências” (RUDWICK, 1987, p.76). As vantagens do termômetro de Viviani em relação ao termoscópio de Galileu se davam devido:

- À característica do sistema: o termômetro foi construído em sistema fechado, o que tornava tal instrumento não susceptível às variações de pressão atmosférica, além de impedir a fácil evaporação do fluido termométrico.
- Ao fluido termométrico: este apresentava rápida resposta à mínima variação de temperatura, além de não congelar em ambientes frios.

Como se depreende da figura 11, os formatos dos termômetros dos séculos XVII e XVIII eram muito próximos aos atuais. Note-se também que, ao contrário do termoscópio, o ar não era parcialmente retirado do interior do termômetro antes da selagem do tubo. Se, por um lado, impedia a dilatação uniforme do fluido termométrico, por outro, proporcionava maior exatidão às medidas instrumentais.

Na década seguinte, o cientista Robert Hooke [1635-1703] estabeleceu os princípios que permitiram a comparação entre termômetros diferentes; com isto, dava-se por fim a obrigatoriedade de se construírem réplicas exatas para cada modelo de termômetro. Hooke, segundo Pires et al. (2006), também foi o primeiro cientista a perceber a existência de relação linear entre o volume do fluido termométrico contido no instrumento e o valor da temperatura.

Interessante notar-se que, das vinte e sete escalas relativas de temperatura utilizadas em 1778, apenas as estabelecidas por Daniel G. Fahrenheit, René-Antoine F. de Réaumur [1683-1757], e Anders Celsius [1701-1744]

apresentaram algum sucesso no meio científico. Pires et al. (2006) afirmam que “os problemas culturais, as guerras, as diferentes interpretações do fenômeno da temperatura e as diferentes maneiras de se construir o instrumento” também contribuíram para dificultar a expansão do uso dos termômetros.

O cientista e artífice batavo Fahrenheit tornou-se popular não somente pela proposição de uma nova escala termométrica (1724), mas também pelos excelentes termômetros que fabricou e pela metodologia precisa que utilizou em seus experimentos. Sua técnica não era original; foi, em grande parte, adquirida de Olaf Roemer [1644-1710], primeiro cientista a estabelecer, em 1702, uma escala termométrica a partir de dois pontos fixos.

Contudo, Fahrenheit se revelaria tão original quanto seu mestre, tornando-se pioneiro na: (1) utilização e popularização da utilização de mercúrio (filtrado por meio de membranas de couro) como fluido termométrico; (2) construção do primeiro termobarômetro (termômetro e barômetro associados em um só instrumento), com o qual pode observar a relação entre a temperatura de ebulição e a pressão atmosférica; (3) descoberta de que as medidas de pressão, volume ou temperatura só seriam possíveis a partir da fixação de uma das outras variáveis.

Assim, as objeções existentes à adoção das temperaturas de ebulição e fusão da água como pontos fixos foram paulatinamente removidas e as temperaturas observadas nas mudanças de fase desta substância passaram a ser aceitas como padrão às escalas termométricas relativas (MEDEIROS, 2007, p.167).

Por meio de experimentos com termômetros cujo sensor era mercúrio líquido, Fahrenheit estabeleceu dois pontos fixos iniciais em sua escala: a temperatura de uma mistura feita de água, gelo e sal de amônio à qual atribuiu o valor 0º, e a temperatura média do corpo humano, a qual igualou a 96º. Ao realizar outros experimentos comparativos, verificou que a fusão da água sólida ocorria à temperatura (fixa) de 32º, ao passo que a ebulição ocorria em um ponto também fixo que equivalia ao valor 212º.

As posições relativas ao zero e à temperatura indicada para o corpo humano, utilizadas por Fahrenheit, geraram acaloradas discussões ao longo do tempo. Para alguns, a escolha deveu-se à tentativa de evitar a ocorrência de valores negativos de temperatura. Entretanto, Ronan (1987, p.115) nos relata uma experiência anterior à de Fahrenheit, na qual Roemer, em 1708, utilizara tal mistura como ponto fixo, porém trabalhando com um termômetro cujo sensor era álcool etílico. Ao que tudo indica, Fahrenheit apenas buscava testar o caráter reprodutível da experiência presente no método científico. Estavam lançadas as bases da construção de novas escalas termométricas.

Contemporâneo a Fahrenheit, Réaumur também alcançou êxitos notáveis no que tange à Termologia. Famoso na Europa Ocidental do séc. XVIII, ele utilizou, em 1731, um termômetro preenchido por etanol. Ele observou que o álcool sofre expansão linear da ordem de 80 partes por mil quando sua temperatura varia entre os pontos (fixos) de congelamento e ebulição da água. Então, propôs uma escala que tomava tais pontos como referência: atribuiu o valor 0º (ou 1000 unidades) para o ponto de mínimo, que equivalia ao de congelamento da água, e de 80º (ou 1080 unidades) para o ponto de máximo, equivalente à ebulição da mesma. (RONAN, 1987; MEDEIROS, 1999).

Réaumur e seus colaboradores superaram dificuldades relacionadas à escolha: (1) dos pontos fixos, que funcionariam como base desta e de outras escalas posteriores e do número de divisões escalares; (2) do fluido termométrico e do cálculo exato de seu volume; e (3) do tipo de vidro necessário à fabricação do instrumento.

A escala termométrica do astrônomo Andrés Celsius, datada de 1742, diferia daquela atribuída a Réaumur por ser centígrada, ou seja, a diferença entre os pontos de fusão e ebulição da água, utilizados como referência, correspondia a um intervalo de 100º. Contudo, Celsius atribuiu valor zero à ebulição e cem à fusão²⁹. A

29 Ao que parece, a inversão entre os valores referentes às mudanças de fase da água foi proposta pelo biólogo sueco Carolus Linnaeus [1707-1778] ao artífice Daniel Ekström [1711-1760], o qual se

atribuição do valor 0º ao ponto de ebulição revelava a preocupação de Celsius em evitar a presença de números negativos em sua escala, daí a escolha deste como ponto de mínimo. Por conta disso, a escala original de Celsius apresentava a peculiaridade de mostrar que o aumento dos valores escalares estava associado a uma diminuição real da temperatura.

A metodologia utilizada por Celsius e o fato de sua escala estar invertida em relação às já citadas parece ter origem no fato de Celsius ter utilizado, no início de sua curta carreira, o instrumento projetado por outro astrônomo: Joseph-Nicolas Delisle (1688-1768). Sua escala (1732) apresentava tal comportamento, mas diferia por apresentar um intervalo de 150º entre os pontos de fusão e ebulição da água.

Na publicação "*Observations of two persistent degrees on a thermometer*", de 1742, o suíço Celsius relata os experimentos que realizou e que o levaram a constatar a relação do ponto de congelamento com a latitude e a pressão atmosférica. A partir desses experimentos, Celsius descobriu a relação matemática que regia a influência da pressão barométrica sobre o ponto de ebulição de alguns líquidos, em excelente acordo com os dados atuais. Por conta desta influência, preferiu ajustar o ponto de ebulição da água para o valor zero³⁰.

