

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

SECÇÃO AUTÓNOMA DE HISTÓRIA E FILOSOFIA DAS CIÊNCIAS



**ENERGIA E MEDICINA EM ROBERT MAYER**

**Maria Teresa Ribeiro Rocha Homem de Melo**

MESTRADO EM HISTÓRIA E FILOSOFIA DAS CIÊNCIAS

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

SECÇÃO AUTÓNOMA DE HISTÓRIA E FILOSOFIA DAS CIÊNCIAS



**ENERGIA E MEDICINA EM ROBERT MAYER**

**Maria Teresa Ribeiro Rocha Homem de Melo**

DISSERTAÇÃO ORIENTADA PELO  
PROF. DOUTOR RICARDO LOPES COELHO

2010

# Energia e Medicina em Robert Mayer

## Índice

Agradecimentos .....	3
Resumo .....	4
Abstract .....	5
Introdução .....	6
1. Princípio da conservação da energia.....	9
1.2. Domínios inorgânico e orgânico .....	9
1.2.1. O domínio inorgânico .....	10
1.2.1.1. A transformabilidade das forças ou energia.....	11
1.2.1.2. A transformabilidade do calor em efeito mecânico .....	17
1.2.2. O domínio orgânico .....	19
1.2.2.1. As analogias de Mayer.....	20
1.2.2.1.1. Analogias físico-químicas e biológicas .....	22
2. Teses de historiadores da história da ciência .....	27
3. O conceito de energia.....	35
3.1. Breve história.....	36
3.2. Energia potencial e energia cinética .....	38
3.3. Definições de energia.....	40
3.4. Energia, trabalho e calor .....	47
4. Modelo explicativo das analogias.....	52
4.1. Conservação da energia e transformabilidade das forças .....	52
4.2. Modelos explicativos hodiernos .....	53
4.2.1. Modelo explicativo nos fenómenos físico-químicos .....	53
4.2.2. Modelo explicativo para organismos vivos .....	55
4.2.2.1 A bomba de sódio-potássio.....	57
4.2.2.2. A interacção iónica .....	59
4.2.3. A interpretação da cor do sangue.....	60
4.2.3.1. Breve história.....	60
4.2.3.2. Transporte de O <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> no sangue e tecidos e a cor do sangue.....	62
4.2.3.3. Modelo explicativo hodierno .....	64
4.2.3.4. Modelo teórico integrativo para organismos vivos.....	66
5. Modelo interpretativo da teoria de Mayer .....	68
5.1. Modelo teórico e fenómenos.....	68
5.2. Análise e discussão de diferentes patologias .....	70
Conclusão.....	74
Bibliografia .....	77

## **Agradecimentos**

As minhas declarações de dívida não são numerosas, mas são de monta.

Ao Prof Ricardo Lopes Coelho, pela excelente e perspicaz orientação, pelo incansável apoio e amabilidade, pela aposta inquestionável no meu trabalho.

Ao António, pelo seu amplo saber em matérias tão diversas das artes e das humanidades, pelo seu constante apoio no meu trajecto.

Ao meu pai, que chegado à idade da sabedoria, me fez observações pertinentes, apoiadas na sua grande experiência médica.

A memória da minha mãe, vigilante atenta dos meus passos, esteve sempre presente.

A recordação da minha sobrinha Catarina, que nos deixou cedo de mais, não me abandona.

## Resumo

O Nobel da Física Richard Feynman dizia nas suas *Lectures* nos anos sessenta que é importante ter consciência que na física de hoje não temos um conhecimento do que seja a energia. Outros físicos têm salientado a mesma dificuldade. O conceito de energia é também usado em explicações de processos fisiológicos. Neste contexto, o significado de energia é uma questão em aberto. Um estudo recente (Coelho 2009) mostra que os descobridores da energia não encontraram nada que não possa ser destruído ou criado mas antes um princípio de equivalência entre quantidades físicas que não tinham sido até então ligadas. Então surge a questão se esta ideia de equivalência pode ser útil na compreensão da energia nas ciências da vida. Neste contexto será tratada a contribuição de Mayer para o princípio da conservação da energia.

A ideia deste princípio tem origem numa observação clínica. Jenstsch 1916 salientou que não havia evidência para a tese de Mayer baseada naquela observação: o sangue venoso é mais escuro nas regiões frias do que nos trópicos porque nas regiões frias se consome mais oxigénio para manter a temperatura do corpo. Isto conduziu à questão se Mayer observou o que ele diz ter observado. Relativamente a esta questão, algumas hipóteses são apresentadas e discutidas nos capítulos 4 e 5 da presente dissertação.

No livro de 1845, Mayer generalizou pela primeira vez a ideia de conservação da energia à fisiologia e biologia. Em alguns casos, havia uma investigação empírica. Em muitos casos, os argumentos de Mayer para a generalização são baseados em analogias entre os fenómenos inorgânicos e orgânicos. Os modelos teóricos ou conceptuais usados por Mayer em ambos os domínios são abordados no capítulo 1.

Palavras-chave: Mayer, energia, princípio de equivalência, cor do sangue, modelos conceptuais.

## Abstract

The Nobel Laureate Richard Feynman said in his *Lectures* in the 60s that it is important to realize that we have no knowledge in physics today of what energy is. Other physicists have pointed out the same difficulty. The concept of energy is also used in explanations of physiological processes. In this context, the meaning of energy is an open question. A recent study (Coelho 2009) shows that the discoverers of energy did not find anything which can neither be destroyed nor created but rather a principle of equivalence between physical quantities which had not been connected until then. The question whether this idea of equivalence can be useful in understanding energy in life sciences then arises. In this context, Mayer's contribution to the principle of energy conservation is dealt with.

The idea of this principle has its origin in a clinical observation. Jentsch 1916 pointed out that there was no evidence for Mayer's thesis based on that observation: the venous blood is darker in cold regions than in the tropics because in cold regions the consuming of oxygen is greater in order to maintain the temperature of the body. This leads to the question of whether Mayer observed what he said he had. Concerning this, some hypotheses are presented and discussed in the chapters 4 and 5 of the present dissertation.

In the 1845 book, Mayer generalized the idea of the conservation of energy to physiology and biology, for the first time. In some cases, there was empirical research. In most cases, Mayer's arguments for that generalisation are based on analogies between inorganic and organic phenomena. The theoretical or conceptual models used by Mayer in both domains are dealt with in the chapter 1.

Key-words: Mayer, energy, principle of equivalence, colour of blood, conceptual models.

## Introdução

O conceito de energia é ainda hoje um conceito problemático e complexo. O Nobel da Física em 1965, Richard Feynman (1918-1988), dizia nas suas *Lectures on Physics* nos anos sessenta, ser importante ter consciência que na física de hoje não temos um conhecimento do que seja a energia.<sup>1</sup> No *Lehrbuch der Experimentalphysik* de Bergmann e Schaefer de 1998 lê-se, ninguém sabe o que a energia realmente é.<sup>2</sup> Também no século XXI, Dransfeld, Kienle e Kalvius referem não saber o que a energia realmente é. Vários outros autores têm salientado a dificuldade em definir energia.

As investigações realizadas no domínio revelam uma necessidade de mudança no significado de energia ao longo do tempo. O conceito de energia representa uma mudança radical no interior do conceito de calor. É interessante, e não deixa de ser curioso, verificar que o calor foi considerado uma substância até meados do século XIX. E com os trabalhos e teorias de Julius Robert Mayer (1814-1878) e James Prescott Joule (1818-1889) estabeleceram-se equivalências entre diferentes domínios, como entre calor e movimento.

A descoberta da energia é atribuída a quatro jovens, nenhum deles físico (Julius Robert Mayer, James Prescott Joule, Ludvig Colding e Hermann Von Helmholtz). Robert Mayer e Hermann von Helmholtz (1821-1894) eram médicos em exercício. A observação clínica de Mayer, motriz da ideia de conservação e transformação, foi tratada com algum pormenor pela classe médica, por altura da comemoração do centenário do autor, em 1914.

No quadro destas comemorações surgiram vários artigos, em alguns dos quais se colocava a questão de saber se o sangue venoso humano é mais claro na região tropical do que na Europa central, nomeadamente durante o inverno. Esta questão tinha a seguinte razão de ser. Robert Mayer fez uma viagem de barco para Java como médico de bordo. A tripulação tinha feito boa viagem, mas sofria duma infecção pulmonar à chegada. Ao fazer flebotomia, ficou admirado por o sangue

---

<sup>1</sup> Feynman 1966. Cf. Coelho 2006 : 9.

<sup>2</sup> Bergmann e Schaefer 1998. Cf. Coelho 2006 : 9.

venoso ser mais claro do que na zona da Alemanha. Ele conta-nos que suspeitara ter picado uma artéria por engano, mas verificou não ser o caso. Exner em 1914 (*Wiener Klinische Wochenschrift*) comenta, não ter encontrado nenhuma indicação na literatura sobre o assunto, a cor do sangue, nem do tempo nem anterior. Stigler, que tinha escrito sobre higiene e fisiologia nos habitantes dos trópicos, ter-lhe-ia comunicado, nunca ter encontrado a confirmação da observação de Mayer. Também Pfister em 1914, que escreveu sobre o médico de bordo Julius Robert Mayer, no *Archiv für Schiffs und Tropenhygiene* com especial atenção para a patologia e terapia, confirma não ter encontrado tal indicação na literatura do tempo nem na do tempo de Mayer. Jentsch na *Die Naturwissenschaften* de 1916 refere uma passagem que lhe tinha sido mostrada por Ebstein do livro de Johann Autenrieth (1772-1835), *Handbuch der menschlichen Physiologie*, 1801, no qual se lê: “também. no ser humano, a cor do sangue venoso se aproxima da do arterial no verão”<sup>3</sup>. Farber em 1954, estudou alguns autores do sec. XVIII nos quais a relação era estabelecida. Adair Crawford (1748-1795) em *Experiments and Observations on Animal Heat and the Inflammation of Combustible Bodies*, 1778, defendia a influência do calor exterior na cor do sangue. Imergiu um cão em água bastante quente e ao fim de meia-hora “o sangue venoso assumia muito aproximadamente a tonalidade do arterial”<sup>4</sup>.

Tendo Mayer observado a diferença de cor do sangue, ou simplesmente julgado observar, nela reside, segundo ele próprio, o gérmen da sua descoberta. A descoberta não pode naturalmente depender do dado de observação, a intensidade da cor do sangue, pois dezenas de anos mais tarde e ainda hoje não se sabe, se está ou não correcta. A descoberta de um dos maiores princípios da ciência germinou com base no seguinte raciocínio. Se o sangue venoso humano é mais claro nas zonas quentes, como os trópicos, do que nas frias, como a Europa, será porque nestas se gasta mais oxigénio, para manter a temperatura do corpo. Isto teria sugerido que, para se conseguir algo, algo terá de ser dispendido. Regressado à Europa, Mayer envia um artigo a uma revista de física, os Anais de Poggendorf, *Annalen der Physik und Chemie*. O artigo não foi publicado, o editor nem sequer deu resposta. Foi encontrado anos mais tarde, depois da morte de Poggendorf,

---

<sup>3</sup> Cf. Jentsch 1916: 91

<sup>4</sup> Cf. Farber 1954: 6.

entre os seus papéis, e publicado. Em 1842, envia um outro artigo para a revista de Liebig, *Annalen der Chemie und Pharmazie*, que foi publicado. Aqui radica a comemoração pela classe médica em 1914. É com efeito graças às seis páginas deste artigo que se atribui a Mayer o mérito da descoberta do princípio de conservação da energia.

Atribui-se a Mayer a descoberta da energia. Logo, o que Mayer descobriu deve ser a energia.

Um estudo recente (Coelho 2009) mostrou que Mayer estabeleceu equivalências entre grandezas de diferentes domínios. Mas Mayer não explica a razão física subjacente a estas equivalências.

O significado de energia nos organismos vivos ainda não está bem definido. Embora Mayer tenha sido bastante estudado desde os finais do séc. XIX, os elementos biológicos ou fisiológicos não têm tido a mesma atenção.

O presente trabalho propõe-se determinar o significado de energia, para utilizar o termo actual, particularmente no domínio orgânico. Formula-se uma hipótese de modelo explicativo, de um ponto de vista hodierno, subjacente às equivalências entre os fenómenos que Mayer estabeleceu. Esta hipótese de modelo baseia-se numa análise interpretativa das teorias biológicas actuais. A base dos fenómenos biológicos é a bomba electrogénica de sódio-potássio nas membranas celulares. A entrada de iões sódio na célula converte o ADP em ATP no ciclo de Krebs nas mitocôndrias. No ciclo de Krebs liberta-se dióxido de carbono que se vai ligar à hemoglobina nos capilares dos tecidos formando a carboxihemoglobina que confere a cor escura ao sangue. O sangue venoso é oxigenado nos pulmões e o oxigénio liga-se à hemoglobina formando a oxihemoglobina que vai para todo o organismo. Nos capilares, o oxigénio reentra num novo ciclo de Krebs. A oxihemoglobina confere a cor mais clara ao sangue. Há uma equivalência entre os acontecimentos.

## 1. Princípio da conservação da energia

Atribui-se a Mayer, Helmholtz, Joule e Colding, a descoberta do princípio da conservação da energia. A tese de que a energia<sup>5</sup> não pode ser criada nem destruída, apenas pode ser transformada é atribuída a Mayer. No seu livro de 45, ele defende: *ex nihilo nil fit*, para se obter algo, algo tem que ser dispendido ou nada vem do nada.<sup>6</sup> Mayer defende que a força se transforma e não é criada. A transformação é um conceito fundamental no seu pensamento. Mas Mayer não pretende explicar como o originado provém do originante, isto apenas é um facto. O originado é igual ao originante e eles são uma transformação de um no outro. E ele acrescenta que este questionamento é infrutífero, próprio de poetas e filósofos da natureza.<sup>7</sup>

### 1.2. Domínios inorgânico e orgânico

No livro de 45, Mayer considera diversos fenómenos para estabelecer as suas analogias e equivalências: choque elástico, levantamento e queda de graves, experiências de Gay-Lussac e aquecimento do ar atmosférico a volume e pressão constante, experiências com o electróforo, transformação da luz solar em “diferença química” pelas plantas, transformação de “força química” em calor pelos animais. Há

---

<sup>5</sup> Mayer não fala de energia mas sim de força. O termo energia foi utilizado com uma variedade de sentidos no século XVIII. O termo energia foi introduzido no contexto da temática calor e movimento por Thomson em 1851.

<sup>6</sup> “Es entsteht keine Wirkung ohne Ursache; keine Ursache vergeht ohne entsprechende Wirkung Ex nihilo nil fit. Nil fit ad nihilum” (Mayer 1845:5).

<sup>7</sup> “Ein gegebenes Quantum Eis lässt sich in eine entsprechende Menge Wassers verwandeln; diese Thatsache steht fest da und unabhängig von unfruchtbaren Fragen über Wie und Warum und von gehaltlosen Speculationen über den letzten Grund der Aggregats-Zustände. Die ächte Wissenschaft begnügt sich mit positiver Erkenntniss und überlässt es willig dem Poëten und Naturphilosophen, die Auflösung ewiger Räthsel mit Hülfe der Phantasie zu versuchen” (Mayer 1845:10).

outros fenômenos que são apenas referidos com os das 25 experiências para provar as “metamorfozes” entre as cinco formas principais de força: força de queda, movimento, calor, electricidade e magnetismo, separação e ligação química.<sup>8</sup> Embora aqui surja o termo metamorfose, transformação é o termo geralmente usado. Contudo, por léxico e função os termos são sinónimos.<sup>9</sup>

Mayer propõe uma metodologia para estabelecer uma equivalência entre calor e movimento baseada numa equivalência entre grandezas mas não explica estas equivalências.

### 1.2.1. O domínio inorgânico

No domínio inorgânico Mayer estabelece equivalências entre grandezas como calor e movimento, calor e efeito mecânico. No seu livro de 51, Mayer reforça a afirmação do artigo de 42, de que calor e movimento são diferentes formas dum mesmo objecto, mas não admite que o calor seja movimento.<sup>10</sup> A ligação entre movimento e calor é de quantidade e não de qualidade.<sup>11</sup> O que é o calor é uma questão que fica em aberto cuja resolução suporia resolver a questão do éter e conhecer a essência da matéria, nomeadamente se existem átomos.<sup>12</sup> Ele conclui nada

---

<sup>8</sup> “An die Aufstellung von fünf Hauptformen der physischen Kraft reiht sich die Aufgabe, die Metamorphosen dieser Formen durch fünfundzwanzig Experimente zu beweisen” (Mayer 1845:34).

<sup>9</sup> Quando por exemplo são referidas as 25 experiências para as cinco formas principais de forças, as experiências são apresentadas como metamorfoses (Metamorphosen) e na especificação aparece transformação (Umwandlung, Verwandlung), (Cf. Coelho 2006:34-5).

<sup>10</sup> Mas Mayer ao admitir uma transformação e equivalência entre calor e movimento poderia conduzir-nos a entender o calor como uma forma de movimento porque se há uma equivalência e transformação, os termos da relação são da mesma natureza.

<sup>11</sup> “Der Zusammenhang, in welchem, wie wir gesehen haben, die Wärme mit der Bewegung steht, bezieht sich auf die Quantität, nicht auf die Qualität, denn es sind -um mit Euklid zu reden - Gegenstände, die einander gleich sind, sich deshalb noch nicht ähnlich” (Mayer 1851:43).

<sup>12</sup> “Noch mehr ist das Wesen der specifischen Wärme, oder das, was im Innern eines erwärmten Körpers vorgeht, in Dunkel gehüllt. Nicht nur dass die ungelöste Aetherfrage hier wiederum eine Rolle spielt, sondern wir müssten auch, um über diesen Gegenstand in’s Reine kommen zu können, zuvor eine genaue Kenntniss von dem innersten Wesen der Materien besitzen. Allein dazu fehlt noch viel;

sabermos acerca da essência do calor. Na quinta e última parte do livro, Mayer começa por explicar a razão de não ter sido mais cedo descoberta a relação entre calor e movimento. A razão do atraso residiria na terminologia física, a designação do peso por força e do calor por substância teria contribuído para dificultar o estabelecimento duma relação entre calor e movimento.<sup>13</sup>

A força é o conceito principal na teoria de Mayer. No artigo de 42, em todos os fenómenos físicos e químicos a força permanece constante.<sup>14</sup> O elemento originante dos fenómenos e o consequente são forças e a passagem de um a outro é transformação.

#### **1.2.1.1. A transformabilidade das forças ou energia**

No artigo de 42, Mayer estabelece o princípio da conservação da energia. A base do raciocínio é a seguinte. Para se conseguir algo, algo tem que ser realizado, ou nada surge do nada. Mayer pretende saber o que se entende por força e que relações existem entre os diferentes tipos de força.<sup>15</sup> Ele começa por dizer que “forças são

---

denn es ist uns insbesondere unbekannt, ob es Atome gibt, d.h. ob die Materien aus solchen Bestandtheilen zusammengesetzt sind, die bei den chemischen Processen an sich keine Formveränderung mehr erfahren" (Mayer 1851:44).