Por meio de experimentos, Fahrenheit, Réaumur e Celsius constataram importantes desvios entre os valores obtidos por meio de cada um dos modelos de termômetro e, em certos casos, até a falta de precisão destes. Tais desvios, de ordem estrutural, eram devidos principalmente à:

- Composição variável do fluido termométrico e da solubilidade do ar no mesmo;

convenceu de que tal mudança seria conveniente. A única fonte histórica que cita tal fato é a dissertação *Hortus Upsaliensis*, de autoria de Samuel Naclér [1724-1770] (HUNT INSTITUTE, 2009).
30 Analogamente a uma orquestra em que os instrumentos musicais são afinados em relação ao de afinação mais difícil (como na música *Abertura 1812*, de Tchaikovsky, em que o conjunto de canhões serve de base para a afinação), Celsius calibrou seu instrumento por meio do ponto de ebulição que, como vimos, apresenta maior imprecisão.

- Dificuldade em se ‘soprar’ um tubo cilíndrico perfeito, por maior que fosse a destreza técnica do vidreiro responsável pela construção do instrumento de medida;
- Contração do vidro nos termômetros, o que acarretava perda de calibração com o passar do tempo.

Resolvidas tais pendências, os termômetros passaram a ocupar papel de destaque no controle dos processos industriais. Métodos desenvolvidos pelo cientista Jean-André Deluc [1727-1817] foram utilizados para a calibração rigorosa dos termômetros, de forma que estes pudessem ser utilizados em exaustivas séries de medidas sistemáticas, tomadas a partir de 1760. Com isso, os termômetros do fim do séc. XVIII passaram a apresentar desvios de apenas um décimo da menor divisão de sua escala.

A análise das fontes de calor e a quantificação da temperatura só se tornaram possíveis pela fixação de escalas termométricas relativas baseadas na dilatação volumétrica dos fluidos. Utilizadas de forma exclusiva por mais de um século e válidas até os dias atuais, as escalas termométricas relativas tiveram seu grau de importância diminuído quando do aparecimento das escalas absolutas de temperatura propostas por William Thomson [1824-1907] – ou lorde Kelvin – e William John Macquorn Rankine [1820-1872], ambas baseadas em princípios termodinâmicos.

A.1.3. FLUIDOS INTANGÍVEIS DO UNIVERSO MECÂNICO

Para se entender a diferença entre calor e temperatura, deve-se retroceder no tempo: a um período em que não havia termômetros, mas no qual era possível estimar os *graus de calor* (ou de frio) a partir de experimentos. Para compreender a relação entre calor e vapor, deve-se iniciar a explicação a partir de

um momento histórico marcado pela inexistência de divisão entre as ciências³¹, em que a Revolução Científica, ainda embrionária, dava os primeiros passos na direção de explicar o funcionamento do homem-máquina por analogia ao universo-mecânico.

Nesta época, começam a surgir explicações plausíveis às questões concernentes à natureza da matéria, e que muito se afastam das preconizadas desde a antiguidade clássica helênica ou latina. Para se conseguir tal intento, tomaram-se como ponto de partida: (i) o estabelecimento dos fluidos como chave interpretativa aos fenômenos naturais e (ii) os estudos comparativos entre os ramos científicos incipientes.

A.1.3.1. O SURGIMENTO DAS TEORIAS FLUIDO-DEPENDENTES

O cientista brasileiro Mário Schenberg [1914-1990], em sua obra *Pensando a Física*, analisa esta ciência tendo por foco as descobertas ocorridas entre os séculos XVI e XVIII. Por conta da quantidade de teorias fluido-dependentes, da noção de fluidez e de teses apoiadas sobre o conceito de dinamismo, Schenberg, após análise precisa, chamará tal período de *Época dos Fluidos*. Reforçando a periodização proposta em sua análise, afirma o autor: “*Havia o fluido elétrico ou os fluidos elétricos, o fluido calórico, e ainda outro fluido que era utilizado para explicar certas reações químicas, o flogístico*” (SCHENBERG, 2001, p.93).

Mas por que os fluidos tiveram tanta relevância? A melhor explicação parece preconizada por Doll Jr. (2002, p.130). Para este autor, Descartes descreveu as funções humanas – exceto a razão – como partícipes de uma estrutura genuinamente hidráulica, daí a importância dos fluidos. Ele acreditava que as fibras nervosas se assemelhavam a tubos ocos que saíam do cérebro e “*que continham, como este, uma chama muito brilhante e pura, (...) um vento muito sutil, denominado espírito animal*” (DESCARTES, 1999, p.109, grifo meu). Segundo a interpretação cartesiana, os “*corpos de animais de verdade podiam ser entendidos como*

31 “Aqueles que chamaríamos hoje de teólogos, arqueólogos, historiadores, linguistas e até geólogos, trabalharam com competência, muitas vezes simultaneamente, sobre cada um destes diferentes campos” (GOULD, 1991, p. 4).

autômatos operados hidraulicamente” (FANCHER, 1979, p.9). Entretanto, não se pode afirmar que os cientistas do século XVII fossem, *grosso modo*, mecanicistas.

Além disso, os conceitos de fluxo e fluidez só seriam estabelecidos quando da ascensão de um sistema filosófico que não reconhecia na matéria outra coisa senão a combinação de forças, identificando-a a uma energia primitiva, não redutível à massa ou ao movimento: o *Dinamismo*.

Concordando com Capek (1967, *apud* MELO, 2010), pode-se dizer que as *ideias dinamistas*:

- Ajudaram a estabelecer conceitos como força motriz, fluidez – em última análise, vazão – e noções sobre a existência de um meio material composto por um fluido em movimento (tese próxima à do *pneuma* estoico e que se contrapunha fortemente à ideia de matéria inerte dos filósofos gregos da Antiguidade Clássica);
- Serviram como chave interpretativa às teses científicas surgidas ao longo do século XVII e seguintes;
- Edificaram conceitos que, posteriormente, auxiliaram na compreensão de áreas tão distintas, nos dias de hoje, como economia, eletricidade, magnetismo, calor e combustão.

A.1.3.2. OS FLUIDOS EM SEUS PRIMÓRDIOS

No século XVII, William Harvey (1578-1657) realizou estudos anatomo-fisiológicos sobre o coração humano, tomando por base os esquemas anatômicos propostos por Ibn Nafis [1213-1288] – responsável pelos estudos pioneiros sobre veias e artérias, do qual decorreu a descoberta da pequena circulação pulmonar – e por Andreas Vesalius [1514-1564] notadamente os presentes à obra *De humani corporis fabrica* (1543). Os estudos em questão, somados aos conhecimentos matemáticos de Harvey, levaram-no a entender, de modo original, o funcionamento do sistema circulatório humano e a se posicionar contrariamente à prática da sangria.

Os médicos da Renascença defendiam a tese de que o fígado, o cérebro e o coração formavam uma tríade geradora e/ou reguladora da vida, defendendo a existência de dois tipos de sangue a circularem por sistemas distintos: (1) o primeiro tipo de sangue era *produzido* no fígado, a partir dos alimentos ingeridos, e distribuía, por meio do sistema venoso, nutrientes pelo corpo³²; (2) o segundo tipo, que seria difundido por meio das artérias a todo o corpo, era composto pelo ar, proveniente dos pulmões, e por uma substância espiritual (*pneuma* ou princípio vital) adquirida pela passagem desta pelo ventrículo esquerdo.

Para entender a metodologia de trabalho de Harvey, deve-se saber que ele é tido como o primeiro cientista a perceber o enrijecimento do coração durante seu movimento e a concluir, acertadamente, tratar-se de um músculo. Ele percebeu a presença de válvulas nas veias, e sugeriu que estas desempenhavam importante função, ao evitar a reversão do *fluxo* sanguíneo, fazendo com que o sangue fluísse em um dado sentido. Ao perceber a unidirecionalidade do *fluxo*, Harvey realizou um ensaio no qual obteve a capacidade volumétrica do coração e, por meio da pulsação média, estabeleceu que 250 quilos de sangue fluíam pelo coração em uma hora (três vezes a massa corpórea de um humano de porte médio); concluiu que existia um *fluxo* sanguíneo contínuo em sistema fechado, dando-lhe o nome de circulação primária.

A descoberta de Harvey sobre a circulação primária exerceria forte influência sobre outros cientistas e filósofos, entre os quais se encontram (1) Descartes, principalmente nas teses presentes à obra denominada *Traité de l'homme* (Tratado do homem) (1648), no qual o filósofo francês reafirma que os vasos sanguíneos são como dutos que conduzem nutrientes pelo corpo, apesar de asseverar que o coração funciona como um *forno capaz de aquecer o sangue*, dando-lhe fluxo) e (2) Stephen Hales [1677-1761], um dos pioneiros da fisiologia vegetal experimental, cuja interpretação sobre a concepção mecânica da circulação

32 A prática da sangria visava retirar da pessoa doente o sangue impuro, de modo que ele não pudesse difundir as impurezas para as demais partes do corpo.

harveiana levou-o a explicar, por analogia, o movimento ascendente da água absorvida pelas raízes (sistema radicular) das plantas.

A.1.3.3. O CONCEITO DE FLUIDEZ

Daniel Bernoulli [1700-1782] foi o primeiro cientista a propor um modelo para explicar como uma massa de gás, encerrada em um cilindro, era capaz de suportar a massa de um conjunto composto por um pistão e um peso colocados sobre si. Bernoulli acreditava que ambos (pistão e peso) eram suportados pela colisão das partículas de fluido com a face interior do pistão. Segundo o teórico, em um cilindro que encerra partículas muito pequenas movimentando-se freneticamente, o choque destas contra o pistão é suficiente para sustentá-lo; as partículas formam um fluido que expande sobre si, caso o peso seja diminuído.

Seu relato causou celeuma no meio científico, uma vez que a maioria dos cientistas acreditava que as moléculas dos fluidos aeriformes, ocupando posições espaciais definidas, encontravam-se emersas em um fluido sutil (éter) e se mantinham em repouso, repelindo-se à distância.

A primeira equação que visava explicar o movimento de um fluido, atribuída a Bernoulli, foi, na realidade, obtida pelo matemático suíço Leonhard Euler [1707-1783] e publicada em 1755 nos artigos “*Principes generaux du mouvement des fluides*” e “*Principes generaux de l'etat d'equilibre des fluides*”, que discorriam respectivamente sobre as equações de aceleração e as condições estacionárias de fluxo sob a ação da gravidade. O artigo de Euler intitulado “*Continuation des recherches sur la theorie du mouvement des fluides*” mostra resultados experimentais baseados no Princípio de Conservação de Forças Vivas, de Jean D'Alembert [1717-1783], e na teoria de escoamento de fluidos em tubos, tal como descrita por Bernoulli (ROUSE, 1983).

A.1.3.4. A FLUIDEZ DO CAPITAL

François Quesnay [1694-1774], médico da corte de Luís XV [1710-1774], demonstrou, em sua obra principal, o *Tableau Économique* (Quadro Econômico) (1758), a existência de relação entre os diferentes setores econômicos por meio da análise do fluxo de pagamentos entre eles. A grande virtude desta obra estava ligada ao fato de ser a primeira tentativa de uma representação numérica do mecanismo da vida econômica em regime capitalista.

Em todos os comentários, Quesnay insiste no caráter mecânico e matemático da vida econômica. Esta é a ideia mais cara à fisiocracia, sistema de origem liberal, no qual Quesnay defende a tese de uma economia sem rédeas, governada pela natureza e com liberdade de ação.

Médico com profunda ligação às teses de Descartes, Quesnay tinha como meta geral demonstrar que (1) a economia funcionava tal qual uma máquina ou um ser vivo (para ele, conceitos similares) e (2) qualquer intervenção na economia seria uma ruptura ao princípio social utilitarista, segundo o qual é próprio à natureza obter máxima satisfação com mínimo esforço.

A.1.3.5. O(S) FLUIDO(S) ELÉTRICO(S)

A primeira vez que o conceito de ‘fluido elétrico’ apareceu na literatura científica foi no trigésimo sétimo número do *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1731). Apresentado por Stephen Gray [1696-1736], tal fluido aparecia nos relatos de uma série de experimentos realizados no triênio 1727/29 sobre a ‘virtude elétrica’ (*vis electrica*) dos corpos.

Trabalhando com a eletrização de corpos, Gray foi o primeiro cientista a postular os conceitos de condutividade e ‘fluido elétrico’; acreditava que, por ser um fluido, a eletricidade poderia *escoar* de um material a outro. Contudo, Gray observou que alguns materiais não tinham ‘virtude elétrica’, sendo necessárias substâncias

capazes de funcionar como meio de deslocamento para que a eletricidade *fluísse* de um lugar a outro. Estas substâncias seriam posteriormente denominadas condutoras.

Em consonância com esta ideia e a partir de ensaios realizados com uma folha de ouro eletrizada, Charles F. C. Du Fay [1698-1739] levantou a hipótese da existência de duas espécies de '*vis eletrica*', às quais denominou por "vítrea" e "resinosa", cada qual com suas características. Entretanto, foi John T. Desaguliers [1683-1744] que empregou pela primeira vez (1739) o termo condutor – para o corpo que conduzisse o '*fluido*' – e não-condutor ou insulador (do latim "*insula*", ilha), para aquele que isolava este '*fluido*' na região em que se dava o atrito.

Benjamin Franklin [1706-1790], por sua vez, realizou de 1747 a 1749 uma série de ensaios experimentais em que retomou a ideia de '*fluido elétrico*'. Afirmando que um corpo se eletrizava por falta ou excesso de '*fluido*', *o qual era único*, Franklin propôs que o excesso de '*fluido*', que caracterizava a "virtude vítrea", conferia carga positiva (+) ao corpo, ao passo que a falta do mesmo caracterizava a "virtude resinosa" e conferia ao corpo carga negativa (-).

O abade Jean-Antoine Nollet [1700-1770], na década de 1740, passou a atribuir a origem dos fenômenos elétricos ao *fluxo*, em sentido contrário, de duas correntes de *fluidos* muito sutis e inflamáveis; também supôs que tais *fluidos* estivessem presentes, sem exceção, em todas as circunstâncias e corpos. Em consonância a Nollet, o matemático Leonhard Euler, em carta à sobrinha do Rei Frederico II da Prússia, datada de 1761, utilizou o termo *éter* para designar a matéria responsável pelos fenômenos elétricos, acreditando tratar-se, também, de um "fluido mais sutil e elástico que o ar" (CINDRA & TEIXEIRA, 2005, p.387).

Neste período, construiu-se um dispositivo adequado para 'armazenar' eletricidade e que os levou a concluir que a carga total, em qualquer sistema isolado, é invariável: a garrafa de Leyden. Discutindo o funcionamento deste equipamento, Franklin explicou o fenômeno com base em sua tese do '*fluido*' único. Apesar de sua explicação não ter logrado êxito, seu grande mérito foi introduzir o conceito de *conservação* ao '*fluido elétrico*' (CINDRA & TEIXEIRA, 2005, p.388).