<sup>13</sup> “Der herrschende Sprachgebrauch, welcher die Schwere mit dem Namen einer bewegenden Kraft, die Wärme mit der eines Stoffes bezeichnet, macht, dass einerseits die Bedeutung eines wichtigen Naturgegenstandes, des Fallraumes, dem Bewusstseyn möglichst ferne gerückt wird, und andererseits die Wärme eine von der lebendigen Kraft der Bewegung weit entlegene Stelle erhält. Das wissenschaftliche System wird dadurch zu einem künstlichen, auf dessen zerklüftetem Grunde man sich überall nur mittelst des mächtigen Hilfsmittels der höheren Analysis sicher fortbewegen kann. Ohne Zweifel ist diesem Uebelstande auch zuzuschreiben, dass der so einfache und nahe liegende Zusammenhang der Wärme und der Bewegung bis auf die neueste Zeit hat verborgen bleiben können" (Mayer 1851:51).

<sup>14</sup> “Fassen wir das Resultat bisheriger Untersuchungen in einem allgemeinen Satze zusammen, so erhalten wir wieder das Eingangs aufgestellte Axiom. Es heisst: Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt die gegebene Kraft eine constante Grösse“ (Mayer 1842:32).

<sup>15</sup> “Der Zweck folgender Zeile ist, die Beantwortung der Frage zu versuchen, was wir unter "Kräften" zu verstehen haben, und wie sich solche untereinander verhalten" (Mayer 1842:233).

causas” mas esta afirmação apenas serve para aplicar às forças uma proposição supostamente válida para as forças, “a causa é igual ao efeito”.<sup>16</sup>

Mayer atribui três propriedades às forças, duas essenciais, a indestrutibilidade e transformabilidade, e uma terceira, a imponderabilidade.

Simbolizando a causa por  $c$  e o efeito por  $e$ , ele escreve  $c=e$  e se  $e$  for causa de um efeito  $f$ , então  $e=f$ . Então uma sequência de causas e efeitos será dada por  $c=e=f=c$ .<sup>17</sup>

A sequência anterior só é válida se todos os termos têm o mesmo valor donde a quantidade inicial mantêm-se e conclui-se que a força é indestrutível.<sup>18</sup>

As forças têm a capacidade de adquirir várias formas. Na equação  $c=e$ , onde se existe  $e$  não pode existir  $c$  nem uma qualquer parte de  $c$  e logo  $c$  transformou-se em  $e$ .<sup>19</sup>

No caso da imponderabilidade a justificação assenta no seguinte. Na natureza existem dois tipos de causas, as matérias e as forças. As primeiras são caracterizadas pela ponderabilidade e impenetrabilidade enquanto que as segundas pelo contrário, imponderabilidade e penetrabilidade.<sup>20</sup>

As causas são quantitativamente indestrutíveis e qualitativamente transformáveis e imponderáveis.<sup>21</sup>

---

<sup>16</sup> “Kräfte sind Ursachen, mithin findet auf dieselbe volle Anwendung der Grundsatz: causa aequat effectum” (Mayer 1842:233).

<sup>17</sup> “Hat die Ursache  $c$  die Wirkung  $e$ , so ist  $c=e$ ; ist  $e$  wieder die Ursache einer andern Wirkung  $f$ , so ist  $e=f$ , u.s.f.  $c=e=f \dots =c$ ” (Mayer 1842:233).

<sup>18</sup> “In einer Kette von Ursachen und Wirkungen kann, wie aus der Natur einer Gleichung erhellt, nie ein Glied oder ein Theil eines Gliedes zu Null werden. Diese erste Eigenschaft aller Ursachen nennen wir ihre Unzerstörlichkeit” (Mayer 1842:233).

<sup>19</sup> “Hat die gegebene Ursache  $c$  eine ihr gleiche Wirkung  $e$  hervorgebracht, so hat eben damit  $c$  zu seyn aufgehört;  $c$  ist zu  $e$  geworden; wäre nach der Hervorbringung von  $e$ ,  $c$  ganz oder einem Theile nach noch übrig, so müßte dieser rückbleibenden Ursache noch weitere Wirkung entsprechen, die Wirkung von  $c$  überhaupt also  $e$  ausfallen, was gegen die Voraussetzung  $c=e$ . Da mithin  $c$  in  $e$ ,  $e$  in  $f$  u.s.w. übergeht, so müssen wir diese Größen als verschiedene Erscheinungsformen eines und desselben Objectes betrachten. Die Fähigkeit, verschiedene Formen annehmen zu können, ist die zweite wesentliche Eigenschaft aller Ursachen” (Mayer 1842:234).

<sup>20</sup> “Zwei Abtheilungen von Ursachen finden sich in der Natur vor, zwischen denen erfahrungsmäßig keine Uebergänge stattfinden. Die eine Abtheilung bilden die Ursachen, denen die Eigenschaft der Ponderabilität und Impenetrabilität zukommt, - Materien; die andere die Ursachen, denen letztere Eigenschaften fehlen, - Kräfte” (Mayer 1842:234).

<sup>21</sup> “Kräfte sind also: unzerstörliche, wandelbare, imponderable Objecte” (p. 234). A introdução no texto dos advérbios quantitativa e qualitativamente justifica-se pela seguinte passagem: “Ursachen sind (quantitativ) unzerstörlich und (qualitativ) wandelbare Objecte” (Mayer 1842:234).

Mayer pretende dizer que as causas e os efeitos são forças e estes são quantitativamente iguais, não se alteram. Apenas a forma é mutável. No seu livro de 51, ele discute o uso do termo de força. A questão centra-se em usar o termo para a força morta de Newton ou para a força viva de Leibniz. Mayer defende que o termo seja usado para algo que se desgasta quando produz efeito.<sup>22</sup> Ele diz que não está em questão o que é a força mas sim o que designamos por força<sup>23</sup> e acrescenta que não conhecemos as causas reais dos fenómenos, temos sim resultados de experiências.<sup>24</sup>

O livro de 45 pode ser dividido em três partes: uma primeira sobre a força em geral, de teor análogo ao do artigo de 42; uma segunda sobre a aplicação da teoria à física e química; a última e a mais longa das partes é dedicada aos seres vivos.

Neste livro, Mayer parte do princípio que nada vem do nada e que nada se torna em nada.<sup>25</sup> Tal como no artigo de 42, a causa é uma força assim como o efeito. As forças são causas e nada existe em movimento sem a acção de uma força. A novidade está na sua tese de que existe uma única força que é quantitativamente imutável e qualitativamente transformável, que perspassa o orgânico e o inorgânico.<sup>26</sup>

As forças do domínio inorgânico são sistematizadas em cinco formas principais: força de queda, movimento, calor, magnetismo e electricidade, separação e ligação química.

Mayer pretende provar as transformações das formas de força umas nas outras.

---

<sup>22</sup> "Den Denkgesetzen, wie dem allgemeinen Sprachgebrauche ist es angemessen, die Entstehung jeder Bewegung mit einem Kraft-Aufwande in Verbindung zu bringen. Hienach ist "Kraft": Etwas, das bei der Erzeugung der Bewegung aufgewendet wird, und dieses Aufgewendete ist als Ursache der Wirkung, der hervorgebrachten Bewegung, gleich" (Mayer 1851:30).

<sup>23</sup> "Formelle Controversen ohne materielle Basis schweben in der Luft, und was insbesondere die Kräftefrage anbelangt, so handelt es sich ja zunächst nicht darum, was eine "Kraft" für ein Ding ist, sondern darum, welches Ding wir "Kraft" nennen wollen" (Mayer 1851:35).

<sup>24</sup> "Man wende mir nicht ein, die Druck"kraft", Schwer"kraft", Cohäsions"kraft" etc. sey die höhere Ursache des Drucks, der Schwere u. s. w. In den exacten Wissenschaften hat man es mit den Erscheinungen selbst, mit messbaren Grössen, zu thun: der Ugrund der Dinge aber ist ein dem Menschenverstande ewig unerforschliches Wesen" (Mayer 1851:37).

<sup>25</sup> "Es entsteht keine Wirkung ohne Ursache; keine Ursache vergeht ohne entsprechende Wirkung Ex nihilo nil fit. Nil fit ad nihilum" (Mayer 1845:5).

<sup>26</sup> "A priori lässt sich beweisen und durch die Erfahrung überall bestätigen, dass die verschiedenen Kräfte ineinander sich verwandeln lassen. Es giebt in Wahrheit nur eine einzige Kraft. In ewigem Wechsel kreist dieselbe in der todten wie in der lebenden Natur. Dort und hier kein Vorgang ohne Formveränderung der Kraft!" (Mayer 1845:6).

No caso do levantamento e queda de graves, a teoria de Mayer é entendida do seguinte modo. Há uma causa que levanta o peso, uma força, o peso levantado também é uma força, a força de queda; o seu efeito, o movimento descensional também é uma força.<sup>27</sup>

No caso da transformação do movimento em movimento ele diz que, quando uma massa choca frontal e elasticamente com outra, a última é posta em movimento enquanto a primeira perde algum movimento. Se numa mesa de bilhar uma bola branca colide com uma vermelha, a branca perde a sua velocidade e a vermelha move-se com a velocidade que a branca perdeu.<sup>28</sup> É o movimento da branca que acarreta o movimento da vermelha ou que se transforma no movimento da vermelha. O movimento da bola branca é uma força. O movimento da bola vermelha é um efeito que é igual à causa.<sup>29</sup> Assim, houve transformação de movimento em movimento mas a quantidade de força manteve-se. Mayer pretende dizer que as formas das causas que são efeitos transformam-se umas nas outras mas que a quantidade é imutável. Neste caso, a colisão elástica transforma um movimento em outro movimento mas a quantidade permanece constante antes e depois da colisão. A magnitude da *vis viva* ou modernamente energia cinética<sup>30</sup> de todo o sistema permanece a mesma antes e depois da colisão.<sup>31</sup> Mayer subsume a conservação da *vis viva* do choque elástico.<sup>32</sup>

Outro fenómeno é o da transformação da força de queda em movimento. Se uma massa em repouso a uma dada distância do solo é deixada cair, a força de queda transforma-se em movimento. O levantamento da massa é a causa e o movimento de

---

<sup>27</sup> "Eine Ursache, welche die Hebung einer Last bewirkt, ist eine Kraft; ihre Wirkung, die gehobene Last, ist also ebenfalls eine Kraft; [...] da diese Kraft den Fall der Körper bewirkt, so nennen wir sie Fallkraft" (Mayer 1845:235).

<sup>28</sup> "Stösst der weisse Ball den Rothen central an, so verliert der Weisse seine Bewegung, und der Rothe geht mit dessen Geschwindigkeit fort" (Mayer 1845:7).

<sup>29</sup> "Die Bewegung des Weissen ist eine Kraft. Die Bewegung des Rothen ist als Wirkung ihrer Ursache gleich; sie ist ebenfalls eine Kraft" (Mayer 1845:7).

<sup>30</sup> Embora o termo energia tenha sido usado com uma variedade de sentidos desde o século XVIII, foi apenas em 1851 que Thomson falou pela primeira vez em energia no contexto calor e movimento. E no final do século XIX, muitos cientistas substituíram o termo *vis viva* por energia cinética, termo introduzido por Thomson em 1851.

<sup>31</sup> "Eine Billard-Kugel kann durch einen Stoss viele andere Kugeln, gross und klein, fortbewegen, und dabei selbst noch in Bewegung bleiben. Die Grösse der Kraft aber, oder die sogenannte „lebendige Kraft der Bewegung“ ist vor und nach dem Stosse constant geblieben" (Mayer 1845: 7)

<sup>32</sup> "Die Grösse der Kraft aber, oder die sogenannte "lebendige Kraft der Bewegung" ist vor und nach dem Stosse constant geblieben" (Mayer 1845:7).

queda é o efeito.<sup>33</sup> A causa é igual ao efeito e são forças. Daí força de queda e força de movimento. A força de queda e o movimento são forças que se transformam uma na outra, são duas formas de manifestações dum mesmo objecto.<sup>34</sup>

Na época, o peso era considerado uma força e a causa da queda do corpo. Mayer contra-argumenta dizendo que o levantamento do corpo é tão necessário à queda quanto o peso e que considerar o peso uma força contraria as características da força, a indestrutibilidade e transformabilidade, porque o peso não diminui com a queda.<sup>35</sup> Logo, o peso não é a causa da queda.<sup>36</sup> O peso é uma propriedade e a força de queda é a diferença espacial de objectos ponderáveis.<sup>37</sup> Mayer acrescenta que o peso não pode cair sem uma altura e diz que a força de queda é o produto do peso pela altura. Também segundo o princípio de conservação de Leibniz (1686), a altura é igual ao quadrado da velocidade. Admitindo que a causa é igual ao efeito então  $mh=mv^2$ .<sup>38</sup>

A força de queda que é a causa é dada pelo produto do peso e altura e a força de movimento que é o efeito é dada pelo produto da massa pelo quadrado da

---

<sup>33</sup> "Hält man sich statt an herkömmliche Voraussetzungen nur an die einfache reine Thatsache, so wird man leicht gewahr, daß die Erhebung des Gewichtes die Ursache ist von der Bewegung desselben [...] aufgewendet wurde die Erhebung, erzeugt wurde die Bewegung der Last" (Mayer 1845:7-8).

<sup>34</sup> "Fallkraft und Fall, und allgemeiner noch Fallkraft und Bewegung sind Kräfte, die sich verhalten wie Ursache und Wirkung, Kräfte, die in einander übergehen, zwei verschiedene Erscheinungsformen eines und desselben Objectes" (Mayer 1845:235).

<sup>35</sup> "gerade das, was jeder Kraft wesentlich zukommen muß, die Vereinigung von Unzerstörlichkeit und Wandelbarkeit, geht jedweder Eigenschaft ab [...] Heißt man die Schwere eine Kraft, so denkt man sich damit eine Ursache, welche, ohne selbst abzunehmen, Wirkung hervorbringt, hegt damit also unrichtige Vorstellungen über den ursächlichen Zusammenhang der Dinge" (Mayer 1845:235-6).

<sup>36</sup> "Um daß ein Körper fallen könne, dazu ist seine Erhebung nicht minder notwendig, als seine Schwere, man darf daher auch letzterer allein den Fall der Körper nicht zuschreiben" (Mayer 1845:236).

<sup>37</sup> "räumliche Differenz ponderabler Objecte ist eine Kraft; da diese Kraft den Fall der Körper bewirkt, so nennen wir sie Fallkraft" (Mayer 1845:235).

<sup>38</sup> A noção de massa de um corpo surge com Newton como o produto do seu volume pela densidade da substância que o constitui. Mas este conceito tornou-se vicioso porque a densidade depende da massa. O conceito de massa como uma propriedade do corpo no seu estado de inércia, massa inercial, apesar de ter sido explicado por Newton foi definido operacionalmente por Leonhard Euler como o quociente da força (F) que actua no corpo pela aceleração resultante (a):  $m=F/a$ . A massa inercial é diferente da massa gravitacional. O peso é a relação da massa com a gravidade. Com o advento da teoria da relatividade de Einstein, a massa inercial de um corpo varia com a sua velocidade relativa a um referencial de um observador particular. Estas variações da massa inercial estão directamente relacionadas com alterações na energia cinética do corpo em movimento. Com a física das partículas, tornou-se necessário associar massa inercial com partículas, os neutrinos, que têm energia cinética mas têm uma carga eléctrica zero e provavelmente uma massa de repouso zero, ou seja, massa inercial zero quando têm uma velocidade zero relativa a nós.

velocidade.<sup>39</sup> Como a força de queda é igual à massa vezes a altura e a altura é igual ao quadrado da velocidade, então a força de queda é igual à massa vezes o quadrado da velocidade. Na sua teoria a força é indestrutível, logo a massa e o quadrado da velocidade que correspondem à *vis viva* são conservadas. Assim, é subsumido pela sua teoria o que na mecânica se designa pelo princípio da conservação da *vis viva*<sup>40</sup>  $mh=mv^2$ .<sup>41</sup>

O movimento desta massa não pode surgir sem o consumo de energia. O que é esta última energia? Nos textos de física (Alonso e Finn 1996; Serway 2006; Cutnell e Johnson 2006, entre outros), esta energia é a energia potencial que se transforma em energia cinética aquando do movimento.

Mayer fala em força de queda e movimento como sendo forças relacionadas como causa e efeito e que se podem transformar uma na outra. Elas são manifestações de uma mesma entidade. A magnitude da força de queda é, considerando o raio da Terra infinito, directamente proporcional à massa  $m$  e ao deslocamento  $d$ . Isto é  $v=md$ .

Nos textos de física, o levantamento do peso é a causa do movimento do peso e é uma forma de energia. Esta energia causa a perda de energia. O que era anteriormente efeito é agora causa e vice-versa. A perda de energia foi transformada em movimento e o movimento em perda de energia.

Se o movimento é transformado em perda de energia e vice-versa, o efeito mecânico total tem um valor constante. É o equivalente mecânico do calor. Esta lei, um caso especial da indestrutibilidade da energia é conhecido em mecânica como o princípio da conservação da *vis viva*.

Mayer diz que a *vis viva* é igual a  $mv^2$ . Modernamente a *vis viva* é  $\frac{1}{2}mv^2$  que corresponde à energia cinética na mecânica newtoniana e  $mc^2$  na mecânica relativista.

---

<sup>39</sup> "Die Grösse der Fallkraft wird gemessen: durch das Produkt aus dem Gewicht in seine Höhe; die Grösse der Bewegung: durch das Produkt aus der bewegten Masse in das Quadrat ihrer Geschwindigkeit" (Mayer 1845:8).

<sup>40</sup> "[...] so bleibt die gegebene Kraft oder der mechanische Effekt eine constante Grösse. Dieses Gesetz, eine specielle Anwendung des Axioms der Unzerstörlichkeit der Kraft, wird in der Mechanik unter dem Namen "Princip der Erhaltung lebendiger Kräfte" aufgeführt" (Mayer 1845:9).

<sup>41</sup> Foi Gottfried Leibniz (1646-1716) que designou  $mv^2$  por *vis viva* em 1686 para distingui-la da *vis mortua* ou força estática do equilíbrio. Mais tarde, em 1695, manteve que os corpos em movimento tinham *vis viva* enquanto que os corpos em repouso tinham *potentia* (Cf. Hecht 2003: 487).

A lei da conservação da *vis viva* é baseada na lei geral da indestrutibilidade das causas.<sup>42</sup>

### 1.2.1.2. A transformabilidade do calor em efeito mecânico

No livro de 45, Mayer usa o comboio a vapor para exemplificar a transformação de calor em efeito mecânico. A explicação é a seguinte. O calor que se transforma em efeito mecânico é o resultante da diferença entre o calor absorvido pelo vapor e o libertado na condensação.<sup>43</sup>

Para fundamentar este facto, Mayer recorre a resultados de experiências com gases. A experiência de Gay-Lussac provou por um lado que a expansão de um gás de um volume no qual esteja comprimido para um recipiente em vácuo não é acompanhada de variação da temperatura global, ou seja, o aumento de temperatura que o gás provoca num recipiente é equivalente ao arrefecimento que se verifica no outro. Não há consumo de calor. Por outro lado, a experiência confirma que quando um gás se expande contra a pressão, há produção de um efeito mecânico e consumo de calor. Se o gás é expandido a um volume constante, não há consumo de calor mas se é expandido a uma pressão constante, então há consumo de calor e produção de um efeito mecânico.

No primeiro caso, o calor é  $x$  e no segundo caso é  $x + y$ , em que  $y$  é o calor consumido. No primeiro caso não houve produção de efeito mecânico ou trabalho. No segundo caso houve produção de efeito mecânico ou trabalho. Como num caso houve

---

<sup>42</sup> “also  $v=md=mc^2$ ; das Gesetz der Erhaltung lebendiger Kräfte finden wir in dem allgemeinen Gesetze der Unzerstörbarkeit der Ursachen begründet” (Mayer 1842:236).