Ronan (1987, p.115) afirma que, por volta de 1770, havia duas teses que propunham explicar a essência da vida:

- Na Tese da Eletricidade Animal, o fluido neuroelétrico era combinado no cérebro e armazenado nos tecidos, circulando pelos nervos em um sistema fechado, provocando diferentes contrações musculares.
- Na Tese da Argumentação Mecânica, as contrações musculares – de natureza puramente mecânica, independem da vida e da sensibilidade – eram provocadas por forças internas e específicas da fibra muscular, agindo em domínio distante da consciência.

Como se vê, a eletricidade passava a ocupar, por volta do fim do séc. XVIII, uma posição de destaque na ciência, a ponto de propor uma tese capaz de rivalizar com os argumentos mecânicos, os quais eram muito bem estabelecidos desde os experimentos conduzidos a termo por Isaac Newton [1642-1727].

A.1.3.6. O FLUIDO MAGNÉTICO

O cientista William Gilbert [1544-1603], pioneiro no estudo de propriedades elétricas e magnéticas dos materiais, foi o primeiro a propor que eletricidade e magnetismo seriam fenômenos distintos. Em 1600, na obra intitulada *De Magnete*, discorre sobre o magnetismo, mas faz também uma breve digressão sobre a eletricidade. Ele acreditava que as diferentes da atração magnética, e fez um grande esforço para enfatizar esta distinção; argumentava que a eletricidade era capaz de atrair qualquer tipo de objeto, não importando seu estado físico. Para Gilbert (1958, p.78), os corpos elétricos “não apenas atraem para si palhas e cascas de sementes, mas todos os metais, madeiras, pedras, terras, bem como, a água e o óleo; resumindo, qualquer coisa que ative nossos sentidos”.

No entanto, os capitães das embarcações que singravam os mares percebiam que, durante as tempestades elétricas, ocorriam perturbações nas agulhas das bússolas, sem saber como explicar tais fenômenos. Em 1752, Franklin

percebeu por meio de experimentos que havia algum tipo de relação entre os fenômenos, fato que também chamou a atenção de Gian D. Romagnosi [1761-1835], que descobriu que um fio conectado a uma pilha provocava o desvio da agulha de uma bússola próxima – fato confirmado em 1820 por Hans C. Oersted [1777-1851] em um experimento similar.

Franz A. Mesmer [1734-1815] – influenciado por Paracelsus, Newton e por experimentos que remontavam ao Egito Antigo, nos quais as propriedades magnéticas eram utilizadas nos rituais religiosos de cura – sugeriu, em sua tese de doutorado, *Dissertatio physico-medica de planetarum influxu*, a ideia da existência de um fluido universal, que envolveria todos os corpos sutis desprovidos de peso, não tangíveis, nem visíveis pelos sentidos humanos.

Em cada reino (mineral, vegetal e animal) haveria uma forma diversa e mutável deste fluido universal: no reino animal, o fluido era chamado de magnético animal, mas nos seres humanos, recebia o nome de fluido magnético espiritual, estando presente no corpo espiritual (perispírito). Com isso, Mesmer passou a propor em sua tese que: (1) haveria uma reciprocidade estabelecida entre duas criaturas vivas por meio do fluido magnético; (2) o magnetismo animal, que emanava dos indivíduos, poderia ser ampliado; e (3) o magnetismo animal poderia ser utilizado de forma terapêutica em indivíduos doentes (o que efetivamente viria a ocorrer a partir de 1773), uma vez que a doença resultava da frequência irregular dos fluidos e sua cura dependia da regularização do fluido, o que podia ser obtido por meio de uma pessoa hábil em controlar tal fluido, fosse pelo uso das mãos ou de objetos previamente magnetizados.

Com a publicação da *Carta ao Povo de Frankfurt*, Mesmer deu início a uma etapa significativa de sua pesquisa, na qual explicava a natureza do magnetismo animal; asseverou que o processo de cura poderia ser desencadeado não apenas por um minério, mas também por outras pessoas, que contribuiriam efetivamente no reequilíbrio corporal dos doentes por meio da transferência de *fluido animal*.

A.1.3.7. FLOGISTO: O FLUIDO QUÍMICO

Define-se como flogisto (ou flogístico) o *fluido* imaginado pelos químicos dos séculos XVII e XVIII, de forma a explicar a combustão, uma vez que, naquela época, não se conhecia o processo de óxido-redução. Pode-se dizer que flogisto agia como um grande não só à combustão, mas também à respiração e à calcinação (...) tornando mais compreensível [todos os tipos de] reações” (RONAN, 1987, p.122).

Para Georg E. Stahl [1659-1734], o flogisto era um *fluido* que saía do corpo quando este se inflamava. A teoria do flogisto (do grego *phlogiston*, que significa consumido pelo fogo) surgiu pela primeira vez pelas mãos de Stahl, na obra intitulada *Experimenta, observationes, animadvertiones Chymical et Physical*, de 1697. Além da forte influência de Johann Joachim Becher [1635-1682], ela derivava ainda das concepções de alquimistas árabes da antiguidade, como Abu Musa Jabir Ibn Hayyan [c.721-c.815], ou simplesmente Geber, possível autor de um amplo conjunto de textos. Para estes alquimistas, o fogo, que constituía a base do processo de combustão, relacionava-se a dois princípios, enxofre e mercúrio, os quais resultavam da combinação dos quatro princípios elementares propostos por Empédocles.

Visando provar suas ideias, os alquimistas árabes trabalharam de maneira sistemática, descrevendo operações de forma cuidadosa e precisa, tanto no que tange ao procedimento quanto à quantidade de substância a ser utilizada. Sua metodologia era tão precisa e meticulosa, que a estes se atribui o pioneirismo em observar que a “cal” (um óxido metálico) formada pela oxidação de um metal apresentava massa maior do que a deste metal antes de ser queimado.

A ideia de que o *fogo* constituía um princípio fundamental da natureza e que era responsável pela combustão dos corpos foi reforçada pelo químico alemão Becher em sua obra *Physica Subterranea*, de 1667. Neste texto, Becher afirmava que os sólidos poderiam ser divididos em três classes ou tipos de “terra”: *pinguis* (ou

combustível), *mercuralis e lapida* (ou vitrificável), sendo a combustão devida ao primeiro tipo de “terra”, uma vez que este é o tipo liberado por ocasião da calcinação.

Stahl, por sua vez, propôs uma teoria ainda mais abrangente. Esta teoria não só explicava a formação da “cal”, como defendia que a extração de um metal de sua “*cal metálica*” poderia ser obtida por meio de sua queima com carvão de madeira, uma vez que a “cal” retirava flogístico do carvão, transformando-se novamente em metal. Entretanto, uma dúvida pairava no ar: como se explicava o fato de os metais aumentarem sua massa quando calcinados, ou seja, quando perdiam flogisto?

Stahl sugeriu que o flogisto era um digno representante da propriedade da leveza; de tão sutil, Stahl passou a admitir que o flogisto possuía massa com valor negativo. Apesar de suas contradições internas, a teoria do flogisto dominou o pensamento científico por todo o sec. XVIII. Tanto assim, que os *fluidos aeriformes* (gases) descobertos durante aquele século tinham seu nome ligado a este *fluido*: o nitrogênio (N_2), descoberto por Daniel Rutherford [1749-1819], em 1772, foi batizado como *ar flogisticado*, ao passo que o oxigênio (O_2), descoberto independentemente pelo farmacêutico sueco Karl W. Scheele [1742-1786], em 1772, e pelo químico inglês Joseph Priestley [1733-1804], em 1774, foi a princípio chamado de *ar deflogisticado*.

A influência da teoria do flogisto defendida por Stahl foi tão forte, que fez com que o químico inglês Henry Cavendish [1731-1810], ao repetir o experimento de Priestley – o qual consistia na explosão de uma mistura de ar inflamável (H_2) e ar deflogisticado (O_2) por meio de uma centelha elétrica com a formação de ‘orvalho’ – não percebesse a importância de seu achado, uma vez que este contrariava a teoria citada. Ele foi o primeiro a perceber que o ‘orvalho’ era constituído por água pura.

Por acreditar na existência do flogisto e estar filiado a uma concepção de natureza proveniente da cultura helênica clássica, Cavendish não admitiu a ideia de que a água fosse uma substância composta formada pela união de dois *fluidos*

aeriformes. Ao contrário, sustentava que tais *fluidos* eram, na realidade, o princípio elementar água com e sem flogisto, tal como afirmou em 1784.

Os questionamentos propostos pelo cientista Antoine Laurent Lavoisier [1743-1794] ao estudar o fenômeno da combustão causaram grande impacto sobre a teoria do flogisto, decretando o início da crise que levou a uma mudança paradigmática. Nesses ensaios, Lavoisier formulou a hipótese de que as substâncias ganham peso ao serem queimadas, não por perderem flogisto, mas sim por absorvem *ar deflogisticado*, o qual chamou de oxigênio.

Naquela ocasião, ele atribuiu a causa do calor a um *fluido* imponderável, ao qual denominou “matéria de fogo”, que, dependendo de sua quantidade, dava origem a um dos três estados da matéria, e que, posteriormente, foi denominado calórico. Importante salientar que tal nomenclatura aparece pela primeira vez na obra intitulada *Méthode de Nomenclature Chimique* (1787), assinada por Antoine L. Lavoisier, Louis B. Guyton de Morveau [1737-1816], Claude L. Berthollet [1748-1822] e Antoine F. Fourcroy [1755-1809].

A.1.3.8. CALÓRICO: UM FLUIDO ESPECIAL

Como visto na seção anterior, a invenção do termômetro constituiu importante passo ao surgimento da ciência do calor. Galileu, um dos prováveis inventores, argumentava que a sensação de “calor” devia-se ao movimento rápido de partículas específicas. Descartes, por seu turno, acreditava que existiam três tipos de partículas, distintas por sua extensão, como afirma Quadros (2004, p.38): “as partículas de fogo, menores, algumas infinitamente pequenas; boules, intermediárias e as partículas de matéria, constituintes dos objetos”.

O modelo de Descartes propunha, a um só tempo, explicar a natureza da luz e do calor. Por este, as oscilações periódicas (ou ondas) de pressão, transmitidas pelo éter (*quintessência*), eram percebidas por nossos sentidos, tal qual a luz. A expansão dos objetos seria causada pela pressão das partículas menores (as de fogo e as *boules*), as quais, originalmente, encontravam-se comprimidas entre as

partículas de matéria. A vibração destas, causada pela vibração das partículas menores, seria a responsável pela sensação de calor.

A influência cartesiana sobre a ciência não só transformou a forma de encarar a natureza da luz e do fogo, como alicerçou a ideia de que as partículas de fogo e as *boules* eram as constituintes de um *fluido* sutil e imponderável, denominado calórico. Em seu *Traité Élémentaire de Chimie* (1789), Lavoisier advogou a favor da existência de tal *fluido* sutil, acrescentando-lhe características como *elástico* e *indestrutível*. Lavoisier, na realidade, estava de acordo com as concepções cartesianas e newtonianas do fisiologista escocês Joseph Black [1728-1799], as quais preconizavam a existência de um *fluido* que penetrava em *todo o espaço* e com fluxo constante entre as substâncias.

Em resumo, pode-se dizer que o *fluido* calórico pode ser caracterizado por: (1) não ser *destrutível*, não havendo ainda possibilidade de ser criado; (2) ser *elástico* e auto-repulsivo; (3) se apresentar sob forma sensível ou latente; (4) ser *imponderável*, ou seja, não ter peso apreciável, e (5) ser constituído por partículas muito pequenas atraídas pelas partículas de matéria comum (CINDRA & TEIXEIRA, 2005, p.389).

Apesar de não comungarem dos mesmos conceitos, tanto os defensores do flogisto quanto os do calórico utilizavam a ideia de perda ou ganho de uma "*partícula de fogo*" para explicar determinados fenômenos correspondentes aos *fluidos* aeriformes. Para os defensores do *calórico*, adição e subtração deste *fluido* explicavam, respectivamente, a expansão e a contração térmicas, ou seja, o aumento e a diminuição da temperatura dos corpos.

Entretanto, uma observação experimental sobre a variação volumétrica da água em função da temperatura, realizada em 1776 pelo físico francês Jean A. Deluc [1727-1817], pôs em cheque o conceito de calórico, uma vez que não se enquadrava àquela explicação. Deluc observou que, a 4º C, a densidade absoluta da água era máxima, e que, ao se diminuir a temperatura do sistema para valores menores que

este, a densidade da água diminuía como consequência do aumento de seu volume, o que contrariava a expectativa dos cientistas defensores da existência do *calórico*.

Deve-se atentar para o fato de que outras teses anteriores à de Lavoisier tentaram explicar os fenômenos térmicos. O filósofo inglês Francis Bacon [1561-1626], por exemplo, havia sugerido na conclusão do item intitulado *Vindemiato Prima de Forma Calidi* de seu *Novum Organum* (1620, p. 88), que

o calor é um movimento expansivo, reprimido e que atua sobre as partículas menores. A expansão pode ser definida pela natureza de expandir-se em todas as direções, mas que (...) se inclina um pouco mais para o alto. E o esforço sobre as partículas se define dizendo: que não se trata de algo lento, mas apressado e impetuoso.

Esta ideia de movimento livre (e vibratório) de partículas de um corpo, que visava explicar a origem e os processos inerentes ao fogo (tal como oscilações de uma chama), tiveram forte influência sobre a formação intelectual de físicos como Robert Boyle [1627-1691] e Robert Hooke [1635-1703], que incorporaram a ideia de *fluidez* e causalidade, e Isaac Newton, que considerava o calor como sendo uma oscilação da quintessência que partia dos corpos celestes e adentrava aos corpos, e sobre a formação do filósofo John Locke [1632-1704], que advogou em favor de um liberalismo estendido a campos localizados para além da Filosofia Natural, como era conhecida a ciência física de então.

A ideia de movimento, defendida por Bacon, também é constante nos defensores da existência de um *fluido* calórico. Segundo estes, a teoria do calórico provia uma ideia conceitual para explicar o comportamento dos fluidos aeriformes (gases e vapor) em termos da distinção entre os estado ‘livre’ e ‘latente’ do calor.

O *calor livre* podia ser sentido – daí o nome calor sensível – e medido por meio de termômetros; o *calor latente*, entretanto, por estar intimamente ligado às interações entre as partículas, não era passível de mensuração. A teoria do calórico também tentava explicar o aumento da temperatura de um *fluido* quando de sua compressão. Segundo esta teoria, quando o *fluido* era comprimido, parte de seu *calor latente* era aparentemente transformado em *calor livre*.