<sup>43</sup> “Die in den Locomotiven wirksame Kraft ist die Wärme. Der Aufwand von Wärme, oder die Verwandlung der Wärme in Bewegung nun beruht darauf, dass die Wärmemenge, welche von den Dämpfen aufgenommen wird, fortwährend grösser ist, als die, welche von den Dämpfen bei ihrer Verdichtung an die Umgebung wieder abgesetzt wird. Die Differenz giebt die nutzbar verwendete, oder die in mechanischen Effekt verwandelte, Wärme” (Mayer 1845:10-11).

variação de volume e noutro não e as quantidades de calor empregues para o mesmo aumento de temperatura são num caso  $x$  e no outro  $x + y$ , Mayer relaciona a diferença entre os calores empregues em ambos os casos,  $y$ , com o efeito mecânico produzido.<sup>44</sup>

Nos textos de física (Alonso e Finn 1996; Serway 2006; Cutnell e Jonhson 2006, entre outros), quando há realização de trabalho há uma produção de energia cinética ou seja uma perda de energia potencial sob a forma de trabalho ou de energia cinética e o calor é dado por  $x + y$  em que  $y$  é o calor perdido sob a forma de energia cinética. O  $x$  é a energia potencial. No processo de aquecimento a quantidade de calor é  $x + y$  e no processo de arrefecimento é  $x$ . Houve produção de trabalho no aquecimento mas não houve produção de trabalho no arrefecimento.

Mayer fala na transformação do calor em trabalho e do trabalho em calor. Mayer refere no artigo “Sur la production de la lumière et de la chaleur du soleil” que o calor transforma-se em efeito mecânico e vice-versa havendo uma equivalência entre ambos.<sup>45</sup> Ele diz que o calor torna-se efeito mecânico ou força viva e vice-versa, porque é impossível que, por um lado, o efeito mecânico ou força viva resultante da dilatação de um gás seja produzido por nada; por outro, o calor absorvido se reduza a nada.<sup>46</sup>

Numa carta de Mayer de 1848, “Sur la transformation de la force vive en chaleur, et réciproquement”, Mayer estabelece a equivalência entre o trabalho mecânico e o calor. E ele determinou quantitativamente esta equivalência, o equivalente mecânico do calor,  $1 \text{ caloria} = 367 \text{ Kg.m.}$ <sup>47</sup> O equivalente mecânico do

---

<sup>44</sup> “Bei der Vergleichung dieser Vorgänge sehen wir in beiden die Luft von 0 auf 274° sich erwärmen und zugleich von einem Volumen auf zwei Volumina sich ausbreiten; im ersten Falle war die erforderliche Wärmemenge =  $x$ , im zweiten =  $x+y$ ; im ersten Falle war der gelieferte mechanische Effekt = 0, im zweiten = 15 [Pfund] [...] und 1" Höhe, die Wärmemenge =  $x+y$  zurückgeben" (Mayer 1845:12).

<sup>45</sup> “ Il est évident qu'un effet mécanique une fois donné ne saurait non plus se réduire en rien. Le résultat de la chaleur absorbée est l'effet mécanique, et dans la même proportion le résultat de l'effet mécanique qui se consomme, est la chaleur (ou un objet équivalent, comme la lumière, l'électricité etc.) “ (Mayer 1978 : 160).

“ Il est impossible que l'effet mécanique (or la force vive) résultant de la dilatation du gaz soit produit par rien, car nil fit ex nihilo. La chaleur absorbée ne saurait se réduire en rien, car nil fit ad nihilum. Or je résume ces deux axiomes de logique, et je dis : La chaleur devient effet mécanique, etc, etc “ (Mayer 1848 b : 385).

<sup>47</sup> “C'est d'après cela que j'ai calculé le nombre d'équivalents de la chaleur, et je l'ai trouvé égal à 367 (c'est à dire 1 calorie = 367 kilogrammètres (...))“ (Mayer 1848 b: 385).

calor é dado na forma: o calor necessário para aumentar dum grau um grama de água é equivalente a um grama de água à altura de 367m.

### **1.2.2. O domínio orgânico**

No livro de 45, a investigação dos processos vivos baseia-se numa “verdade axiomática”: só há transformação de força ou de matéria, mas nunca criação.<sup>48</sup> Isto é expressão do lema inicial no domínio orgânico, pois a criação significaria a negação do “nada vem do nada”.

Mayer estabelece analogias nas plantas e nos animais que são equivalências entre grandezas, entre domínios. Ele não explica o como e porquê destes fenómenos. Mayer diz que são factos e recorre a experiências para demonstrá-los.

---

<sup>48</sup> “Der Verfasser glaubt daher auf das Einverständniss seiner Leser rechnen zu dürfen, wenn er der folgenden Untersuchung als axiomatische Wahrheit den Satz unterlegt: dass während des Lebensprocesses nur eine Umwandlung, so wie der Materie, so der Kraft, niemals aber eine Erschaffung der einen oder der anderen vor sich gehe”(Mayer 1845:40).

### 1.2.2.1. As analogias de Mayer

No livro de 45, Mayer trata o domínio orgânico de forma análoga ao inorgânico. Assim por exemplo, as plantas realizam uma dada actividade, mas apenas se dispõem de luz solar, pelo que a sua actividade não decorre do nada.<sup>49</sup>

Mayer fala de Theodore Saussure (1767-1845). Saussure no seu livro *Recherches chimiques sur la vegetation* de 1804 estabelece uma equivalência entre o consumo do gás oxigénio e a produção do gás ácido carbónico no processo de germinação dos vegetais, um processo de combustão do carbono dos vegetais. O oxigénio retirou o carbono do vegetal e formou com ele o gás ácido carbónico na mesma quantidade. O oxigénio da molécula do gás ácido carbónico é o oxigénio consumido e ligado ao carbono dos vegetais no processo de germinação.<sup>50</sup> Ele refere que esta combustão tem base nas teorias de Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) sobre a combustão das substâncias.<sup>51</sup>

No processo de germinação também é necessária luz solar. É legítimo pensar que este aspecto se prende com a analogia de Mayer do sistema solar com os organismos inorgânicos e depois orgânicos. No artigo de Mayer “Sur la production de la lumière et de la chaleur du soleil”, a produção de calor pela combustão dos elementos químicos, a força química, no Sol, e cujos elementos resultantes são enviados para a Terra e restantes planetas do sistema solar é analogada à combustão do carbono nos organismos inorgânicos, os vegetais. Depois Mayer estabelece uma analogia entre os organismos inorgânicos e orgânicos.

---

<sup>49</sup> “Die Erschaffung einer physischen Kraft, schon an und für sich selbst kaum denkbar, erscheint um so paradoxer, wenn man die Erfahrung berücksichtigt, dass die Pflanze einzig mit Hülfe des Sonnenlichtes ihre Leistung zu vollbringen im Stande ist” (Mayer 1845:40).

<sup>50</sup> “Si la quantité du gaz oxygène consumé l’emporte sur celle qui entre dans le gaz acide formé pendant l’opération, on peut en conclure qu’effectivement la graine a absorbé du gaz oxygène: mais si ces deux quantités sont constamment égales, on doit en inférer que le gaz oxygène ne point éte absorbé par la graine, mais qu’il a été employé uniquement à enlever au vegetal du carbone, en formant, avec ce dernier, du gaz acide carbonique” (Saussure 1804:8).

<sup>51</sup> “Le carbone, en se combinant au gaz oxygène par la combustion, ne doit point changer sensiblement le volume de ce dernier, car on trouve par le calcul, en suivant les données de Lavoisier (...)” (Saussure 1804:9).

No caso dos animais, seria a força química dos alimentos e do oxigénio absorvido pela respiração, que estaria na origem dos movimentos que realizam e do calor que desenvolvem.<sup>52</sup> Isto justificaria porque é que um indivíduo em actividade necessita de mais força química que um indivíduo em repouso.<sup>53</sup>

Mayer dá exemplos numéricos de observações realizadas: as quantidades de ração para cavalos em repouso e em movimento;<sup>54</sup> a alimentação de presos, que estão em repouso, de soldados na caserna ou de trabalhadores em grande esforço físico.<sup>55</sup> Os dados disponíveis mostrariam que com o aumento de actividade seria necessária mais força química.

Mayer fala de Douville. Douville no *Journal de Chimie Medicale* de 1832, faz um estudo comparativo da quantidade de calórico de acordo com a actividade intelectual dos indivíduos. Ele conclui que com o aumento da actividade intelectual a quantidade de calórico diminui, quando há pouca actividade intelectual não há consumo do calórico pelo que este está contido no interior dos indivíduos.<sup>56</sup>

Mayer estabelece também uma relação entre a cor do sangue venoso e a temperatura do ambiente. Se o sangue venoso é mais claro nos trópicos que nas

---

<sup>52</sup> “Die chemische Kraft, welche in den eingeführten Nahrungsmitteln und in dem eingeathmeten Sauerstoffe enthalten ist, ist also die Quelle zweier Kraftäusserungen, der Bewegung und der Wärme, und die Summe der von einem Thiere producirten physischen Kräfte ist gleich der Grösse des gleichzeitig erfolgenden chemischen Processes” (Mayer 1845:45-6).

<sup>53</sup> “In dem thätigen Thiere ist der Stoffwechsel viel grösser als in dem ruhenden. Die Grösse des in einem gewissen Zeitraume vor sich gehenden chemischen Processes sey im ruhenden Individuum = x, in dem thätigen Individuum = x + y. Würde nun während der Arbeit dieselbe Menge freier Wärme ausgeschieden, als in der Ruhe, so müsste der Mehraufwand an chemischer Kraft = y der Bildung mechanischer Effekte genau entsprechen. Durchschnittlich wird aber der thätige Organismus mehr freie Wärme bilden, als der ruhende, da schon die verstärkte Respiration einen vermehrten Wärmeverlust bedingt, der durch eine vermehrte Erzeugung gedeckt werden muss. Während der Arbeit wird also x + einem Theil von y zu Wärme, der Rest aber zu mechanischen Effekten verwendet werden” (Mayer 1845:50).

<sup>54</sup> “Ein starkes Pferd, das Tag für Tag der Ruhe pflegen darf, wird mit 15 [...] Heu und 5 [...] Hafer reichlich genährt; hat aber jezt das Thier, wie oben angenommen wurde, täglich 12’960000 [...] l’ hoch zu heben, so kann es bei dieser Nahrung offenbar nicht bestehen. Wir legen ihm, um es in gutem Stande zu erhalten, 11 [...] Hafer [...] zu“ (Mayer 1845:51).

<sup>55</sup> “Nach Liebig [...] erhalten die Gefangenen im Arresthause in Giessen, denen jede Bewegung mangelt, täglich 17 Loth (64 Lth. = 1 Kil.) Kohlenstoff. [...] Ein kasernirter Soldat geniesst täglich [...] 29 Loth Kohlenstoff. Gönnen wir aber unserem Arbeiter zur Vollbringung seiner schweren Leistung noch weitere 8 Loth, so wird er täglich 36 Loth einführen [...] Davon verwendet er zu mechanischem Effekte [...]“ (Mayer 1845:52).

<sup>56</sup> “Ces résultats sembleraient prouver que, plus l’homme est stupide, plus son sang est chaud; il ne s’occupe de rien, et la chaleur est concentrée dans son intérieur” (Douville 1832:98).

zonas mais frias, então é porque se consome mais oxigénio nas zonas frias para manter a temperatura do corpo.<sup>57</sup> Como referido, esta relação assentou numa observação clínica de Mayer aquando da sua viagem aos trópicos em 1840. A tripulação tinha feito boa viagem mas apresentava uma infecção pulmonar tipo catarral à chegada. Ao fazer flebotomia verificou que o sangue venoso da tripulação mostrava o vermelho característico do sangue arterial.<sup>58</sup>

### 1.2.2.1.1. Analogias físico-químicas e biológicas

No livro de 45, a similitude no tratamento de fenómenos físico-químicos e biológicos é patente nas analogias estabelecidas. Assim, tal como o calor fornecido a um gás a pressão constante,  $x$ , serve para aumentar a temperatura de  $y$  e ter um efeito mecânico de  $z$ , também o calor correspondente ao processo de oxidação que tem lugar nos músculos,  $x'$ , seria equivalente ao calor libertado,  $y'$ , e ao efeito mecânico produzido,  $z'$ . Num caso ter-se-ia

$$x = y + z$$

---

<sup>57</sup>“Aus den bisher betrachteten Gesetzen folgt mit Nothwendigkeit, dass der Temperaturunterschied zwischen der Eigenwärme des Organismus und der Wärme des umgebenden Mediums in einer Grössenbeziehung mit dem Farbenunterschiede beider Blutarten, des Arterien- und des Venenblutes stehen müsse. Je grösser dieser Temperaturunterschied, oder die Kraftproduktion, um so grösser muss auch der Farbenunterschied, und je kleiner der Unterschied der Temperatur, um so kleiner auch der der Farbe seyn. Dieser Farbenunterschied ist ein Ausdruck für die Grösse des Sauerstoffverbrauches, oder für die Stärke des Verbrennungsprocesses im Organismus" (Mayer 1845:85-6).

<sup>58</sup> “Während einer hunderttägigen Seereise war bei der aus 28 Köpfen bestehenden Equipage kein erheblicher Krankheitsfall vorgekommen; wenige Tage aber nach unserer Ankunft auf der Rhede von Batavia verbreitete sich epidemisch eine acute (katarrhalisch-entzündliche) Affection der Lungen. Bei den reichlichen Aderlässen, welche ich machte, hatte aus der Armvene gelassene Blut eine ungemene Röthe, so, dass ich der Farbe nach glauben konnte, eine Arterie getroffen zu haben. [...] Bei einer reichlichen Aderlässe, welche ich zwei Monate nach unserer Ankunft in Java an einem kräftigen, von einer Leberentzündung befallenen Matrosen anstellte, fandich eine normale schwarze Farbe des Blutes“ (Mayer 1845:84-5).

e no outro<sup>59</sup>

$$x' = y' + z'.$$

Esta analogia baseia-se na experiência com gases de Gay-Lussac já referida.

Outra analogia é com a experiência de Dulong. A elasticidade dum gás é analogada com a irritabilidade dos músculos: sem calor o gás não tem elasticidade e sem processo químico não há irritabilidade. Mas Mayer não explica a transformação da força química em efeito mecânico. Como veremos, a explicação assenta num modelo físico-químico e fisiológico.

Mayer pretende inicialmente estabelecer uma analogia entre a química e a física baseado na suposição de que se os elementos químicos se podem transformar uns nos outros, então também na física as forças deverão transformar-se umas nas outras. Porém, ele verifica que existe uma diferença entre elas. Mayer não acredita que os diferentes elementos químicos possam transformar-se uns nos outros ou serem reduzidos a uma única substância ao contrário da física em que há uma única força.

No livro de 45, Mayer diz que a transformação dos elementos químicos uns nos outros ou a sua redução a uma única substância é duvidosa enquanto a transformação das várias formas de força umas nas outras pode ser provada. No futuro, a possibilidade de transmutar os vários elementos químicos uns nos outros ou reduzi-los a elementos mais simples ou mesmo a uma única substância fundamental é duvidosa. A mesma situação não se aplica às causas de movimento. Pode provar-se que as várias formas de força podem transformar-se umas nas outras. Há uma única força.<sup>60</sup>

---

<sup>59</sup> "Wenn zu einer unter constantem Drucke sich befindenden Gasart eine bestimmte Menge von Wärme = x hinzutritt, so wird ein Theil dieser Wärme zur Temperaturerhöhung des Gases verwendet, und dieser Theil = y besteht als freie Wärme fort, ein anderer Theil wird "latent" und bringt den mechanischen Effekt = z hervor. Es ist nun  $x = y + z$ . Setzen wir den in den Capillaren eines Muskels vor sich gehenden Oxydationsprocess oder die diesem entsprechende Wärme =  $x'$ , die wirklich entwickelte freie Wärme =  $y'$ , und den gelieferten mechanischen Effekt =  $z'$ , so ist wieder  $x' = y' + z'$ " (Mayer 1845:98-9).

<sup>60</sup> "Was die Chemie in Beziehung auf Materie, das hat die Physik in Beziehung auf Kraft zu leisten. Die Kraft in ihren verschiedenen Formen kennen zu lernen, die Bedingungen ihrer Metamorphosen zu erforschen, diess ist die einzige Aufgabe der Physik, denn die Erschaffung oder die Vernichtung einer Kraft liegt ausser dem Bereiche menschlichen Denkens und Wirkens. Ob es in zukünftigen Zeiten je gelingen werde, die zahlreichen chemischen Grundstoffe in einander zu verwandeln, sie auf wenige Elemente oder gar auf einen einzigen Urstoff zuruckzuführen, diess ist mehr als zweifelhaft. Nicht das

A analogia que Mayer estabeleceu entre a cor do sangue venoso nos trópicos e a temperatura ambiente assenta na equivalência entre o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono para manter a temperatura do corpo. Analogia esta proposta por Theodore Saussure acerca da germinação dos vegetais. Também Lavoisier falava na conversão do ar vital da atmosfera em gás ácido carbonico na respiração pela combustão do carbono do sangue.<sup>61</sup>

Outro aspecto importante no pensamento de Mayer foi a imagem de organismo como uma máquina e a analogia entre o sistema solar e o organismo vivo. Não que Mayer acreditasse verdadeiramente que o organismo fosse uma máquina, já que Mayer se opunha ao materialismo reducionista dos meados e finais do século XIX alemão. Mas em ordem a analisar as suas relações materiais e energéticas que pensava fazerem parte naturalmente de um organismo como uma máquina. A analogia que Mayer estabelece entre o sistema solar e o organismo vivo prende-se por um lado com a noção de força gravitacional na mecânica newtoniana e por outro com a ideia de Lavoisier de uma analogia entre as reacções químicas do organismo vivo e a combustão do carbono como fonte do calor animal na respiração. Na carta de Mayer de 1848 “Sur la transformation de la force vive en chaleur, et réciproquement”, ele diz que há uma combustão do sangue sujeito à acção das paredes dos capilares e que o resultado desta combustão é o calor animal e o trabalho mecânico.<sup>62</sup>

No livro de 48, Mayer fala da origem do calor solar. A obra está dividida em nove partes: a origem do calor solar constitui a temática principal; as três últimas partes são dedicadas a temas relacionados- manchas solares, marés e calor interno da Terra. Ele vai analisar a origem do calor solar através de exclusões entre a via química e a mecânica.<sup>63</sup> Finalmente surge a tese explicativa: a queda de massas atraídas pelo

---

Gleiche gilt von den Bewegungsursachen. A priori lässt sich beweisen und durch die Erfahrung überall bestätigen, dass die verschiedenen Kräfte ineinander sich verwandeln lassen” (Mayer 1845: 6).

<sup>61</sup> “(...) que la respiration est une combustion lente d’une portion de carbone que contient le sang, et que la chaleur animale est entretenue par la portion de calorique que se dégage au moment de la conversion de l’air vital de l’atmosphère en gaz acide carbonique, comme il arrive dans toute combustion du carbone“ . (Lavoisier 1920:34).

<sup>62</sup> “(...) Le sang vivant est une liqueur qui brûle lentement, soumis à l’action de présence des parois des vaisseaux capillaires ; le résultat de cette combustion est la chaleur animale et le travail mécanique“ (Mayer 1848 b: 386).

<sup>63</sup> “Als allgemeines Naturgesetz, von dem keine Ausnahme statt findet, gilt der Satz: dass zur Erzeugung von Wärme ein gewisser Aufwand erforderlich ist. Dieser Aufwand, so verschiedenartig er sonst seyn mag, lässt sich immer auf zwei Hauptkategorien zurückführen; es besteht derselbe nemlich entweder in einem chemischen Material oder in einer mechanischen Arbeit” (Mayer 1848 a:3).

Sol está na origem do calor.<sup>64</sup> Tal como o sistema solar com os planetas em volta do Sol e que estão sujeitos à acção da força da gravidade e cujo resultado é o calor solar também o organismo vivo é composto por órgãos atraídos pela força da gravidade e cuja acção a nível das paredes dos capilares é o calor animal.

No artigo “Sur la production de la lumière e de la chaleur du soleil” , Mayer diz que o espaço do nosso sistema solar está preenchido por uma quantidade imensa de massas compactas, os asteroides, comparáveis a corpos muito mais pequenos, os átomos. Estes asteroides estão ou isolados e não se vêem ou agrupados em número infinito, sendo visíveis, caso as circunstâncias sejam favoráveis, sob a forma de nuvens de poeira ou nebulosas. Todos estes corpos estão em torno do centro de gravidade do nosso sistema planetário mas na sua órbita eles encontram sempre qualquer resistência e esta resistência por mais pequena que seja faz com que ela não seja absolutamente elíptica mas espiral. O número destes asteroides deve aumentar com a aproximação ao Sol.<sup>65</sup> O calor produzido pela queda de um corpo deve ser proporcional ao quadrado da velocidade. E segundo a experiência de Dulong, ele estabelece uma analogia entre a queda de um asteroide e a combustão do carbono como fonte do calor animal. No primeiro caso, o calor é proporcional ao quadrado da velocidade; no segundo caso, o calor é proporcional ao consumo de oxigénio e produção de dióxido de carbono.<sup>66</sup>

Na época existia uma enorme controvérsia no que concerne à fonte do calor animal. O fisiologista Muller concluiu, a partir das experiências de Dulong e Despretz, que a fonte do calor animal não residia apenas na respiração nos pulmões mas sim em outros locais nomeadamente no sistema nervoso. Tal como muitos dos

---

<sup>64</sup> “[...] so haben diese wandernden Himmelskörper in der Peripherie des Sonnensystemes ihre Wiege, im Centrum ihr Grab [...] Alle diese Massen stürzen mit einem heftigen Stosse in ihr gemeinsames Grab. Da nun keine Ursache ohne Wirkung besteht, so muss auch jede dieser kosmischen Massen, ebenso wie ein zur Erde fallendes Gewicht, durch ihren Stoss eine, ihrer lebendigen Kraft proportionale Wirkung, eine gewisse Menge von Wärme, hervorbringen" (Mayer 1848 a:12).

<sup>65</sup> “Si les corps en question étaient également étendus dans les trois dimensions de l’espace, leur fréquence pourrait, en général, être d’une proportion inverse avec le cube de la distance du centre solaire et en conséquence les atomes planétaires près de la surface du soleil seraient presque dix millions de fois plus serrés que dans l’espace que parcourt la terre. Cependant, il existe des faits – c’est à dire la zone des taches du soleil et la forme de la lumière zodiacale, ce nuage d’atomes cosmiques, - qui indiquent que le plan de l’équateur solaire est plus peuplé que le rest de l’espace“ (Mayer 1978 : 165-66).

<sup>66</sup> A equivalência entre o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono foi estabelecida por Saussure acerca da germinação dos vegetais.

seus contemporâneos, Muller considerou o sistema nervoso como a principal fonte de calor animal.<sup>67</sup> Com Gustav Magnus, a fonte do calor animal estava em todo o organismo na intimidade dos tecidos.<sup>68</sup>

Mayer diz que o calor é transformado em movimento e que o calor é transformado em actividade mecânica (trabalho). Quantidades iguais de combustível sob as mesmas condições dão quantidades iguais de calor. Assim, o calor transforma-se em trabalho e vice-versa.

---

<sup>67</sup> “(...) Muller the physiologist (...) concluded from Dulong’s and Despretz’s experiments “That there must be other sources of animal heat than respiration, even one subscribes to the chemical theory of respiration (...) Like many of his contemporaries, Muller considered the nervous system to be a major source of animal heat” (Caneva 1993: 56).

<sup>68</sup> “Gustav Magnus (1802-1870) químico e fisiologista alemão, doseou pela primeira vez o oxigénio e o gás carbónico no sangue arterial e venoso, comprovando, assim que a utilização de oxigénio e eliminação de gás carbónico se passa na intimidade dos tecidos” (Rezende 2000: 3).

## 2. Teses de historiadores da história da ciência

Kenneth Caneva em 1993 diz que a procura de analogias válidas desempenhou um papel importante no desenvolvimento das ideias de Mayer. O conceito de força e suas características apresentou-se em termos da analogia central entre força incriável, indestrutível e imponderável e matéria incriável, indestrutível e ponderável.<sup>69</sup>

Para Autenrieth, professor de fisiologia de Mayer, esta analogia estendeu-se para incluir um paralelo entre matéria ponderável e de atracção gravitacional e movimento como extremos opostos de um espectro de entidades que envolviam os imponderáveis, força vital e a alma. Tal como no caso dos autores que sustentavam apenas a força vital, estas discussões envolvem inevitavelmente uma reflexão em problemas de real ou aparente criação e destruição.

Crosbie Smith em 2003 centra a energia em Inglaterra no século XIX. Ele diz que Mayer em 1848 reclamou a prioridade da descoberta do equivalente mecânico do calor em 1842. Isto porque Joule tinha-o demonstrado experimentalmente em 1843. Assim, William Thomson (1824-1907) reconheceu a prioridade da ideia do equivalente mecânico do calor a Mayer mas disse que tinha sido Joule que o tinha verificado experimentalmente.<sup>70</sup> O autor acrescenta que apenas a partir desta disputa de prioridade com Joule, os escritos de Mayer passaram a ser relidos como contribuições pioneiras para as doutrinas da física da energia.<sup>71</sup>

Esta tese está incorrecta. A disputa de prioridade é sobre o equivalente mecânico do calor. A doutrina do calor movimento foi aceite por Thomson até 1851.

---

<sup>69</sup> “(...) the search for valid analogies played a key role in the development of Mayer’s ideas. Indeed, the very concept of force and its characteristics were both arrived at and presented in terms of central analogy between uncreatable, indestructible, imponderable force and uncreatable, indestructible, ponderable matter.” (Caneva 1993 : 125).

<sup>70</sup> “William Thomson, were to acknowledge Mayer’s priority with respect to the idea of a mechanical equivalent, but to claim that he (Joule) had established it by experiment” (Smith 2003: 296).

<sup>71</sup> “But only as the priority dispute with Joule developed in the late 1840s and beyond did the writings of Mayer begin to be reread as “pioneering contributions” toward the doctrines of energy physics” (Smith 2003: 296).

De acordo com Smith, Thomson em 1847 pretendeu testar a teoria do calor como substância de Carnot-Clayperon<sup>72</sup> e apenas em 1851 aderiu à nova teoria dinâmica do calor, da equivalência do calor e do trabalho de Joule após a primeira reconciliação de Joule e Carnot por Rudolf Clausius (1822-1888) em 1850.<sup>73</sup> Porém, o autor negligencia o facto da equivalência do calor e do efeito mecânico ser também de Mayer.

Caneva em 1993 sustenta que apesar do tema central do pensamento de Mayer ser a equivalência do calor e movimento, ele nunca reduziu calor a movimento. Esta relutância à teoria do calor-movimento era devida a duas razões. Por um lado, Mayer opunha-se ao materialismo o qual reconhecia apenas a existência da matéria em movimento; por outro, na época as forças eram regularmente definidas como propriedades da matéria e Mayer considerava as forças independentes da matéria.<sup>74</sup> O autor acrescenta que Mayer parece pensar o calor fenomenologicamente, em termos das suas manifestações sensíveis e não em termos de movimento imaginável de partículas invisíveis.<sup>75</sup>

Este último argumento deve ser discutido porque Mayer não pensa o calor em termos observáveis. A sua preocupação não é a natureza do calor, dizendo na sua obra de 1851 nada sabermos acerca do que seja a essência do calor. Mayer está preocupado

---

<sup>72</sup>“During his first session (1846-7) as Glasgow College professor of natural philosophy, William Thomson rediscovered a model air engine, presented to the college classroom in the late 1820s by its designer, Robert Stirling, but long since clogged with dust and oil. Having joined his elder brother as a member of the Glasgow Philosophical Society in December 1846; Thomson addressed the Society the following April on issues raised by the engine when considered as a material embodiment of the Carnot-Clayperon account of the motive power of heat. If, he suggested, the upper part of the engine were maintained at the freezing point of water by a steam of water, and if the lower part were held in a basin of water also at the freezing point, the engine could be cranked forward without the expenditure of mechanical effect (other than to overcome friction) because there existed no temperature difference” (Smith 2003: 291-2).

<sup>73</sup>“(…) Rudolf Clausius produced in 1850 the first reconciliation of Joule and Carnot. (...) Thomson finally laid down two propositions early in 1851, the first a statement of Joule’s mutual equivalence of work and heat” (Smith 2003: 298).

<sup>74</sup>“Despite the fact that central to Mayer’s entire thinking was the equivalence of heat and motion, he nevertheless explicitly opposed reducing heat to motion. (...) This reluctance to embrace the mode-of-motion theory of heat was apparently fuelled by several reinforcing considerations. In the first place, Mayer was deeply opposed to materialism, and since classical materialism recognized the existence of only matter in motion, his doctrine of force and his refusal the central components of the materialist worldview. Second, in Mayer’s day forces were regularly defined as properties of matter, whereas he was concerned to vindicate for his forces an existence independent of matter” (Caneva 1993: 28).

<sup>75</sup>“It seems that Mayer tended to think of heat phenomenologically, in terms of its sensible manifestations-in particular, the macroscopic expansion of heated bodies-and not in terms of the imaginable motion of unseeable particles” (Caneva 1993: 29).

em estabelecer uma equivalência entre calor e movimento como metodologia para a compreensão dos fenómenos. De facto, Mayer não identifica calor e movimento mas pensa a relação calor e movimento em termos abstractos. Fá-lo porque diz existir uma relação causa-efeito entre calor e movimento. Em 1845, Mayer diz que nada vem do nada, *ex nihilo nil fit*, e este argumento é algo que ele sabe antes de tratar os fenómenos, é um saber prévio. Mas ele não se limitou a aplicar este saber prévio aos fenómenos. Mayer construiu uma teoria.

Joseph Kestin em 1979, diz que a equivalência do calor e energia mecânica foi estabelecida por Mayer e que ele calculou o equivalente mecânico do calor a partir da experiência com gases de Gay-Lussac.<sup>76</sup>

Esta tese está incorrecta. Embora o termo energia tenha sido usado com uma variedade de sentidos no século XVIII, o termo energia na temática calor e movimento foi introduzido por Thomson em 1851. Mayer fala em força.

O autor acrescenta que Joule determinou o valor do equivalente mecânico do calor em 1843 no desconhecimento do trabalho de Mayer<sup>77</sup>, mas não se refere à disputa de prioridade referida por Crosbie Smith.

Gerald Holton e Stephen Brush em 1985 referem-se ao termo convertibilidade da energia em Mayer.<sup>78</sup> Esta tese está historicamente incorrecta por duas razões.

i) Mayer sustentava a transformabilidade do calor em efeito mecânico e do calor em movimento e não a convertibilidade do calor e movimento. Esta tese é de Joule. Mayer realizou experiências para provar que o movimento produz calor e que o calor produz movimento mas sem admitir uma convertibilidade entre ambos. Ele diz que prefere admitir que o calor provenha do movimento do que admitir que há uma causa sem efeito ou um efeito sem causa.<sup>79</sup> Há uma transformação de um no outro.

---

<sup>76</sup> “The equivalence of heat and mechanical energy was lucidly formulated for the first time by a physician from Heilbronn, Robert Mayer. He also calculated the conversion factor of heat and mechanical energy, the mechanical equivalent of heat, from the experimental values of specific heats, at constant pressure and constant volume, supplied by Gay-Lussac” (Kestin 1979: 149).

<sup>77</sup> “James Prescott Joule determined the value of “the mechanical equivalent of heat in 1843, having had no previous knowledge of Mayer’s work” (Kestin 1979: 150).

<sup>78</sup> ““Causes” do not have the properties derived by this private logic, nor can one equate energy with “cause” unless there is prior *experimental* proof of the indestructibility and convertibility of energy. But Mayer beleieved that this proof was already avaiable from previous experiments, provided they werw interpreted from his viewpoint” (Holton 1985: 269).

<sup>79</sup> “Ist es nun ausgemacht, daß für die verschwindende Bewegung in vielen Fällen (exception confirmat regulam) keine andereWirkung gefunden werden kann, als die Wärme, für die entstandene Wärme

Mayer diz que calor e movimento são formas diferentes de um mesmo objecto mas não são o mesmo objecto. O termo convertível tem implicações teóricas porque para o movimento se converter em calor é preciso que o calor seja movimento.

O termo energia foi introduzido por Thomson em 1851 e nunca foi referido por Mayer. No mesmo livro, os historiadores da ciência referem-se a energia potencial e energia cinética em Mayer<sup>80</sup>, facto que está historicamente incorrecto. Rankine em 1853 introduziu a distinção entre energia potencial e actual e posteriormente Thomson e Tait em 1862 substituíram a energia actual por energia cinética.

A tese de Thomas Kuhn (1989) no artigo “A Conservação da Energia como Exemplo de Descoberta Simultânea” de 1959 é a de que os pioneiros do princípio da conservação da energia tinham sido influenciados pela *Naturphilosophie* dominante nos finais do século XVIII e início do século XIX, nomeadamente pelas ideias de Schelling, de uma unidade de todas as forças.

Neste artigo, Kuhn tem uma posição externalista na história das ciências, enfatizando a importância de factores de ordem externa na evolução da ciência. O autor mostra que:

a) contrariamente à historiografia tradicional da física que atribui a descoberta do princípio da conservação da energia a quatro cientistas europeus entre 1842 e 1847, Mayer, Joule, Colding e Helmholtz, a formulação deste princípio deveu-se à contribuição “independente” de doze cientistas europeus, que formularam, de diferente maneira, teses diferentes mas congruentes para a formulação da primeira lei da termodinâmica nas duas décadas anteriores a 1850;<sup>81</sup>

b) as teses formuladas dividiam-se em três grupos de acordo com três factores de relevo na contribuição para a formulação deste princípio: processos de conversão; desenvolvimento e quantificação ou matematização do conceito de trabalho mecânico ligado às máquinas térmicas, máquinas a vapor e o princípio da *Naturphilosophie*.

---

keine andere Ursache als die Bewegung, so ziehen wir die Annahme, Wärme entsteht aus Bewegung, der Annahme einer Ursache ohne Wirkung und einer Wirkung ohne Ursache vor" (Mayer 1842: 238).

<sup>80</sup> “He simply concludes: “If potential energy and kinetic energy are equivalent to heat, heat must also naturally be equivalent to kinetic energy”” (Holton 1985: 270).

<sup>81</sup> “A história da ciência não oferece nenhum exemplo mais marcante do fenómeno conhecido como descoberta simultânea. Já nomeámos doze homens que, num, curto período de tempo, apreenderam por si partes essenciais do conceito de energia e respectiva conservação. (...) A multiplicidade presente segere suficientemente que, nas duas décadas anteriores a 1850, o clima do pensamento científico europeu incluía elementos capazes de conduzir cientistas receptivos a uma significativa nova visão da natureza” (Kuhn 1989: 104-105).

Segundo este princípio filosófico, existia a ideia de uma unidade profunda entre todos os fenómenos naturais, ou seja, a noção de que forças vitais, a *vis viva*, tinham o mesmo estatuto que os outros tipos de força e que também eram conservadas na natureza.

A tese fundamental de Kuhn é a de que há uma unidade e convertibilidade entre os fenómenos, que é conservada na natureza. Por outras palavras, a conversão de um fenómeno em outro produz trabalho, acarretando dissipação de energia. Porém, esta energia dissipada ou criada, a energia cinética, não se perde. Ela conserva-se no sistema, ou seja, ela converte-se noutro elemento. Há uma equivalência entre o trabalho realizado e a energia cinética criada.

O autor vai mostrar de que modo estes três factores, ou seja, de que modo os cientistas de diferentes maneiras, contribuíram para a formulação do princípio da conservação da energia. E mostra que, no século XIX, estas teses ainda eram apenas qualitativas no que concerne ao conceito da conservação da energia.<sup>82</sup> Faltava o elemento quantitativo, a noção de energia cinética associada ao conceito de trabalho mecânico. Por outras palavras, apesar de algumas tentativas de alguns cientistas no sentido da quantificação do conceito de trabalho mecânico, à excepção de Helmholtz, este aspecto ainda permanecia bastante qualitativo. Faltava a noção ou conceito de energia cinética associada ao trabalho mecânico.

Ele conclui que os cientistas chegaram de diferentes maneiras e por “saltos mentais” e, na maioria dos casos, de uma forma incompleta ao conceito de trabalho da mecânica clássica ou newtoniana e da conservação da energia. Porém, tal não é dispiciente, uma vez que na própria *Mechanica* de Euler, na *Mécanique analytique* de Lagrange e na *Mécanique céleste* de Laplace, este elemento também não aparece. Mas, diz Kuhn, é interessante constatar que estes “saltos mentais” sugerem que muitos destes cientistas estavam profundamente predispostos a ver uma única força indestrutível na raiz de todos os fenómenos naturais. E, esta predisposição era como

---

<sup>82</sup> “A quantificação da conservação da energia revelou-se, de facto, insuperavelmente difícil para esses pioneiros, cujo principal equipamento intelectual consistia em conceitos relacionados com os novos processos de conversão.(...) Estas iniciativas casuais foram totalmente improdutivas, e deste grupo só Mayer teve êxito em ultrapassá-las. Para tal, teve de usar conceitos pertencentes a um aspecto muito diferente da ciência do século XIX, aspecto que referi anteriormente como preocupação com motores, e cuja existência tomarei agora como garantida enquanto produto secundário bem conhecido da Revolução Industrial.(...) Além disso, encontraremos numerosas experiências e concepções qualitativas relacionadas tão estreitamente com a conservação da energia que fornecem colectivamente algo de muito semelhante a uma segunda via independente para ela” (Kuhn 1989: 118-119).

que um resíduo de uma metafísica semelhante gerada pela controvérsia do século XVIII em torno da conservação da *vis viva*.

Esta tese pode ser refutada tendo em conta os seguintes argumentos:

a) Nem todos os cientistas sustentavam a ideia de processos de conversão dos fenómenos. Os cientistas do final do século XVIII e início do século XIX sustentavam na maioria a teoria do calor substância e a conversão do calor ou calórico em movimento era impossível.

Foi Rumford que começou por questionar esta tese do calor substância mas foi Mayer que estabeleceu uma equivalência entre calor e movimento. Joule demonstrou experimentalmente esta equivalência. Colding defendeu a transformação do calor e Helmholtz sugeriu um procedimento teórico baseado nas categorias universais de repouso e movimento.<sup>83</sup>

b) À exceção de Joule, não sustentavam a tese ligada às máquinas a vapor da conversão do calor em movimento.