A.1.3.9. OS FLUIDOS INTANGÍVEIS PERDEM PRESTÍGIO

Nos séculos XVIII e XIX, surgiu uma série de descobertas científico-tecnológicas, cujas raízes remontam à Antiguidade clássica ocidental. Se não, como entender:

1. Os melhoramentos e considerações teóricas referentes às máquinas a vapor propostas por James Watt (1769), sem dar a devida importância aos trabalhos de Thomas Newcomen (1712) ou à máquina pioneira (*Marmita*) de Denis Papin (1680)?
2. O conhecimento atual das pessoas a respeito de conceitos extremamente abstratos como calor e energia, bem como o processo que levou estes conceitos científicos a fazerem parte do conhecimento cotidiano (BIZZO, 1999)?

Sabe-se que o termo *energia* não é algo fácil de definir. Em geral, diz-se que energia é fonte de trabalho, uma vez que permite a realização de tarefas, como elevar uma quantidade de matéria a uma dada altura ou deslocá-la a certa velocidade. Com isso, associamos a ideia de calor a trabalho. Máquinas térmicas, como os motores, convertem, a toda hora, calor em trabalho útil. Só no século XIX, com o aparecimento da *teoria mecânica do calor* é que os conceitos de temperatura e calor (entendido como forma de energia) passaram a ser tratados como grandezas *escalares e diferentes*.

Durante boa parte dos séculos XVII e XVIII, tanto o *calórico* quanto o *flogisto* (substâncias imponderáveis) constituíam *fluidos* dotados de dinamicidade, cujo movimento – regido pelas leis da mecânica – auxiliava na compreensão das transformações químicas e físicas. Já a temperatura era concebida tão somente como uma *escala relativa de medidas* e, em geral, confundida conceitualmente com o calor.

A análise do plano lógico-epistemológico da “*scienza nuova*” mostra que a ciência evoluiu, desde o medievo, tomando por base conceitos animistas,

substancialistas, dinamicistas e mecanicistas. A verdadeira perda de prestígio dos *fluidos intangíveis*, associados a ideias mecanicistas, decorreu do surgimento das teorias de campo e do desenvolvimento de ferramentas matemáticas importantes (como noções de limite, técnicas de derivação e integração e sistemas de coordenadas cartesianas, polares e cilíndricas) ao longo do século XIX.

Contemporâneo de Joseph Black, que havia tornado calor e temperatura grandezas diversas, Benjamin Thompson, conde de Rumford, logo se convenceu de que o calor não era uma substância imponderável que impregnava os espaços interatômicos e que poderia fluir espontaneamente de um corpo mais quente a outro mais frio, até que se estabelecesse o equilíbrio térmico. Visando comprovar sua teoria, o conde Rumford analisou uma tarefa costumeira aos fabricantes de armas: a perfuração de um canhão.

Ele sabia que este tipo de trabalho exigia a utilização de uma broca capaz de escavar um cilindro metálico maciço, o que proporcionava um grande aquecimento ao cilindro e à broca. Para evitar a fusão do material do canhão, água era utilizada continuamente com o propósito de resfriá-lo.

Segundo a teoria do calórico, o canhão se aquecia, pois o material despedaçado pela broca expelia *fluido calórico*. O conde resolveu então utilizar uma broca cega, evitando assim despedaçar a parte interna do canhão. Com isso, comprovou que o calor produzido era maior do que na situação anterior. Medindo a quantidade de calor liberada em algumas horas de utilização da broca cega pelo aquecimento de água, Rumford mostrou que se o canhão contivesse tal quantidade de calórico, certamente se fundiria; o que não ocorreu (QUADROS, 2004, p.59).

Não se sabe, ao certo, se o conde Rumford teve contato com os textos de John Locke. Entretanto, ao que tudo indica, o conde de Rumford se alinhava às ideias daquele filósofo sobre as noções de frio e calor. Sobre estes assuntos, afirmava Locke (1999, livro II, 8, § 21):

- “A sensação de calor [e frio] nada mais é do que o aumento [ou diminuição] do movimento das diminutas partículas de nossos corpos, causadas pelos corpúsculos de qualquer outro corpo”;
- “O calor é uma agitação muito viva das partes invisíveis de um objeto, a qual produz nas pessoas a sensação (...) que o objeto é quente”.

Sir Humphry Davy [1778-1829], discípulo de Benjamin Thompson, também realizou experimentos envolvendo a fricção entre objetos. Utilizando blocos de gelo em fusão, friccionou-os e verificou que o atrito não alterava a capacidade calorífica dos corpos. Entretanto, o atrito causava o aumento da temperatura do material, provocando sua fusão, fato não explicado pela teoria do calórico.

Thompson concluiu, corretamente, que o calor era devido ao movimento das partículas dos corpos e podia ser gerado por meio de trabalho mecânico realizado por uma máquina, ou seja, havia equivalência entre calor e trabalho, tal como seria comprovado, em 1841, por James P. Joule. Esse fato comprovava o declínio dos *fluidos* intangíveis, das ideias *dinamistas* e *mecanicistas*; os *fluidos* tangíveis (como o vapor d'água, por exemplo) começavam a ganhar importância, bem como a teoria cinética dos gases e as teorias de campo. Os experimentos citados – nesta seção e na anterior – demonstram o valor dado à teoria “*substancialista*” do calor. Também revelam que as descobertas decorrentes destes experimentos foram decisivas no estabelecimento de bases sólidas ao avanço tecnológico, que conduziram à Revolução Industrial, principalmente no Reino Unido.

ANEXO (A.2.)



Oficina Pedagógica - 2008

LANÇADOR TERMODINÂMICO DE PROJÉTEIS

Autores

Prof. Marcelo Eduardo Fonseca Teixeira
Prof. Dr. Eugenio Maria França Ramos
Prof. Guilherme Blasi Cruz

A.2.1. INTRODUÇÃO

O propósito desta atividade é a construção de um lançador de projéteis à base de combustível líquido para verificarmos e aplicarmos conceitos de termodinâmicos e termoquímicos aprendidos em classe no ano corrente.

Tal oficina irá permitir estabelecer vínculos entre disciplinas que, apesar de serem ministradas de forma separadas na grade curricular, apresentam tópicos comuns e inter-relacionados, tais como ocorrem nas manifestações destes fenômenos na natureza.

Leia atentamente as instruções e acompanhe o roteiro desta oficina procurando ter um olhar crítico ao fenômeno que você vai estudar, além de lúdica, esta atividade tem muito a colaborar com o aprofundamento de seus conhecimentos.

A.2.2. RESUMO TEÓRICO PRELIMINAR

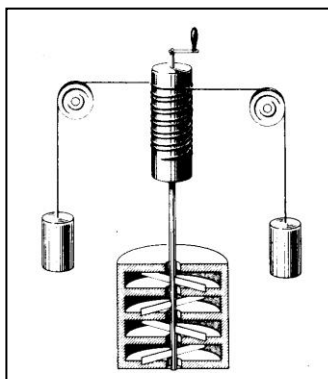
James P. Joule estabeleceu uma relação entre energia e trabalho mecânico em uma experiência considerada uma das mais brilhantes de todos os tempos.

A energia potencial armazenada em corpos que caem, permitem girar pás dentro de um calorímetro que contém água.

É então transformada em caso, cinética e então térmica. trabalho exercido pela queda dos pesos, é convertida final do processo na elevação contida dentro do calorímetro.

Se o trabalho pode ser questão é se o calor pode ser

O calor pode ser obtido típica de combustão, e utilizar projétil de plástico é o que



É desta forma que o gravidade, ao provocar a em energia, resultando ao da temperatura da água

convertido em calor, a convertido em trabalho? de uma reação química está energia para lançar um pretendemos fazer.