Tal como referido, Mayer preferia admitir uma transformação do movimento em calor do que uma causa sem efeito ou um efeito sem causa. Porém, as máquinas a vapor seriam um exemplo da transformação inversa, do calor em movimento.<sup>84</sup>

Thomson não acreditava na convertibilidade do calor em trabalho defendida por Joule. O autor diz que a conversão do calor ou calórico em trabalho parece impossível não havendo nenhuma experiência que o mostre.<sup>85</sup> A produção de efeito mecânico ou trabalho pelo calor nas máquinas a vapor era uma “transmissão” de calor e não uma conversão.<sup>86</sup>

---

<sup>83</sup> “Helmholtz parte do princípio que existem duas forças últimas na natureza (...) As forças últimas de Helmholtz levam a olhar os fenómenos do ponto de vista seguinte: há algo em repouso, mas tendendo a produzir movimento, e há algo em movimento” (Coelho 2006: 69).

<sup>84</sup> “umgekehrt dienen wieder die Dampfmaschinen zur Zerlegung der Wärme in Bewegung oder Lasterhebung. Die Locomotive mit ihrem Convoi ist einem Destillirapparate zu vergleichen; die unter dem Kessel angebrachte Wärme geht in Bewegung über” (Mayer 1842: p 239).

<sup>85</sup> “the conversion of heat (or caloric) into mechanical effect is probably impossible”. Na nota de rodapé lê-se: “This opinion seems to be nearly universally held by those who have written on the subject. A contrary opinion however has been advocated by Mr. Joule of Manchester; some very remarkable discoveries which he has made with reference to the generation of heat by [...] seeming to indicate an actual conversion of mechanical effect into caloric. No experiment however is adduced in which the converse operation is exhibited” (Thomson 1848: 315).

<sup>86</sup> “In actual engines for obtaining mechanical effect through the agency of heat, we must consequently look for the source of power, not in any absorption and conversion, but merely in a transmission of heat” (Thomson 1848: 315).

Em 1850, o físico teórico alemão Rudolf Clausius produziu a primeira conciliação entre a teoria de Carnot e a de Joule. Clausius, aceitando a teoria mecânica do calor, a convertibilidade mútua do calor e trabalho defendida por Joule, reteve a parte da teoria de Carnot que requeria uma transferência de calor de uma elevada temperatura para uma baixa temperatura para a produção de trabalho. Assim, à luz desta nova teoria, uma porção inicial de calor foi convertida em trabalho segundo o equivalente mecânico do calor e a remanescente diminuiu até à temperatura mais baixa, ou seja, houve uma transferência de calor da temperatura mais elevada para a mais baixa. E Clausius acrescenta que há sempre uma tendência para igualar temperaturas diferentes e, portanto, para passar dos corpos mais quentes para os mais frios.<sup>87</sup> O calor não se “perdia”. Ele apenas era transferido.

Em 1850, Thomson e Macquire Rankine começaram a avaliar a tese de Clausius acerca da reconciliação entre Carnot e Joule. Em 1851, Thomson aderiu à “nova” teoria dinâmica do calor, ou seja, a equivalência mútua do calor e trabalho de Joule e estabeleceu a ideia de um motor perfeito no critério de Carnot.

Porém, a sua aceitação tardia à tese de Joule prendeu-se com a resolução do problema da irrecuperabilidade do efeito mecânico “perdido” sob a forma de calor. Mas, Thomson encontrou em Deus a justificação para tal: “Deus podia, sózinho, criar ou destruir energia (i. é., a energia foi conservada na quantidade total), mas os seres humanos podiam fazer uso das transformações da energia, por exemplo, (...) em motores de calor”.<sup>88</sup> Por outras palavras, só o “poder criativo ou divino” pode aniquilar energia mecânica. A energia conserva-se, não se “perde”, mas os humanos podem fazer uso das transformações da energia. Há, portanto, uma transformação da energia. Thomson introduz, assim, uma divisão entre energia estática e dinâmica.

c) Nem todos partilhavam do princípio filosófico da *Naturphilosophie*, a ideia de uma força originária em todos os fenómenos. Eles opunham-se à teoria mecanicista do mundo veiculada desde o século XVII. Eles não acreditavam que a riqueza dos

---

<sup>87</sup> ”(...) Clausius reasoned that if such an engine did exist, “it would be possible, without any expenditure of force or any other change, to transfer as much heat as we please from a cold to a hot body, and this is not in accord with the other relations of heat, since it always shows a tendency to equalise temperature differences and therefore to pass from hotter to colder bodies” ( Smith 2003: 298).

<sup>88</sup> “ God alone could create or destroy energy (i.e., energy was conserved in total quantity), but human beings could make use of transformations of energy, for example, in waterwheels or heat engines” (Smith 2003: 299).

fenómenos naturais incluindo o homem com o seu intelecto, emoções e interesses fosse o resultado do movimento de partículas.

Gerald Holton, David Cassidy, James Rutherford, partilham da opinião de Kuhn de uma influência da *Naturphilosophie* no pensamento de Mayer.<sup>89</sup> Mas, esta influência é historicamente incorreta.

Mayer não partilhava do princípio da *Naturphilosophie*.<sup>90</sup> Ele diz que nada surge do nada, ou não há criação ou destruição, apenas transformação e que a causa é igual ao efeito. Tal como foi referido, *ex nihilo nil fit*, para se obter algo, algo tem que ser dispendido. Este não é um princípio da *Naturphilosophie*. O principal argumento contra a influência da *Naturphilosophie* em Mayer referida pelos historiadores é que eles não apresentam passagens de Mayer para justificar a influência. Também Mayer nega a influencia da *Naturphilosophie*. Como referido, no livro de 45 ele critica os filósofos que pretendem explicar os fenómenos. Ele relaciona observáveis e a diversidade é justificada por transformação.

A sua não aderência ao princípio filosófico pode ser observada na sua distinção entre a física e a química no livro de 45. Mayer não acreditava que os elementos químicos pudessem ser transmutados uns nos outros ou que existisse um elemento originário comum a todos, ao contrário da física em que havia uma única força.

A tese de Kuhn, Cassidy, Holton, Rutherford parece assentar num desconhecimento do que o próprio Mayer diz e resultar da ideia generalizada de uma influência da *Naturphilosophie* no pensamento dos cientistas do final do século XVIII e início do século XIX.

---

<sup>89</sup> “Mayer had been influenced by the German philosophical school now known as *Naturphilosophie* or “Nature Philosophy”” (Cassiday, Holton, Rutherford 2002: 275).

<sup>90</sup> “According to Nature Philosophy, the various phenomena and forces of nature-such as gravity, electricity, and magnetism-are not really separate from one another but are all manifestations of some unifying “basic” natural force” (Cassiday, Holton, Rutherford 2002: 275).

### 3. O conceito de energia

Ainda hoje não se sabe o que significa o termo energia. Richard Feynman dizia não sabermos o que seja a energia. No *Lehrbuch der Experimentalphysik* de Bergmann e Schaefer de 1998, lê-se: “ninguém sabe o que a energia realmente é”. Dransfeld et al. (2001), Çengel e Boles (2002), Halliday et al. (2003), entre outros, chamam a atenção para a dificuldade em definir energia. Muitos estudos têm sido realizados sobre a dificuldade dos estudantes na interpretação do conceito de energia: Watts (1983), Duit (1986), Nicholls e Ogborn (1993), Cotignola et al. (2002), De Berg (2006), Barbosa e Borges (2006), entre muitos outros. Têm-se desenvolvido métodos de ensino para evitar os mal-entendidos sobre a energia: Solomon (1985), Prideaux (1995), Trumper (1990, 1991, 1997). Também os manuais têm sido criticados: (Lehrman 1973; Sexl 1981; Duit 1981; Hicks 1983; Duit 1987; Bauman 1992; Chrisholm 1992; Cotignola et al. 2002; Doménech et al. 2007)). Alguns destes autores entre outros (Valente 1999; Greenslade 2002; Hecht 2003; Roche 2003; Coelho 2006) estudaram o conceito de energia em termos da sua evolução histórica. Mas esta abordagem histórica não é tema da presente dissertação. Apenas faremos uma breve síntese histórica da evolução do conceito.

A dificuldade em definir o conceito de energia é assunto de debate e discussão entre os físicos. A diversidade de definições do conceito pode ser verificada na secção das definições de energia desta dissertação.

Alguns exemplos da definição de energia salientam a dificuldade e divergência na definição do conceito. Maxwell em 1871 na obra *Teoria do calor* diz que energia dum corpo é a capacidade que o corpo tem de realizar trabalho<sup>91</sup> e o calor não é uma substância, é uma forma de energia porque o calor pode ser gerado<sup>92</sup> por trabalho e pode ser realizado trabalho por acção do calor. Lodge em 1879 criticou a definição de energia como a capacidade de realizar trabalho dizendo que a energia é uma transferência. Voigt em 1903 diz que a energia é a capacidade de realizar

---

<sup>91</sup> “the energy of a body may be defined as the capacity which it has of doing work” (Young 1807: 90).

<sup>92</sup> “The reason for believing heat not to be a substance is that it can be generated, so that the quantity of it may be increased to any extent, and it can also be destroyed, though this operation requires certain conditions to be fulfilled” (Young 1807: 93).

trabalho mas define-a como uma equivalência entre calor e trabalho. Borgnakke e Sonntag em 2009 dizem que a energia pode ser transferida como calor.

Um dos aspectos que pode estar na origem desta dificuldade prende-se com as definições de calor e trabalho. Em alguns textos de física, o calor e o trabalho são formas de energia (Maxwell 1871; Saha e Srisvastava em 1935; Wolf 1949; Hund 1956; Breithaupt 1999; Tipler 2000; Çengel e Boles 2002). Mesmo nos casos em que a energia é uma equivalência entre calor e trabalho (Voigt 1903; Preston 1919; Muller e Pouillet 1926; Allen e Maxwell 1962), há uma distinção entre energia, calor e trabalho.

Na hipótese apresentada nesta dissertação para a biologia, iremos ver que estes conceitos são equivalentes. Mas em primeiro lugar vamos fazer uma breve síntese histórica da evolução do conceito.

### **3.1. Breve história**

Energia significa etimologicamente actividade. O termo energia era usado na linguagem comum do século XVIII.

Em 1807, Thomas Young usou energia para definir uma grandeza, a massa vezes o quadrado da velocidade. E segundo ele, esta definição tinha como finalidade evitar o uso do termo força para duas grandezas, a massa vezes o quadrado da velocidade e a massa vezes a velocidade.<sup>93</sup>

---

<sup>93</sup> “The term energy may be applied, with great propriety, to the product of the mass or weight of a body, into the square of the number expressing its velocity. [. . .] This product has been denominated the living or ascending force, since the height of the body’s vertical ascent is in proportion to it; and some have considered it as the true measure of the quantity of motion; but although this opinion has been very universally rejected, yet the force thus estimated well deserves a distinct denomination” (Young 1807: 78-9).

Na primeira metade do século XIX, o termo energia aparece várias vezes nos textos de ciência com o sentido de actividade. Seebeck usa-o nas lições de 1821;<sup>94</sup> Ampère também fala de energia.<sup>95</sup> Mayer usa o termo em diversos contextos como energia dos efeitos mecânicos,<sup>96</sup> energia dos processos de oxidação,<sup>97</sup> energia do calor ou da radiação do calor.<sup>98</sup> Thomson usa-o como nota de rodapé num artigo de 1849 sobre a teoria de Carnot.<sup>99</sup>

Porém, apesar desta diversidade do uso do termo energia, ele é pela primeira vez definido no contexto da temática calor e movimento por Thomson em 1851.

Em 1853, William Rankine distingue energia potencial ou latente e energia actual ou sensível<sup>100</sup> que posteriormente é designada por actual ou dinâmica porque associada ao movimento. Thomson e Tait substituíram a energia actual por energia cinética em 1862. A razão desta mudança reside no facto de, segundo os autores, por um lado, energia cinética indicar a forma na qual a energia se revela, o movimento;<sup>101</sup> por outro, a sua grandeza ser calculada em função da massa e da velocidade do

---

<sup>94</sup> “Aus meinen Untersuchungen [...] hatte sich ergeben, daß die Intensität des Magnetismus dieser Ketten in geradem Verhältniß zu der Energie der durch den feuchten Leiter begründeten chemischen Action stehe“ (Seebeck 1822-23: 265).

<sup>95</sup> “[...] ce qu’il est mis en action par une pile de Volta, dont on peut augmenter l’énergie à volonté en augmentant le nombre et l’étendue des plaques” (Ampère 1822 : 60).

<sup>96</sup> “Wenn für die kleine Raumabstände und Geschwindigkeiten die Energie der mechanischen Effekte, den ausgezeichneteren chemischen Kräften gegenüber, sehr in den Hintergrund treten [...]” (Mayer 1845 : 28);

<sup>97</sup> “[...] einen Einfluss, durch den im allgemeinen die Energie des Oxydationsprocesses erhöht“ (1845, p. 79); „die einzelnen Blutkörperchen nehmen mit verstärkter Energie den Sauerstoff auf“ (Mayer 1845 : 82).

<sup>98</sup> “L’extrême énergie avec laquelle la chaleur des rayons solaires pénètre des corps transparents, fait voir [...]” (1846, Weyrauch, 1893, p. 265). “Dagegen wächst die diathermane Energie der Strahlen fortwährend, wie die Temperatur der Quelle höher wird [...] dass diese durch ihre ausserordentliche diathermane Energie alle künstlichen Wärmestrahlen bei weitem übertreffen“ (Mayer 1848 : 23-4). „Dieses Erfahrungsgesetz, dass die Raum-durchdringende Energie der Wärmestrahlen im allgemeinen zunimmt,, (Mayer 1848 : 24); „die ausserordentliche diathermane Energie der Sonnenstrahlen“ (Mayer 1848 : 25).

<sup>99</sup> “When "thermal agency" is thus spent in conducting heat through a solid, what becomes of the mechanical effect which it might produce? Nothing can be lost in the operations of nature - no energy can be destroyed" (Thomson 1849: 545).

<sup>100</sup> “All conceivable forms of energy may be distinguished into two kinds; actual or sensible, and potential or latent” (Rankine 1853: 106).

<sup>101</sup> “[...] It had KINETIC or (as it has sometimes been called) actual energy. We prefer the first term, which indicates motion as the form in which the energy is displayed" (Thomson; Tait 1862: 602).

corpo.<sup>102</sup> Thomson e Tait definem a energia cinética como a metade do produto da massa pelo quadrado da velocidade,  $\frac{1}{2}mv^2$ .

### 3.2. Energia potencial e energia cinética

O conceito moderno de energia potencial desenvolveu-se a partir da ideia de *momentum*. Jean Buridan (1295-1358) na sua teoria de *ímpetus* introduziu a noção de que a medida verdadeira do movimento de um objecto não era apenas a velocidade mas o produto da velocidade pela quantidade de matéria, *quantitas materiae*.<sup>103</sup> Posteriormente este conceito foi substituído pelo de massa. Johannes Kepler (1618) introduziu o conceito de massa inercial mas ainda existia uma confusão entre peso, *quantitas materiae* e massa. Após Jean Richer ter descoberto que o peso variava com a localização no planeta (1671), Newton explicou e distinguiu peso e massa invariante.<sup>104</sup>

A ideia de Buridan foi aceite embora modificada por Galileu que a designou por momento e Descartes que falou em quantidade de movimento. Mas era a lei da conservação do momento que era vigente, a quantidade de movimento, *momentum* total, do universo permanece inalterável. A ideia da conservação divina de uma quantidade dinâmica embora baseada na imutabilidade da matéria estática.<sup>105</sup>

---

<sup>102</sup> “Kinetic energy depends on motion; and observation shows that its amount in each case is calculable from the mass which moves and the velocity with which it moves” (Thomson; Tait 1862: 602).

<sup>103</sup> “Jean Buridan (c1295-c1358), in his impetus theory, introduced the prescient notion that the true measure of the motion of an object was not speed alone, but the product of speed and quantity of matter (*quantitas materiae*)” (Hecht 2003: 486).

<sup>104</sup> “After Jean Richer inadvertently discovered (1671) that weight varied with location on the planet, Newton explain that observation, insightfully distinguishing between weight and unvarying mass” (Hecht 2003: 486).

<sup>105</sup> “(...) the total momentum (i.e., quantity of motion) of the universe persists unchanged and will continue to be preserved forever. That jot of speculative nonphysics would blossom into the all-important law of conservation of momentum and capture the scientific imagination of the age. The very idea of the divine conservation of a dynamical quantity, though it had its roots in the immutability of static matter, transcended the ordinary realm of scientific discourse” (Hecht 2003: 487).

Newton nos *Principia* (1687) definiu o *momentum* como o produto da massa pela velocidade. Newton refere-se ao produto da massa pela velocidade quer como quantidade de movimento quer como *momentum*.<sup>106</sup>

Christian Huygens introduziu o produto da massa pelo quadrado da velocidade,  $mv^2$ . Formulou a lei da conservação do momento da colisão elástica.

Gottfried Leibniz (1646-1716) baseou-se na ideia de Huygens e mostrou que para um corpo em queda,  $mv^2$  era proporcional ao produto do peso pela altura de Galileu. Designou  $mv^2$  pela *vis viva* para distingui-la da *vis mortua* ou força estática do equilíbrio.<sup>107</sup>

Foi Thomson em 1851 que introduziu o termo energia na temática calor e movimento. Gustave Coriolis (1829) usou  $\frac{1}{2}mv^2$ , conceito hodierno de energia cinética na mecânica newtoniana. No final do século XIX, muitos cientistas substituíram a *vis viva* por energia cinética, um termo introduzido em 1862 por Thomson e Tait.<sup>108</sup>

Lazare Carnot, pai de Sadi Carnot, em 1783 e 1803 distinguiu entre força viva,  $mv^2$ , e o produto do peso pela altura que designou por força viva latente.<sup>109</sup>

Robert Mayer (1842) e Hermann von Helmholtz (1847) formularam o princípio da conservação da energia. Helmholtz posteriormente adoptou o termo de William Rankine de energia potencial em 1853 e estabelece uma proporcionalidade entre energia potencial e energia actual.<sup>110</sup> Rankine introduziu a distinção entre energia potencial e actual em 1853.

---

<sup>106</sup> “(...) Newton refers to mass x velocity on one page as *quantity of motion* and another as *momentum*” (Hecht 2003: 487).

<sup>107</sup> “Gottfried Leibniz (1646-1716) picked up on Huygens`idea and showed (1686) that, for a falling body,  $mv^2$  was proportional to Galileo`s product of weight and height. Writing in Latin, he called  $mv^2$  the *vis viva* or “living force” to distinguish it from the *vis mortua*, the “dead” or static force of equilibrium” (Hecht 2003: 487).

<sup>108</sup> “Em 1862 Thomson e Tait publicam um artigo intitulado *Energia* na revista *Good Words*. (...) Apesar de divulgatório, o artigo introduziu uma novidade, a expressão “energia cinética”” (Coelho 2006: 88).

<sup>109</sup> “Lazare Carnot (father of Sadi Carnot of thermodynamic fame) distinguished between *living force* ( $mv^2$ ) and the product of weight and height, which he called *latent living force*” (Hecht 2003: 488).