Ao lançarmos o projétil na vertical, o campo gravitacional realizará um trabalho sobre o tubo plástico fazendo-o parar. Temos então o experimento de Joule ocorrendo em sentido inverso. Inicialmente a reação química nos dá a energia térmica (de onde ela provém?), que aqui chamaremos de entalpia, e ao fim do disparo, no momento em que o tubo atinge sua altura máxima a energia está em sua modalidade potencial gravitacional.

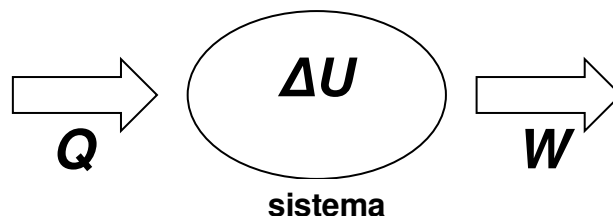
A *entalpia* **H** é definida por

$$H = U + PV$$

(soma da energia interna do sistema (**U**) e o produto pressão pelo seu volume)

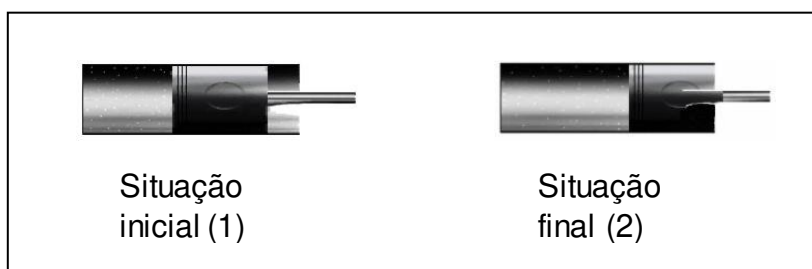
A *primeira Lei da Termodinâmica* é definida por:

$$Q = \Delta U + W$$



onde **Q** representa o calor fornecido ou retirado do sistema, **W** o trabalho recebido ou realizado e **ΔU** a variação da energia interna que o sistema sofre.

Considere agora um sistema constituído por um cilindro e um êmbolo em duas situações distintas, a primeira, quando em um volume inicial pequeno, com certa quantidade de gás dentro, e uma segunda, após receber calor de determinada fonte de calor. As situações estão ilustradas a seguir.



(no nosso caso, o tubinho plástico será o êmbolo e o êmbolo e sua tampa juntos constituirão o sistema).

Podemos então, a partir das definições de Entalpia e Primeira Lei da Termodinâmica equacionar:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= U_1 + P_1 V_1 \\
 H_2 &= U_2 + P_2 V_2 \\
 \Delta H &= H_2 - H_1 = U_2 - U_1 + P_2 V_2 - P_1 V_1 \\
 &\text{e à pressão constante teremos} \\
 \Delta H &= \Delta U + P \Delta V \\
 &\text{o que finalmente nos permite} \\
 \mathbf{Q} &= \mathbf{\Delta H^*}
 \end{aligned}$$

Veja que desta forma poderemos, a partir do cálculo da variação de entalpia para a combustão de um combustível do qual conhecemos os valores de energias a ele associados, calcular o calor fornecido ao cilindro e que por sua vez será responsável pela realização de um trabalho mecânico.

Nossa meta final é saber se toda a energia provinda do combustível será ou não convertida integralmente em trabalho ou haverá alguma perda no sistema. Em suma o que queremos obter é o rendimento real do lançador de projéteis.

* Russel, John B – Química Geral – McGraw Hill

A.2.3. MONTAGEM DO LANÇADOR

3.1. Material

Cada kit para montagem do lançador compreende:

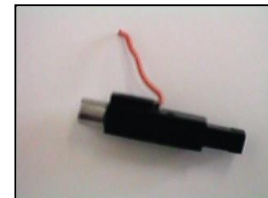
- 1 ignitor piezelétrico
- 1 base de madeira (13 x 1,5 x 6 cm)
- 1 suporte em triângulo de madeira
- 1 par de fios de 15 cm cada.
- 1 tubo plástico de filme 35 mm

OBS: Ainda deve haver disponível para uso coletivo.

- Cola quente com respectiva pistola
- Fita Crepe
- Tesoura
- Trena
- Álcool (92,8%) em um pulverizador
- Alicates e punção
- Furadeira

3.2. Procedimento de montagem

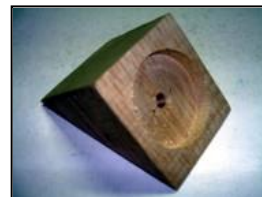
1 . Separe o ignitor piezelétrico (cuidado para não ferir o fio que a ele está conectado).



2 . Separe o tubo de filme de sua tampa.



3. Separe o suporte lançador que receberá a tampa do filme. Existem duas marcas pequenas ao lado de um furo central. Estas marcas são referência para os furos que deverão ser feitos no item 5. (Nestes furos pequenos você passará os fios)



4. Separe a base do lançador, um paralelepípedo de madeira com 13 x 1,5 x 6 cm. Você notará um risco nela que servirá como referência ao encaixe do suporte lançador.



5. Posicione o suporte lançador rente à linha na base e em sua cavidade posicione a tampa do tubo de filme. Nesta posição fixe o suporte lançador com cola quente junto a base. Se houver parafusos disponíveis, utilize o de maior comprimento (2 cm) para fixar o suporte à base e o menor (1,5 cm) para fixar a tampa ao suporte.



6. Trabalhando em dupla, enquanto um segura o suporte lançador junto à base, o outro com uma furadeira faz dois furos mais ou menos nas marcas de referência existentes nessa depressão. (obs.: os furos devem estar alinhados na horizontal e ter de 1,0 a 1,5 cm de distância um do outro.)



7. Ao fazer os furos através da tampa de filme, estes devem ter ficados alinhados com os furos no suporte lançador. Verifique isto, e se estiverem alinhados, prenda a tampa do filme junto ao suporte lançador com um pequeno parafuso ou com cola quente. (dica: o parafuso fixa melhor, embora seja mais duro apertá-lo)

8. Passe os dois fios pelos furos existentes na tampa e suporte lançador, fazendo-os vazar na parte de baixo da base.



9. Os fios no suporte lançador devem ficar aproximadamente 1,5 cm para fora e ter 0,5 cm de sua extremidade desencapada. Vaze as outras extremidades dos fios pela base, correndo através das canaletas existentes na parte de baixo da base. Deixe uma sobra para trabalho com o ignitor e não cole nenhum pedaço de fio na cavidade redonda existente na base. Deixe este arranjo de lado por enquanto. Vamos trabalhar o ignitor.

10. Separe o ignitor. Note que o botão de disparo é preto, tem uma base metálica e tem um fio saindo de sua região central. Você deverá conectar os fios que você arrumou no item (9) à base metálica e ao fio do ignitor.

11. Dos fios que você preparou na base, selecione um deles e desencape cerca de 3 cm. Para dar forma de espiral á extremidade do fio, enrole esta extremidade na ponta metálica do ignitor. (mas não cole ainda) No outro fio, desencape cerca de 1 cm por enquanto.



12. Voltando à parte superior da base, você notará ainda dois furos, um maior, por onde passará a parte metálica do ignitor quando ele for encaixado e um furo menor, por onde será vazado o fio que sai do ignitor. Passe primeiramente o fio do ignitor pelo buraco menor e depois encaixe o ignitor com o disparador voltado para fora.