<sup>110</sup> “If the change whereby potential energy has been developed be exactly reversed, then as the potential energy disappears, the actual energy which had previously disappeared is reproduced” (Rankine 1853: 106).

Hecht em 2003 colocou a questão: o que é a energia potencial? Será ela real tal como a energia cinética? A energia cinética ou energia do movimento é em física um conceito real porque associada a uma grandeza mensurável, o movimento.

Há uma distinção na literatura entre energia actual ou energia do movimento, energia cinética, e energia do repouso ou energia potencial. A energia potencial é definida como a possibilidade de se tornar energia cinética.

Com a equivalência entre massa e energia de Einstein de 1907<sup>111</sup> há uma modificação nestes conceitos, mas este não é um assunto a ser tratado na presente dissertação .

### 3.3. Definições de energia

Em 1872, na *Theory of Heat* de Maxwell, a energia de um corpo é definida como a sua capacidade de realizar trabalho.<sup>112</sup> Maxwell não diz categoricamente que o calor é uma forma de energia mas que devemos entender como tal porque obtemos calor através de trabalho.<sup>113</sup> Maxwell mostra que a energia negativa é realmente impossível e que o calor não pode ser uma substância.<sup>114</sup>

---

<sup>111</sup> “This is Einstein’s first use of the phrase “the equivalence of mass and energy””(Einstein 1989: 428).

<sup>112</sup> “the energy of a body may be defined as the capacity which it has of doing work” (Maxwell 1872: 90).

<sup>113</sup> “son for believing heat to be a form of energy is that heat may be generated by the application of work, and that for every unit of heat which is generated a certain quantity of mechanical energy disappears” (Maxwell 1872: 93).

<sup>114</sup> “The reason for believing heat not to be a substance is that it can be generated, so that the quantity of it may be increased to any extent, and it can also be destroyed, though this operation requires certain conditions to be fulfilled” (Maxwell 1872: 93).

Em 1879, Oliver Lodge criticou a definição da energia como a capacidade de realizar trabalho pelo seguinte.<sup>115</sup> Diz-se que um corpo tem alguma energia mas isto não significa necessariamente que ele pode realizar trabalho.<sup>116</sup> A energia é uma transferência.

Em 1887, Planck diz que a energia não pode ser localizada num sistema<sup>117</sup> e como tal não pode ser uma substância.

Em 1894, Hertz criticou o conceito de energia como uma substância.<sup>118</sup> Ele argumenta que a quantidade de uma substância é uma quantidade positiva enquanto que a energia potencial de um sistema pode ser negativa.<sup>119</sup> Assim, a energia não pode ser considerada uma substância porque ela contém propriedades que contradizem o conceito de substância.

Na *Thermodynamik* de 1903, Voigt entende energia como capacidade de trabalho do corpo.<sup>120</sup> A energia é entendida como uma equivalência. Ele formula uma equação que designa por equação generalizada da energia considerando como formulação exacta da proposição a equivalência entre calor e trabalho.<sup>121</sup>

---

<sup>115</sup> “This definition of energy, as the effect produced in a body by an act of work, is not so simple as the usual one—‘the power of doing work’ but this latter definition seems a little unhappy” (Lodge 1879: 279).

<sup>116</sup> “energy is power of doing work in precisely the same sense as capital is the power of buying goods. [...] money is a power of buying goods. It does not, however, necessarily confer upon its owner any buyingpower, because there may not be any accessible person to buy from; and if there be, he may have nothing to sell. Just so with energy: it usually [...] confers upon the body possessing it a certain power of doing work, which power it loses when it has transferred it” (Lodge 1879: 279).

<sup>117</sup> “die Unbestimmtheit liegt dann im Begriff der Energie, man kennt den Platz nicht, den man ihr anweisen soll, und hat auch kein Mittel, ihn zu finden” (Planck 1887: 117).

<sup>118</sup> “Mehrere ausgezeichnete Physiker versuchen heutzutage, der Energie so sehr die Eigenschaften der Substanz zu leihen, daß sie annehmen, jede kleinste Menge derselben sei zu jeder Zeit an einen bestimmten Ort des Raumes geknüpft und bewahre bei allem Wechsel desselben und bei aller Verwandlung der Energie in neue Formen dennoch ihre Identität” (Hertz 1894: 25–26).

<sup>119</sup> “Die Menge einer Substanz ist eine notwendig positive Größe; die in einem System enthaltene potentielle Energie scheuen wir uns nicht, als negativ anzunehmen” (Hertz 1894: 26).

<sup>120</sup> “Entzieht man dem Körper die an ihm aufgewandte und in der ursprünglichen Form verschwundene Arbeit oder Wärme nicht in Form von Wärme oder Arbeit, so kommt sie eben der Arbeitsfähigkeit, der Energie des Körpers zu gute“ (Voigt 1903: 78).

<sup>121</sup> “Die so verallgemeinerte Energiegleichung kann als die exakte Formulierung des Satzes von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit gelten“ (Voigt 1903: 78).

Em 1908, Ostwald publica *Die Energie*. Na introdução lê-se: “a energia encarna o verdadeiro real”. É o real porque é actuante no que acontece e é real porque constitui o conteúdo dos acontecimentos.<sup>122</sup>

Preston na *Theory of Heat* de 1919, diz que a nova ciência da termodinâmica é baseada em dois princípios fundamentais, ambos relacionados com a conversão do calor em trabalho. O primeiro destes princípios é o princípio de equivalência de Joule, conhecido como primeira lei da termodinâmica, e afirma uma proporcionalidade entre calor e trabalho. E acrescenta que esta noção é retirada da teoria dinâmica do calor segundo a qual o calor é uma forma de energia.<sup>123</sup>

Na 11ª edição do *Lehrbuch der Physik* de Müller e Pouillet de 1926 o termo crucial da energia é a equivalência. A primeira lei da termodinâmica é entendida como uma equivalência entre calor e trabalho mecânico.<sup>124</sup>

Saha e Srisvastava no *A Treatise on Heat* de 1935 falam na transformação de uma forma de energia em outra porque é impossível conceber uma máquina que crie energia a partir do nada e produza movimento perpétuo.<sup>125</sup>

Wolf nos *Grundzüge der Physik* de 1949 a primeira lei da termodinâmica é dada quantitativamente pela equação: a variação da energia interna é igual à soma da variação de calor e da variação das formas que não são calor.<sup>126</sup> Também é impossível o movimento perpétuo. Há várias formas de energia e o calor é uma delas.

---

<sup>122</sup> “Die Energie ist daher in allen realen oder konkreten Dingen als wesentlicher Bestandteil enthalten, der niemals fehlt, und insofern können wir sagen, daß in der Energie sich das eigentlich Reale verkörpert. Und zwar ist die Energie das Wirkliche in zweierlei Sinn. Sie ist das Wirkliche insofern, als sie das Wirkende ist; wo irgend etwas geschieht, kann man auch den Grund dieses Geschehens durch Kennzeichnung der beteiligten Energien angeben. Und zweitens ist sie das Wirkliche insofern, als sie den Inhalt des Geschehens anzugeben gestattet” (Ostwald 1908: 5).

<sup>123</sup> “The modern science of thermodynamics is based on two fundamental principles, both of which relate to the conversion of heat into work. The first of these is the principle of equivalence established by Joule, and is represented algebraically by the equation  $W = JH$ . This principle, which is known as the first law of thermodynamics, asserts that when work is spent in producing heat, the quantity of work spent is directly proportional to the quantity of heat generated [ . . . ] This conception is derived from the dynamical theory, according to which heat is regarded as a form of energy” (Preston 1919: 667).

<sup>124</sup> “Die am engsten an die unmittelbare Erfahrung sich anschließende Formulierung des ersten Hauptsatzes, die von jeder Hypothese, etwa über die Natur der Wärme frei ist, besagt daher einfach: Wärme und mechanische Arbeit sind äquivalent” (Müller; Pouillet 1926: 109).

<sup>125</sup> “It follows from a result of human experience which may be stated in this form:- "It is impossible to design a machine which will create energy out of nothing and produce perpetual motion. Energy can only be transformed from one form to the other."” (Saha ; Srisvastava 434).

<sup>126</sup> “ $U_2 - U_1 = Q + A$ . Dies soll heißen, daß der Unterschied der inneren Energie nach der Energiezufuhr von außen,  $U_2$ , gegenüber dem Wert  $U_1$  von vorher gerade gleich der in den Körper neu

Hund na *Theoretische Physik* de 1956 começa com a definição de calor substância.<sup>127</sup> Posteriormente mostra que há fenómenos que não podem ser compreendidos pelo calor substância<sup>128</sup> e fala na ideia de calor movimento e do calor como uma forma de energia.<sup>129</sup>

Allen e Maxwell em *A Text-book of Heat* de 1962 dizem que Joule estabeleceu experimentalmente o princípio de equivalência entre calor e trabalho em 1843 e que quando tal relação exacta é estabelecida por experiência pode-se considerar a hipótese do calor como forma de energia.<sup>130</sup>

Na 25/26ª edição da *Physik* de Westphal de 1970 a energia é definida como reserva de trabalho.<sup>131</sup> A energia seria capacidade de trabalho mas descreve um estado enquanto o trabalho refere-se a um acontecimento no tempo.<sup>132</sup>

Hudson e Nelson dizem em 1982 que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. Esta expressão conhecida como a lei da conservação

---

hineingesteckten Energie sein muß. Diese wird dabei noch aufgespalten dargestellt in Form einer eventuellen Wärmemenge Q und irgendeiner sonstigen Energie A der eben charakterisierten Art, die nicht Wärme ist [...] Diese Gleichung ist der erste Hauptsatz der Thermodynamik in quantitativer Form“ (Wolf 1949: 272).

<sup>127</sup>“Wärme ist also (zunächst) eine Substanz wie Materiemenge“ (Hund 1956: 28).

<sup>128</sup> “Es gibt nun Erscheinungen, die mit der Vorstellung der Wärme als Substanz nicht erfaßt werden: die Erzeugung von Wärme durch den elektrischen Strom, die Entstehung von Wärme bei Reibung [ . . . ]” (Hund 1956: 49).

<sup>129</sup> “Die genauere Untersuchung dieser Erscheinungen führte zu der Ansicht, daß Wärme eine Energieform sei. Zunächst führte sie zu der Ansicht, Wärme sei Bewegung der kleinsten Teile der Körper und damit eine Form von Bewegungsenergie (F. Mohr 1837); später zu der Ansicht, Wärme sei eine Form der Energie [ . . . ] (R. Mayer 1842)” (Hund 1956: 49-50).

<sup>130</sup> “J. P. Joule was the first to establish on a satisfactory experimental basis the Principle of Equivalence. This principle may be expressed by saying that when exchange occurs between work and heat, the ratio of the exchange is fixed” (p. 284). “When such an exact relation between mechanical energy and heat has been established by experiment, it is not difficult to take a further step by introducing the hypothesis that heat is itself a form of energy, so that in the exchanges considered there is a transmutation from one form of energy to another” (Allen; Maxwell 1962: 285).

<sup>131</sup> “In einem Körper, an dem Verschiebungs- oder Beschleunigungsarbeit verrichtet wurde, ist also ein vom Betrage dieser Arbeit abhängiger Vorrat an Arbeit aufgespeichert. Man nennt ihn die Energie des Körpers, und diese ist – als gespeicherte Arbeit – mit dieser gleichartig“ (Westphal 1970: 38).

<sup>132</sup> “Da Energie Arbeitsfähigkeit, also latente, aufgespeicherte Arbeit ist, so messen wir sie in den gleichen Einheiten wie die Arbeit [...] Man muß indessen zwischen Energie und Arbeit begrifflich unterscheiden. Energie beschreibt einen Zustand, Arbeit ist ein zeitlich ablaufender Vorgang“ (Westphal 1970: 39).

da energia teria por base a experiência.<sup>133</sup> Eles acrescentam que a energia não é uma substância mas uma quantidade.<sup>134</sup>

Para Keller, Gettys e Skove na *Physics: classical and modern* de 1993, calor e trabalho são energias transferidas entre o sistema e o ambiente.<sup>135</sup> Calor é energia transferida entre o sistema e o ambiente devido a uma diferença de temperatura entre ambos enquanto que trabalho é energia transferida entre o sistema e o ambiente mas independente da diferença de temperatura entre ambos.

Cutnell e Johnson na 4ª edição da *Physics* de 1997, referem-se ao princípio da conservação da energia como: a energia não pode ser criada nem destruída, apenas convertida de uma forma noutra.<sup>136</sup> O calor é “energia que flui”.<sup>137</sup>

Na 11ª edição do *Lehrbuch der Experimentalphysik* de Bergmann e Schaefer de 1998, lê-se: ninguém sabe o que a energia realmente é”.<sup>138</sup> Energia e trabalho são distinguidos da seguinte forma. Fala-se em trabalho se a energia é transportada e em energia se ela não está em movimento ou está ligada a um corpo móvel.<sup>139</sup>

Breithaupt em 1999 define energia como a capacidade de realizar trabalho.<sup>140</sup> A energia existe em diferentes formas podendo ser transformada de uma forma

---

<sup>133</sup> “Thus, energy can only be changed from one form to another; it cannot be created or destroyed. This conclusion, based on experiment, is known as the law of conservation of energy” (Hudson; Nelson 1982: 95).

<sup>134</sup> “Energy is an extremely important concept in physics. Although it appears in many different forms, it is not a physical substance, but a calculated quantity” (Hudson; Nelson 1982: 95).

<sup>135</sup> “Heat is energy transferred between a system and its environment because of a temperature difference between them [ . . . ] Work is energy transferred between a system and its environment by means independent of the temperature difference between them” (Keller; Gettys; Skove 1993: 423).

<sup>136</sup> “The principle of conservation of energy  
Energy can neither be created nor destroyed, but can only be converted from one form to another” (Cutnell; Johnson 1997: 177).

<sup>137</sup> “Definition of Heat  
Heat is energy that flows from a higher-temperature object to a lower-temperature object because of the difference in temperatures” (Cutnell; Johnson 1997: 359).

<sup>138</sup> “Definition der Energie. Dabei stoßen wir gleich auf eine Schwierigkeit: Niemand weiß, was Energie wirklich ist. Der Physiker befindet sich dabei fast im selben Dilemma wie der Laie. [...] Er [der Energiesatz] besagt, daß sich bei keinem bisher in der Natur beobachteten Vorgang die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems verändert hat” (Bergmann; Schaefer 1998: 135).

<sup>139</sup> “Der Begriff der Energie ist keineswegs nur ein anderes Wort für Arbeit. Erst wenn Energie in ganz bestimmter Weise transportiert wird, sprechen wir von Arbeit. Wenn sie dagegen ruht oder mit einem bewegten Körper fest verbunden ist, nennen wir sie schlicht Energie” (Bergmann; Schaefer 1998: 136).

<sup>140</sup> “Energy is defined as the capacity to do work” (Breithaupt 1999: 157).

noutra.<sup>141</sup> A energia pode ser transferida de um corpo para outro por dois métodos, sendo calor e trabalho definidos como energia transferida por cada um dos métodos.<sup>142</sup>

Tipler na *Physik* de 2000, define energia como a capacidade de realizar trabalho.<sup>143</sup> A energia pode aparecer em diferentes formas como energia potencial e cinética. Calor é definido como a energia que passa de um corpo para outro.<sup>144</sup>

Dransfeld, Kienle e Kalvius na 9ª edição da *Physik* de 2001, começam por dizer que não sabemos responder à questão “o que é a energia”.<sup>145</sup> A energia não pode ser produzida nem aniquilada mas permanece constante num sistema fechado.<sup>146</sup>

Na *Thermodynamics* de Çengel e Boles de 2002, a termodinâmica é definida como a ciência da energia.<sup>147</sup> Mas os autores salientam a dificuldade em definir energia que dizem que pode ser definida como a capacidade de causar mudanças.<sup>148</sup> O calor é definido como a forma de energia que é transferida entre dois sistemas devido a uma diferença de temperatura.<sup>149</sup> O trabalho como a transferência de energia associado a uma força.<sup>150</sup> O trabalho e o calor estão ligados a processos e não a um

---

<sup>141</sup> “Energy exists in different forms” “Energy can be transformed from any one form into other forms. Whenever energy changes from one form into other forms, the total amount of energy is unchanged. This general rule is known as the principle of conservation of energy” (Breithaupt 1999: 157).

<sup>142</sup> “Energy is the capacity of a body to do work. Energy can be transferred from one body to another by two methods:

1. Work is energy transferred by means of a force moving its point of application.
2. Heat is energy transferred by means other than a force. A temperature difference is said to exist between two bodies if heat transfer between the two bodies could occur” (Breithaupt 1999: 376).

<sup>143</sup> “Der Begriff der Energie [...] beschreibt die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten” (Tipler 2000: 129).

<sup>144</sup> “Wärme ist die Energie, die von einem Körper auf einen anderen aufgrund einer Temperaturdifferenz übergeht” (Tipler 2000: 539).

<sup>145</sup> “Hier stellt sich die Frage “Was ist eigentlich Energie?” Doch wir können sie, ähnlich der nach dem Wesen der Kraft, nicht beantworten” (Dransfeld; Kienle; Kalvius 2001: 109).

<sup>146</sup> “Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sondern bleibt in jedem abgeschlossenen System konstant. (Erfahrungstatsache!)” (Dransfeld; Kienle; Kalvius 2001: 109).

<sup>147</sup> “Thermodynamics can be defined as the science of energy” (Çengel; Boles 2002: 2).

<sup>148</sup> “Although everybody has a feeling of what energy is, it is difficult to give a precise definition for it. Energy can be viewed as the ability to cause changes” (Çengel; Boles 2002: 2).

<sup>149</sup> “Heat is defined as the form of energy that is transferred between two systems (or a system and its surroundings) by virtue of a temperature difference” (Çengel; Boles 2002: 124).

<sup>150</sup> “work is the energy transfer associated with a force acting through a distance” (Çengel; Boles 2002: 126-7).

estado.<sup>151</sup> Assim, diz-se que os sistemas possuem energia mas não calor ou trabalho.<sup>152</sup>

Nos *Fundamentals of Physics* de Halliday, Resnick e Walker de 2003, é assinalada a dificuldade em definir energia.<sup>153</sup> O trabalho é definido como energia que é transportada em que o sentido de transporte é analogado a uma transferência bancária electrónica.<sup>154</sup>

Na 11ª edição da *Physics* de Sears e Zemansky, de Young e Freedman de 2004, a lei da conservação da energia é dada pela equação seguinte: a soma das variações da energia cinética, potencial e interna é constante.<sup>155</sup> A energia não é criada ou destruída mas apenas muda de forma.<sup>156</sup>

Na 7ª edição do *Fundamentals of Thermodynamics* de Borgnakke e Sonntag de 2009, a energia pode ser armazenada num sistema e transferida como calor, por exemplo, de um sistema para outro.<sup>157</sup>

---

<sup>151</sup> “Both are associated with a process, not a state” (Çengel; Boles 2002: 127).

<sup>152</sup> “Systems possess energy, but not heat or work” (Çengel; Boles 2002: 127).

<sup>153</sup> “In der Tat ist der Begriff der Energie so weit gefasst, dass eine einfache Definition nur sehr schwer zu geben ist. Zunächst einmal ist Energie eine skalare Größe, die mit dem Zustand eines oder mehrerer Objekte in Zusammenhang steht. Diese Definition ist jedoch zu vage, als dass sie eine echte Hilfe sein könnte“ (Halliday 2003: 152).