13. No verso da base de madeira, encaixe o fio enrolado anteriormente em forma de espiral e depois o fixe com cola quente, cuidando para que o fio esteja encostado na parte metálica do ignitor (pelo menos, muito próximo).



Com o outro fio que sai pelo buraco menor, ligue-o ao segundo fio que provém do suporte lançador. Pingue cola quente nas conexões e cole os fios junto à base mantendo-os o mais distante possível.

14. Aproxime os fios que saem no suporte lançador até que você perceba que ao apertar o ignitor, uma centelha atravesse o ar indo de um fio ao outro. (sugestão: primeiro aproxime bem e então afaste um pouco, fazendo um teste após o outro até ter uma centelha de uns 4 ou 5 mm. O seu lançador está pronto.



15. Pulverize um pouco de álcool dentro do tubo de filme e então o feche contra sua tampa. É só acionar o ignitor e seu canhão deve funcionar. Sugestão: não coloque muito álcool, pois se corre o risco de incendiar o material plástico de que é feito o tubo, danificando assim seu canhão.



A.2.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E DE CÁLCULOS

Para medirmos o rendimento de uma determinada máquina, devemos comparar o trabalho realizado por ela com a quantidade de energia que ela recebeu.

O rendimento pode ser dado simplesmente por:

$$\eta = \frac{W}{Q_c}$$

onde W corresponde ao trabalho e Q_c ao calor fornecido através da reação de combustão. Nessa atividade, o combustível em questão é o álcool etílico.

a) Escreva a fórmula estrutural e molecular do álcool etílico, lembrando que o nome oficial do mesmo é etanol.

Conforme o que foi estudado durante o curso de termoquímica (apostila 6), reação de combustão completa de um combustível pode ser equacionada através da adição de gás oxigênio ao mesmo, com a formação de gás carbônico e vapor de água.

b) Escreva essa equação química balanceada.

Para se determinar o calor fornecido pela queima desse combustível, é necessário o cálculo da variação de entalpia, (ΔH). Consultando uma tabela de entalpias de formação, obtêm-se as seguintes informações:

Substância	Entalpia de formação (kJ/mol)
$C_2H_5OH_{(l)}$	-277,6
$CO_2_{(g)}$	-393,5
$H_2O_{(g)}$	-283,8

c) A partir dos dados da tabela acima, calcule o valor do ΔH da reação química.

Esse valor de ΔH calculado diz respeito a uma reação *hipotética* que consome 1 mol do combustível e 3 mols de gás oxigênio. Nas condições experimentais, isso não é verdade. Então vamos calcular essas quantidades.

d) Uma pulverizada de álcool equivale em média a 0,15 mL ($1,5 \times 10^{-4}$ L). Como a densidade do álcool pode ser considerada igual a 0,80 g/mL, a massa do mesmo é de:

e) Como a massa molar equivale a 46 g/mol, a quantidade em mol do combustível é de:

Quantidade de oxigênio nas condições experimentais

Com uma régua meça o diâmetro e a altura do tubo plástico. Como o raio da circunferência é metade do seu diâmetro, temos: $R =$ $h =$

A área de uma circunferência é calculada por :

$$A = \pi \cdot R^2 =$$

O volume de um cilindro é calculado por :

$$V = A \cdot h =$$

Lembrando que $1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$, o volume do tubo plástico (em L) é :

Como o volume molar dos gases, nas condições do experimento = 24,5 L/mol, a quantidade em mol de gás é:

f) Como o gás oxigênio corresponde a somente 20 % do ar, a quantidade em mol do gás oxigênio dentro do tubo plástico é:

Calor cedido pela queima do combustível

Na parte teórica, calculamos o ΔH para uma reação *hipotética* que consome 1 mol do combustível e 3 mols de gás oxigênio. Com os cálculos das quantidades *reais* das substâncias, verificamos que os mesmos não estão em quantidades estequiométricas (proporcionais). O reagente que está, proporcionalmente, em

menor quantidade é chamado de limitante. Nesse caso, o reagente limitante é o

Para se calcular o calor cedido pela queima do combustível, basta fazer uma “regrinha de três” entre os valores hipotéticos e reais do ΔH e do reagente limitante.

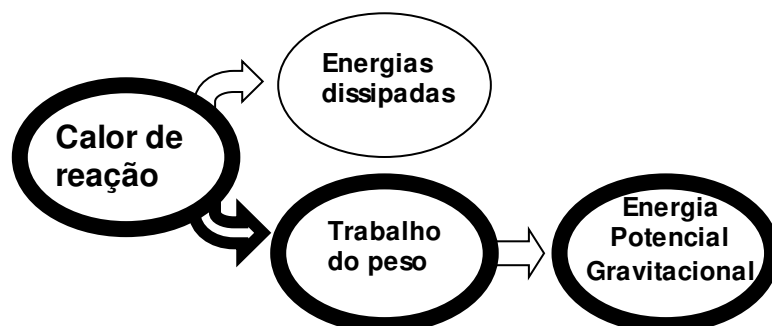
f) Portanto o calor cedido pela reação química será (Q_c) igual a:

No processo físico, descrito pela primeira Lei da termodinâmica, o calor cedido pela reação química é utilizado em parte para aumentar a energia interna do sistema e em parte na realização de um trabalho.

Se lançarmos o nosso projétil (tubo) na vertical, a pressão atua até o tubo se destacar de sua tampa. A partir daí as forças que atuam sobre nosso projétil são o peso e a resistência do ar. A resistência do ar não é uma força conservativa, de forma que a energia que ela dissipa não pode ser transformada em movimento, quando o projétil retorna em queda. Resta-nos então, somente o peso.

O teorema da energia mecânica garante que um sistema conservativo a energia mecânica é a mesma em qualquer ponto do sistema. Assim quando dispparamos o projétil, ele irá atingir uma altura máxima, e esta altura em relação ao solo tem uma energia potencial gravitacional. O trabalho da força peso equivale numericamente ao valor da energia potencial neste ponto mais alto.

De forma esquematizada, podemos ilustrar o processo da seguinte forma:



Para determinar efetivamente o trabalho útil (do peso) vamos medir até que altura conseguimos lançar o tubo. Para isto será necessário que pelo menos três colegas façam a tarefa juntos.

O primeiro irá lançar, enquanto outro registra contra uma parede de fundo, o ponto mais alto atingido pelo projétil (tubo). O terceiro, então, com uma trena, mede a altura alcançada. (Há a alternativa de se marcar previamente a parede para facilitar a coleta da medida de altura máxima)

Faça cinco medidas, preencha a tabela e na última linha faça a média destas. A seguir, responda as perguntas. Considere a massa do tubo igual a 7g e a aceleração gravitacional local como 10 m/s²

	Altura máxima atingida (m)	W (J) Realizado (módulo)	Q _c (J) Calor Fornecido	Energia dissipada (J)
1				
2				
3				
4				
5				
média				

g) Onde foi parar a energia não utilizada que fora fornecida pela reação (de pelo menos três exemplos).

h) Em função das médias obtidas, calcule o rendimento deste lançador. (vide pág. 10)

i) Se este lançador pudesse aproveitar 100% da energia cedida pela reação, e convertê-la em energia potencial gravitacional, a que altura o tubo chegaria?

j) Pesquise o rendimento de outras máquinas térmicas, tais como carro, avião, foguete, ser humano, etc. e compare os rendimentos médios entre elas e veja quão surpreendente é o resultado! (para o lar!)