<sup>154</sup> “”Arbeit“ ist also Energie, die übertragen wird [...] Der Begriff “übertragen“ kann auch irreführend sein. Er bedeutet nicht, dass etwas Materielles in das Objekt hineinoder aus dem Objekt herausfließt; diese Energieübertragung darf man sich also nicht wie fließendes Wasser vorstellen. Sie entspricht vielmehr dem elektronischen Geldtransfer zwischen zwei Bankkonten: Die Zahl in dem einen Konto steigt an, während die Zahl in dem anderen Konto kleiner wird, obwohl zwischen den beiden Konten kein materieller Gegenstand ausgetauscht wird“ (Halliday 2003: 154).

<sup>155</sup> “This remarkable statement is the general form of the law of conservation of energy. In a given process, the kinetic energy, potential energy, and internal energy of a system may all change. But the sum of those changes is always zero” (Young; Freedman 2004: 264).

<sup>156</sup> “When we expand our definition of energy to include internal energy, Eq. [ . . . ] says that energy is never created or destroyed; it only changes form” (Young; Freedman 2004: 264).

<sup>157</sup> “Energy can be stored within a system and can be transferred (as heat, for example) from one system to another” (Borgnakke; Sonntag 2009: 19).

### 3.4. Energia, trabalho e calor

Como já referido, há diversas maneiras de definir energia mas não há unanimidade na definição do próprio conceito. A definição de energia em física é, de acordo com Webster, a capacidade de realizar trabalho<sup>158</sup>. O trabalho é, segundo James Clerk Maxwell (1831-1879), a transferência de energia de um sistema para outro.<sup>159</sup> Mas esta definição de energia é controversa. Lodge em 1879 criticou esta definição de energia. Também podemos questionar a energia como a capacidade de realizar trabalho por duas razões: a) a energia libertada transforma-se em outra forma de energia, uma particularização da energia; b) a energia potencial é a possibilidade de se tornar energia cinética.

Hecht em 2003 coloca a questão se a energia potencial é ou não real como a energia cinética. Usando noções relativistas, a energia potencial é igualmente uma forma de movimento relativo a um referencial e ela é tão real quanto a energia cinética.

Segundo esta linha de raciocínio, podemos pensar que há uma equivalência entre energia potencial e energia cinética. Assim, não há transformação da energia mas sim uma equivalência entre os fenómenos. Um exemplo. A energia química e a energia física são equivalentes. Há uma equivalência entre os diferentes acontecimentos intrínsecos a cada fenómeno mas não uma transformação.

Podemos colocar a questão se a distinção entre energia potencial e energia cinética não é meramente terminológica, dependendo da sua interacção com o restante universo.

Nos textos de física, a energia total de um sistema é a soma da energia potencial e da energia cinética. A energia potencial transforma-se em energia cinética e vice-versa.

Vamos dar um exemplo. O exercício é resolvido de acordo com os manuais; seguidamente resolve-se o exercício com a explicação pela equivalência. Porém, há que distinguir dois sentidos de equivalência. O equivalente, quando uma coisa é igual

---

<sup>158</sup> “Energy, according to Webster, is the capacity to do work” (Chalmers 1963: 1).

<sup>159</sup> “work, therefore, is a transfer of energy from one system to another” (Maxwell 1888: 56).

a outra; a equivalência causa-efeito, quando toda a causa é igual a todo o efeito. Como exemplo do equivalente,  $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ . Como exemplo da equivalência causa-efeito, todas as formas de energia da fase inicial e final constam na equivalência,  $E_{Pi} + E_{Ki} = E_{Pf} + E_{Kf}$ . No exemplo que vamos apresentar, o equivalente coincide com a equivalência causa-efeito.

### Problema

Um corpo com uma massa de 5 Kg é deixado cair de uma altura de 45 m num local onde  $g = 10$  m/s. Calcule a velocidade do corpo ao atingir o solo. Despreze o atrito do ar.<sup>160</sup>

a) Como resolvem nos manuais:

[www.fisica.net/mecanicaclassica/energia\\_mecanica.php](http://www.fisica.net/mecanicaclassica/energia_mecanica.php)

Desprezando a resistência do ar, o sistema é conservativo, logo:

$$E^a_c + E^a_p = E^b_c + E^b_p$$

$$\frac{1}{2}mv_a^2/2 + mgh_a = \frac{1}{2}mv_b^2/2 + mgh_b$$

$$v_a^2/2 + gh_a = v_b^2/2 + gh_b$$

$$0^2/2 + 10 \cdot 45 = v_b^2/2 + 10 \cdot 0$$

$$450 = v_b^2/2$$

$$v_b = \sqrt{900}$$

$$v_b = 30 \text{ m/s}$$

O trabalho total realizado pelo corpo durante a queda é  $mgh$  (a velocidade inicial do corpo é zero e este está sujeito a uma força de gravidade constante  $mg$ ).

Pelo teorema trabalho-energia,  $mgh$  é igual à energia cinética,  $\frac{1}{2}mv^2$ .

---

<sup>160</sup> “Uma esfera de massa 5 Kg é abandonada de uma altura de 45 m num local onde  $g = 10$  m/s. Calcular a velocidade do corpo ao atingir o solo. Despreze os efeitos do ar” ([www.fisica.net/mecanicaclassica/energia\\_mecanica.php](http://www.fisica.net/mecanicaclassica/energia_mecanica.php))

Pelo princípio da conservação da energia

$$mgh(a) + \frac{1}{2}mv^2(a) = mgh(b) + \frac{1}{2}mv^2(b)$$

a= corpo em repouso antes da queda

b= corpo em movimento durante a queda

A energia total é a soma da energia potencial ( $mgh$ ) e da energia cinética ( $\frac{1}{2}mv^2$ ) e é sempre constante (Serway 2006: 129). Durante a queda a energia potencial transforma-se em energia cinética.

$$5000 \cdot 10.45 + 0 = 0 + \frac{1}{2}5000 \cdot v^2$$

$$10.45 = \frac{1}{2}v^2$$

$$v = \sqrt{900}$$

$$v = 30 \text{ m/s}$$

b) Se considerarmos a equivalência entre os fenômenos, a equivalência entre energia potencial e energia cinética, então basta-nos considerar uma delas em cada caso. Não há transformação da energia potencial em energia cinética mas sim uma equivalência entre ambas:

$$mgh(a) = \frac{1}{2}mv^2(b)$$

$$5000 \cdot 10.45 = \frac{1}{2}5000v^2$$

$$10.45 = \frac{1}{2}v^2$$

$$v = \sqrt{900}$$

$$v = 30 \text{ m/s}$$

A explicação é a seguinte. No exemplo apresentado apenas se observa a queda do corpo. Com a explicação pela equivalência não somos obrigados a ver no fenômeno, o que não é observável, a transformação da energia potencial em energia cinética.

Neste exemplo, o equivalente coincide com a equivalência causa-efeito. O corpo tem velocidade inicial no primeiro membro da equação, a qual deve constar na

energia cinética. Todas as formas da energia inicial e final são equivalentes. Há uma equivalência entre as grandezas da causa e do efeito. Como a energia cinética inicial é zero e a energia potencial final também é zero, o equivalente é dado por  $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ .

Tal como já foi referido, nos textos de física, a energia é definida como a capacidade de realizar trabalho (Maxwell 1872; Voigt 1903; Westphal 1979; Breithaupt 1999; Tipler 2000). Mas esta definição é insuficiente e imprecisa para caracterizar o conceito. Lodge em 1879 criticou esta definição, definindo energia como uma transferência. Noutros casos, a energia é entendida como uma equivalência entre calor e trabalho (Voigt 1903; Preston 1919; Muller e Pouillet 1926; Allen e Maxwell 1962). Mas, fala-se do trabalho como uma grandeza positiva associada a uma força exterior que actua num corpo.

Com a explicação pela equivalência, energia não é a capacidade de realizar trabalho porque a energia potencial é equivalente à energia cinética e não está associada ao trabalho tal como definido nos textos de física.

O conceito de energia, trabalho e calor é tema de debate e discordância entre os físicos.

Segundo Enrico Fermi, Nobel da Física em 1938:” calor e trabalho mecânico são equivalentes; eles são dois aspectos diferentes da mesma coisa, designadamente, energia”.<sup>161</sup> Mas para Fermi a energia é uma coisa, há uma substancialização da energia. Por outro lado, Feynman diz que a energia não é um objecto concreto mas sim um princípio matemático.<sup>162</sup> A noção de energia como uma substância foi também criticada por Planck em 1887; Hertz em 1894; Hudson e Nelson em 1982.

A energia é definida como substância (Fermi 1937; Hund 1956), como capacidade de realizar trabalho (Maxwell 1872; Voigt 1903; Westphal 1979; Breithaupt 1999; Tipler 2000), como uma transferência (Lodge 1879; Keller, Gettys e Skove 1993; Breithaupt em 1999; Tipler 2000; Çengel e Boles 2002; Borgnakke e Sonntag 2009), como um princípio matemático (Feynman 1966) ou como uma equivalência (Voigt 1903; Preston 1919; Muller e Pouillet 1926; Allen e Maxwell

---

<sup>161</sup> “Heat and mechanical work are equivalent; they are two different aspects of the same thing, namely, energy” (Fermi 1937: 15).

<sup>162</sup> “The law is called the *conservation of energy*. It states that there is a certain quantity, which we call energy, that does not change in the manifold changes which nature undergoes. That is a most abstract idea, because it is a mathematical principle (...) It is not a description of a mechanism, or anything concrete (Feynman 1966: 4-1).

1962). Mas mesmo nos casos em que há uma equivalência, a energia é distinta de calor ou trabalho. E com a explicação pela equivalência, energia, calor e trabalho são conceitos equivalentes e a sua distinção é meramente terminológica. Logo, o sentido de equivalência é diferente.

Também nos textos de física, a energia libertada transforma-se em outra forma de energia, o calor ou o trabalho (Wolf 1949; Hund 1956; Allen e Maxwell 1962; Beithaupt 1999; Çengel e Boles 2002).

Segundo Borgnakke e Sonntag em 2009, o trabalho positivo é o trabalho realizado por um sistema, a energia que sai do sistema, enquanto que o trabalho negativo é o trabalho realizado num sistema, a energia que entra no sistema.<sup>163</sup> O trabalho é uma forma de energia em trânsito, energia que é transferida. E a energia e o trabalho são disjuntivos, ou seja, a energia que entra no sistema é o trabalho negativo e a energia que sai do sistema é o trabalho positivo.

Para Keller, Gettys e Skove em 1993, o calor é definido como uma transferência de energia devido a uma diferença de temperatura entre o sistema e o ambiente enquanto que o trabalho é uma transferência de energia independente da diferença de temperatura.

Mas em toda a diversidade de definições de energia, calor e trabalho são confundidos com energia.

Nesta discordância na definição do conceito de energia, os conceitos de trabalho e de calor tornam-se importantes para uma melhor compreensão do conceito de energia, mas este assunto irá ser tratado numa outra oportunidade.

---

<sup>163</sup> “(...) work done by a system, such as that done by a gas expanding against a piston, is positive, and work done on a system, such as that done by a piston compressing a gas, is negative. Thus, positive work means that energy leaves the system, and negative work means that energy is added to the system” (Borgnakke; Sonntag 2009: 83).

## 4. Modelo explicativo das analogias

### 4.1. Conservação da energia e transformabilidade das forças

A ideia de Mayer da conservação da energia e da passagem e transformabilidade das forças ou energias tem base na teoria de Lavoisier acerca do calórico e do movimento do calórico como explicação das sensações de frio e calor no organismo vivo. No *Traité Élémentaire de Chimie*, Lavoisier diz que sem movimento não há sensação.<sup>164</sup> Ele diz que a sensação de frio ou de calor se deve à passagem ou movimento do calórico entre o organismo e os corpos vizinhos. Lavoisier diz que o calor considerado como uma sensação é apenas o efeito produzido pelos órgãos pelo movimento ou passagem do calórico dos corpos circundantes. Ele dá um exemplo. Quando tocamos um corpo frio com a mão, o calórico que tende sempre a manter os corpos em equilíbrio, passa da nossa mão para o corpo dando-nos a sensação de frio e vice-versa. Se o corpo e a mão estão à mesma temperatura então não temos nenhuma sensação de frio ou calor porque não há passagem do calórico.<sup>165</sup>

É legítimo pensar que Mayer se baseou no princípio da conservação da massa ou também designada por matéria de Lavoisier para a formulação do seu princípio da conservação da energia,<sup>166</sup> em 1840, aquando da sua viagem a Java. A passagem do calórico entre os corpos vizinhos para manter os corpos em equilíbrio é analogada à transformação de um tipo de força ou forma de energia em outra. Na tripulação de Java, a cor mais clara do sangue venoso era devida a um menor consumo de oxigénio

---

<sup>164</sup> “In general, we receive impressions only in consequence of motion, and we might establish it as an axiom, That, WITHOUT MOTION; THERE IS NO SENSATION” (Lavoisier 1790: 20).

<sup>165</sup> “ This general principle applies very accurately to the sensations of heat and cold: When we touch a cold body, the caloric which always tends to become in equilibrio in all bodies, passes from our hand into the body we touch, which gives us the feeling or sensation of cold. The direct contrary happens, when we touch a warm body, the caloric then passing from the body into our hand, produces the sensation of heat. If the hand and the body touched be of the same temperature, or very nearly so, we receive no impression, either of heat or cold, because there is no motion or passage of caloric; and thus no sensation can take place, without some correspondent motion to occasion it” (Lavoisier 1790 : 20).

<sup>166</sup> “Lavoisier was one of the first to show conclusively that the most familiar of all chemical transformations, combustion of matter, is generally oxidation, i.e., the combination of the material with that part of the ambient air to which he gave the name oxygen” (Holton 1985: 230).

ou menos transformação da força ou energia química em trabalho mecânico ou energia física para manter a temperatura do corpo.

A expressão da teoria de Mayer está contida na ideia de transformabilidade das forças nos artigos de 1842 e 1845. O raciocínio é o seguinte. Para se conseguir algo há que se realizar algo, ou nada surge do nada.

A ideia de transformação das forças ou energia que tem por base uma identidade entre a causa e o efeito é analogada à de passagem do calórico entre os corpos vizinhos de Lavoisier. Mas em Mayer o calórico é substituído pela noção de transformação, de movimento.

## **4.2. Modelos explicativos hodiernos**

### **4.2.1. Modelo explicativo nos fenômenos físico-químicos**

Com a equivalência entre matéria e energia proposta por Albert Einstein  $E=mc^2$  em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e com base na equivalência da energia potencial e da energia cinética, podemos dizer que se mantém a lei da conservação da *vis viva* agora substituída por  $E=mc^2$ . De acordo com o teorema de Noether, a energia conserva-se sempre num sistema termodinâmico relativamente a um sistema de referência porque as leis da física mantêm-se as mesmas durante o tempo. Uma pessoa em repouso num avião em movimento tem uma energia cinética igual a zero relativamente ao avião mas tem uma energia cinética diferente de zero relativamente à Terra. Assim, há uma equivalência entre a massa inercial ou em repouso e a massa relativista. É como se o corpo estivesse sempre em repouso relativamente a um referencial e em movimento relativamente a outro. Também há que ter em conta a massa gravitacional porque um corpo na Terra está submetido à força da gravidade. Há uma equivalência entre a massa gravitacional e a massa relativista e inercial relativamente a um referencial.

Outro aspecto é que Mayer distingue matéria de força. A primeira como as causas ponderáveis e a segunda como as causas imponderáveis. Ele duvida da convertibilidade dos elementos químicos, da matéria, uns nos outros ou da sua redução a uma única substância ao contrário das forças. Há uma transformabilidade das forças e Mayer fala de uma única força.

Com a teoria atômica da química formulada em 1808 por John Dalton, sabe-se que todos os elementos químicos são compostos por pequenas partículas chamadas átomos.<sup>167</sup>

Com o modelo da estrutura atômica proposto por Niels Bohr em 1940, o átomo é constituído por um núcleo rodeado por camadas de electrões designadas órbitas. Com a mecânica quântica, sabe-se todas as estruturas que existem no mundo são constituídas por quarks e leptões.<sup>168</sup> Com a cromodinâmica quântica, sabe-se que existem diferentes tipos de quarks de acordo com cores diferentes.<sup>169</sup>

Assim, a matéria também é divisível em unidades mais simples. A nível subatômico, os elementos químicos são reduzidos a elementos mais simples.

Foi derrubada a cisão entre a química e a física, entre a matéria e a força e aproximamo-nos da intenção inicial de Mayer de uma analogia entre a química e a física.

Outro aspecto é a analogia da combustão do carbono com a fonte de calor animal. De acordo com as noções de astrofísica no século XX, o ciclo do carbono-hidrogénio é uma reacção nuclear de fusão de conversão do hidrogénio em hélio que ocorre nas estrelas maciças com libertação de energia. No interior do Sol, no núcleo do Sol, ocorrem reacções químicas a partir da conversão do hidrogénio em hélio e esta energia libertada é enviada para a Terra e os restantes planetas do sistema solar. Também no organismo vivo dão-se reacções químicas com libertação de energia. Estas reacções químicas dão-se no citoplasma das células, nas mitocôndrias, unidades respiratórias das células, e a energia libertada é enviada a todo o organismo.

---

<sup>167</sup> “(...) teoria de Dalton: i) todo elemento químico é composto de pequenas partículas chamadas átomos” (Caruso 2006: 35).

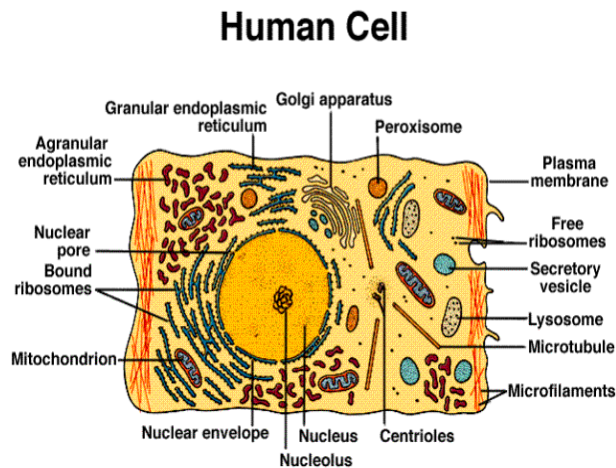
<sup>168</sup> “The pion,, neutron, proton ... are not part of the ultimate pieces of the puzzle; they join nuclei and atoms as one more manifestation of bound-state structures that exist in a world made of quarks and leptons” (Halzen 1984: 2).

<sup>169</sup> “(...) introducing a new property or quantum number for quarks (not for leptons!): “color”. We suppose that quarks come in three primary colors: red, green, and blue, denoted symbolically by R, G, and B, respectively” (Halzen 1984: 5)

#### 4.2.2. Modelo explicativo para organismos vivos

Os organismos vivos são constituídos por órgãos, os órgãos por tecidos e estes por células. A célula é composta por um núcleo rodeado pela membrana celular ou citoplasmática. O citoplasma é o espaço compreendido entre o núcleo e a membrana celular e nele existem os organelos celulares. O organelo celular que nos interessa aqui referir é a mitocôndria, a unidade respiratória celular, onde ocorre o processo químico de metabolização da glucose no ciclo do ácido cítrico ou ciclo de Krebs. Na membrana celular ocorre o processo fisiológico da bomba electrogénica de sódio-potássio, a base físico-química dos fenómenos biológicos.

Como veremos, estes mecanismos estão ligados porque a troca iónica entre o sódio e o potássio ao nível da membrana celular converte o ADP ou adenosina difosfato em ATP ou adenosina trifosfato, a fonte de energia do ser vivo, no ciclo de Krebs.

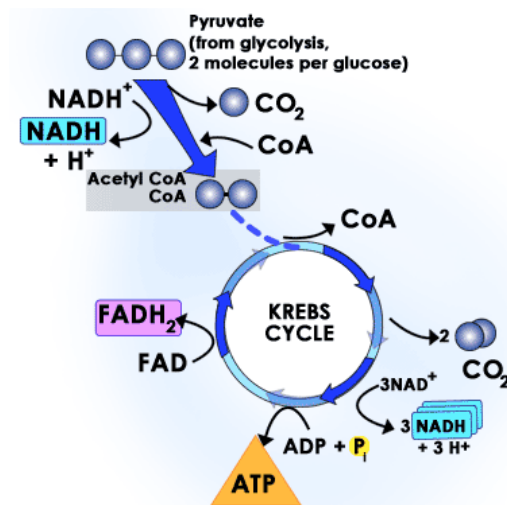


fog.ccsf.cc.ca.us. Cf. Guyton 2006: 22

A ideia de Mayer da transformabilidade da energia mecânica (trabalho) em calor e vice-versa tem paralelo com as teorias actuais da produção do calor animal. A fonte de calor ou energia animal é o ATP ou adenosina trifosfato produzido no ciclo do ácido cítrico ou ciclo de Krebs nas mitocôndrias.

No *Textbook of Medical Physiology* de Arthur Guyton e John Hall de 2006, a energia libertada na oxidação completa dos carboidratos, proteínas e gorduras é chamada energia livre da oxidação dos alimentos que é usada para converter o ADP em ATP. Os produtos finais da digestão ou metabolismo dos carboidratos no tubo gastrointestinal são principalmente a glucose (80%), a frutose e a galactose, estas duas últimas convertidas em glucose no fígado.

O ciclo de Krebs é uma cadeia de reacções químicas do metabolismo da glucose cujos produtos finais são o ATP e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).



sparknotes.com. Cf. Guyton 2006: 833

No processo químico de metabolização da glucose no ciclo de Krebs, há realização de trabalho que se converte em calor sob a forma de ATP. O calor sob a forma de ATP libertado no ciclo de Krebs é reutilizado num novo ciclo de Krebs, ou seja, o calor converte-se em energia mecânica (trabalho).

Aqui o termo transformação e convertibilidade são sinónimos e significam uma equivalência. Há uma equivalência entre os acontecimentos. A razão da transformação do calor em energia mecânica (trabalho) e vice-versa é uma equivalência entre fenómenos, a cadeia de reacções químicas do metabolismo da glucose no ciclo de Krebs e o trabalho realizado.

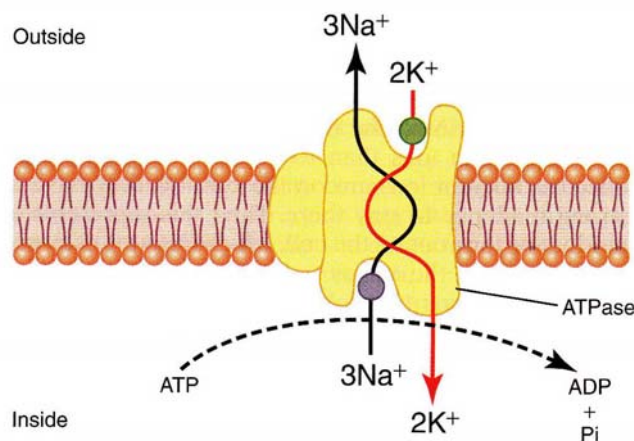
#### **4.2.2.1 A bomba de sódio-potássio**

A base dos fenómenos biológicos é físico-química e radica no processo fisiológico da bomba de sódio-potássio electrogénica, uma troca iónica entre o sódio e o potássio e o cálcio. O mecanismo da bomba de sódio-potássio assenta no seguinte. A membrana celular em repouso tem um potencial de repouso negativo de -90 mv no interior da célula.<sup>170</sup> A diferença de potencial entre o interior e o exterior da célula acciona a bomba de sódio-potássio havendo uma permuta de sódio e potássio na membrana celular com entrada de 2 iões de potássio e saída de 3 iões de sódio. Esta maior saída de iões de sódio leva a um potencial de membrana mais negativo no interior da célula, ou seja, o potencial de membrana passa de 86 mv no processo de difusão passiva para 90 mv com o transporte activo da bomba sódio-potássio. Neste momento desencadeia-se o potencial de acção em duas fases. A membrana torna-se muito permeável ao sódio com entrada de iões sódio do interior da célula. O interior da célula torna-se positivo. É a fase de despolarização da membrana. Então os canais de sódio começam a fechar e abrem-se os canais de potássio havendo saída de potássio do interior da célula até um novo potencial de membrana negativo. É a fase de repolarização da membrana. O cálcio troca com o potássio tal como o sódio. Com

---

<sup>170</sup> “The resting membrane potential of large fibers when not transmitting nerve signals is about -90 millivolts. That is, the potential inside the fiber is 90 millivolts more negative than the potential in the extracellular fluid on the outside of the fiber” (Guyton 2006: 59).

a entrada de sódio na membrana celular o ADP ou adenosina difosfato converte-se em ATP.<sup>171</sup>



Guyton 2006: 53

A energia dita química até Ostwald, Nobel da Química em 1909, é então designada de energia físico-química que está na base dos fenômenos biológicos.

Na contração muscular, a entrada de íons sódio no interior da célula é acompanhada por íons cálcio na fase de despolarização da membrana. Estes íons cálcio ligam-se a uma proteína da fibra muscular, a miosina, originando a contração muscular. Um processo físico-químico com produção de ATP, a fonte de energia que é usada para a síntese de um transmissor excitatório, a acetilcolina que excita a membrana da fibra muscular.

Também no sistema nervoso há este processo físico-químico na membrana das células nervosas, os neurónios, mais precisamente na fenda sináptica entre os neurónios, com produção de ATP, a fonte de energia dos fenômenos psíquicos.

A energia psíquica tem uma base físico-química. Os fenômenos psíquicos como a memória entre outros têm uma base físico-química.

Há uma equivalência entre os fenômenos físico-elétricos da bomba de sódio-potássio, os fenômenos químicos das trocas iônicas e conversão do ADP em ATP e os fenômenos biológicos da contração muscular e os processos psíquicos.

---

<sup>171</sup> Cf. Guyton 2006: 45-71.

A razão desta equivalência é o mecanismo da bomba sódio-potássio que está na base dos fenómenos biológicos.

#### 4.2.2.2. A interacção iónica

Cada ião é uma partícula carregada constituída por um núcleo rodeado por camadas de electrões.

As partículas carregadas interagem de maneira diferente com as outras partículas porque estão sujeitas à força electromagnética ao contrário das partículas não carregadas. As partículas carregadas vão interagir com os electrões e os núcleos das outras partículas resultando outras partículas compostas. Como exemplo, o ião sódio ( $\text{Na}^+$ ), um catião, interage com o ião cloro ( $\text{Cl}^-$ ), um anião, resultando o composto iónico cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ):



Há átomos que perdem electrões como os catiões (baixa afinidade de ionização) e outros que adquirem electrões como os aniões (alta afinidade electrónica).

Os átomos com 1, 2 e 3 electrões na última camada perdem electrões para os com 5, 6 e 7 electrões na última camada. Quanto maior a diferença de electronegatividade entre os átomos mais forte a ligação iónica.

A molécula de cloreto de sódio tem uma energia resultante da interacção do sódio e do cloro.

Na bomba de sódio-potássio, a permuta de iões sódio e potássio converte uma molécula de ADP em ATP, uma cadeia de reacções químicas no ciclo de Krebs cujos produtos finais são o dióxido de carbono e o ATP.

### 4.2.3. A interpretação da cor do sangue

Mayer estabelece uma analogia entre a cor do sangue venoso e o consumo de oxigénio aquando da sua viagem a Java em 1840.

#### 4.2.3.1. Breve história

O gérmen do princípio da conservação da energia assentou no seguinte raciocínio. Se o sangue venoso nos trópicos é mais claro que nos climas mais frios então há mais oxidação ou consumo de oxigénio nos segundos para manter a temperatura do corpo. A ideia de Mayer baseava-se na teoria do oxigénio e da combustão de Lavoisier. Lavoisier no *Traité Élémentaire de Chimie* faz uma analogia entre a combustão dos elementos químicos e a respiração.

Lavoisier verificou inicialmente que o óxido de ferro quando aquecido se transformava em ferro, libertando um gás com as mesmas propriedades que o “ar do fogo” e que designou inicialmente por “ar altamente respirável”,<sup>172</sup> a parte respirável do ar e depois por oxigénio, base com capacidade para formar ácidos em combinação com outras substâncias. A união desta base com o calórico designa-se de gás oxigénio.<sup>173</sup>

O oxigénio foi isolado em 1774 por Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) e Joseph Priestley (1733-1804) mas ainda designado por “ar desflogisticado”. Eles explicavam a combustão à luz da teoria do flogisto lançada no início do século XVIII por Georg Stahl (1660-1734), como o resultado da libertação do flogisto contido nos

---

<sup>172</sup> “At first I named it highly respirable air, to which has since been substituted the term of vital air” (Lavoisier 1790: 36-37).

<sup>173</sup> “We have given to the base of the former, or respirable portion of the air, the name of oxygen(...) because, in reality, one of the most general properties of this base is to form acids, by combining with many different substances. The union of this base with caloric we term oxygen gas” (Lavoisier 1790: 51-52).

corpos e sua união com o “ar do fogo”. A cor escura do sangue venoso era devida ao maior teor em flogisto e a cor vermelha do sangue arterial à retirada do flogisto pelo ar dos pulmões.

Lavoisier concluiu que o fenómeno da combustão deveria ser interpretado ao contrário da teoria do flogisto.<sup>174</sup> As substâncias que se queimavam, em vez de libertarem o flogisto que era um elemento imaginário que não deveria existir, se oxidavam, ou seja, absorviam oxigénio.

Ele teve a intuição que o calor animal se devia a uma combustão interna na qual era consumido o oxigénio do ar inspirado e libertado o “ar fixo” que designou de gás azótico e depois de gás carbónico (CO<sub>2</sub>). Ele atribuiu a cor vermelha do sangue arterial ao oxigénio e a cor escura do sangue venoso ao gás carbónico.

Pierre Laplace (1749-1827), matemático francês e amigo de Laplace, submeteu esta hipótese a uma análise matemática e concluiu que o calor produzido era proporcional ao consumo de oxigénio.

O erro de Lavoisier, demonstrado por Lagrange, foi o de acreditar que a combustão se dava apenas nos pulmões, onde o sangue entrava em contacto com o ar inspirado e que o calor gerado nos pulmões seria distribuído pelo sangue a todo o corpo.

Joseph Lagrange (1736-1813), matemático e astrónomo francês, demonstrou com base em cálculos matemáticos, que se a combustão ocorresse apenas nos pulmões, o calor libertado seria tão intenso que lesaria todo o parênquima pulmonar. Ele defendeu a ideia de que o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono se dava em todos os órgãos e que nos pulmões apenas se dava a troca de gases. Facto que se veio a ser confirmado posteriormente e que é sustentado hoje em dia.

Gustav Magnus (1802-1870), químico, físico e fisiologista alemão, doseou pela primeira vez o oxigénio e o dióxido de carbono no sangue arterial e venoso, comprovando que as trocas de oxigénio e dióxido de carbono não se dão apenas no pulmão mas sim em todo o organismo na intimidade dos tecidos. Facto que está de acordo com a teoria actual. As trocas de oxigénio e dióxido de carbono dão-se ao nível dos capilares dos tecidos. A cor escura do sangue venoso era devida ao teor em dióxido de carbono pelo fenómeno da oxidação e a cor vermelha viva do sangue arterial ao de oxigénio.

---

<sup>174</sup> Lavoisier abandonou a teoria do flogisto mas manteve a teoria do calórico ou do calor-substância.

Mayer observou em 1840 aquando de uma viagem à Indonésia, Java, que a cor do sangue venoso das pessoas dos trópicos era mais clara que nos climas mais temperados. Ele pensou que este facto se devia à menor diferença de temperatura entre o organismo e o ambiente nos trópicos e portanto menos combustão do oxigénio e menos consumo de oxigénio para manter o organismo quente. Daí a cor mais clara do sangue venoso. Uma equivalência entre o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono. Facto que estava em contradição com a confusão existente na época acerca da cor do sangue. Durante a terceira e quarta décadas do século XIX, os fisiologistas atribuíam ao fígado a função de remover o dióxido de carbono em excesso no sangue através da bilis. Esta teoria assentava na ideia de que o sangue nos climas quentes era mais escuro do que nos climas mais frios porque havia menos oxigenação do sangue e menos libertação de dióxido de carbono do sangue (Caneva 1993). Isto devido por um lado à ideia assente na diferença de temperatura do organismo e do ambiente não relacionando com a fonte do calor animal, ou seja, a não existência de uma equivalência entre o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono; por outro lado à ideia de que o fígado era o órgão que eliminava o dióxido de carbono do sangue venoso através da bilis e nos climas quentes havia mais bilis no sangue venoso e mais dióxido de carbono. Como tal nos climas quentes havia menos oxigenação do sangue e menos libertação de dióxido de carbono. Deste modo, as observações de Mayer foram surpreendentes. Ele esperava observar o sangue venoso nos trópicos mais escuro do que nos climas mais frios.

#### **4.2.3.2. Transporte de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> no sangue e tecidos e a cor do sangue**

A cor mais clara ou mais escura do sangue resulta do teor de oxigénio (O<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ligado a uma molécula de hemoglobina, respectivamente a oxihemoglobina e a carboxihemoglobina.

Vamos analisar o processo de transporte do O<sub>2</sub> e do CO<sub>2</sub> no sangue e tecidos e a sua ligação à molécula de hemoglobina.

A difusão do oxigénio e do dióxido de carbono de um compartimento a outro depende da diferença da pressão parcial de oxigénio ( $PO_2$ ) ou facção de oxigénio ligado à hemoglobina e da  $PCO_2$  entre os diferentes compartimentos.<sup>175</sup> Assim, nos pulmões, o oxigénio passa dos alvéolos pulmonares para os capilares pulmonares porque a  $PO_2$  nos alvéolos é superior à dos capilares na inspiração. Ao nível dos capilares dos tecidos do restante organismo, o oxigénio do sangue arterial passa dos capilares para os tecidos devido a uma mais elevada  $PO_2$  nos primeiros que nos segundos. Conversamente, o oxigénio metabolizado em dióxido de carbono nos tecidos pela metabolização dos alimentos passa dos tecidos para os capilares porque a pressão parcial de  $CO_2$ , a  $PCO_2$ , é mais elevada nos tecidos que nos capilares. O  $CO_2$  liga-se à hemoglobina e é transportado sob a forma de carboxihemoglobina até aos pulmões. Nos pulmões, a  $PCO_2$  no sangue venoso é superior que nos alvéolos e o dióxido de carbono passa para os alvéolos pulmões e é expelido na expiração.

Nas situações de hiperóxia ou hiperoxémia há elevado teor de oxihemoglobina no sangue arterial que difunde para os capilares dos tecidos. Para que o elevado teor de oxigénio ligado à hemoglobina passe dos tecidos para os capilares e daí às veias, ao sangue venoso, é necessário que haja pouco metabolismo do oxigénio em dióxido de carbono ao nível dos tecidos. Isto acontece por exemplo quando há pouco aporte de alimentos ou na presença de uma patologia gastrointestinal por má absorção intestinal. Outra situação de elevado teor de oxigénio no sangue é a anemia em que há diminuição da hemoglobina e mais oxigénio livre no sangue.

---

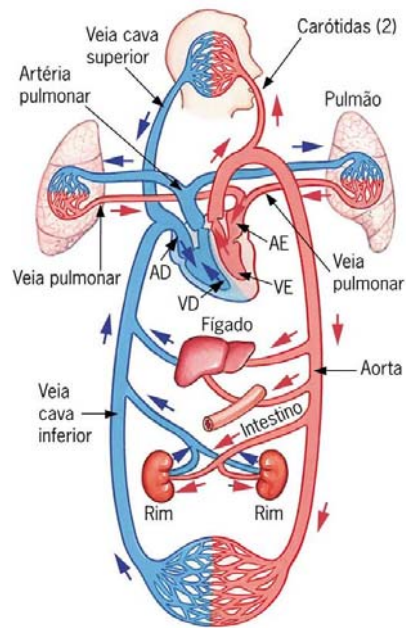
<sup>175</sup> “(...) we pointed out that gases can move from one point to another by diffusion and that the cause of this movement is always a partial pressure difference from the first point to the next” (Guyton 2006: 502).

#### 4.2.3.3. Modelo explicativo hodierno

Atribui-se a cor mais clara do sangue ao teor do oxigénio da hemoglobina ou ligação de um átomo de oxigénio à molécula de hemoglobina resultando a oxihemoglobina. Nos climas mais frios, há mais consumo de alimentos e portanto mais metabolismo da glucose no ciclo de Krebs com produção de ATP, a fonte de calor do organismo vivo. Há libertação de uma molécula de dióxido de carbono que se liga à molécula de hemoglobina, resultando uma molécula de carboxihemoglobina que confere a cor mais escura ao sangue.

Este processo químico de metabolização da glucose ocorre nas mitocôndrias e as trocas gasosas de oxigénio e dióxido de carbono dão-se ao nível dos capilares dos tecidos. Nos pulmões, dão-se apenas as trocas gasosas de oxigénio que vem do ar inspirado e dióxido de carbono que é expelido no ar expirado sem haver metabolismo da glucose dos alimentos. O ar inspirado rico em oxigénio vai para os pulmões onde se dão as trocas gasosas ao nível dos alveolos pulmonares com a produção de dióxido de carbono que é expelido no ar expirado.

O sangue venoso contendo carboxihemoglobina resultante das trocas gasosas ao nível dos capilares dos tecidos e proveniente do metabolismo da glucose no ciclo de Krebs, entra na aurícula direita, sai do ventrículo direito e é levado pela artéria pulmonar para o pulmão onde é oxigenado, ou seja, o oxigénio do ar inspirado liga-se à molécula de hemoglobina por troca com o dióxido de carbono resultando uma molécula de oxihemoglobina. O sangue arterial oxigenado é transportado pelas veias pulmonares para a aurícula esquerda e depois passa ao ventrículo esquerdo e através da artéria aorta é levado a todo o organismo.



biogilde.wordpress.com. Cf. Guyton 2006: 162

As diferenças da cor do sangue venoso radicam numa equivalência entre o consumo de oxigênio e a produção de dióxido de carbono. Como referido, esta equivalência foi estabelecida por Theodore Saussure na sua obra *Recherches chimiques sur la vegetation* em 1804 acerca da germinação dos vegetais.

Quanto menor for o metabolismo da glucose no ciclo de Krebs, menos moléculas de carboxihemoglobina são formadas e transportadas no sangue venoso e por isso menos escuro é o sangue. É o que se passa nos trópicos, onde há menos consumo de alimentos e menos diferença de temperatura entre o organismo e o ambiente havendo menos metabolismo da glucose.

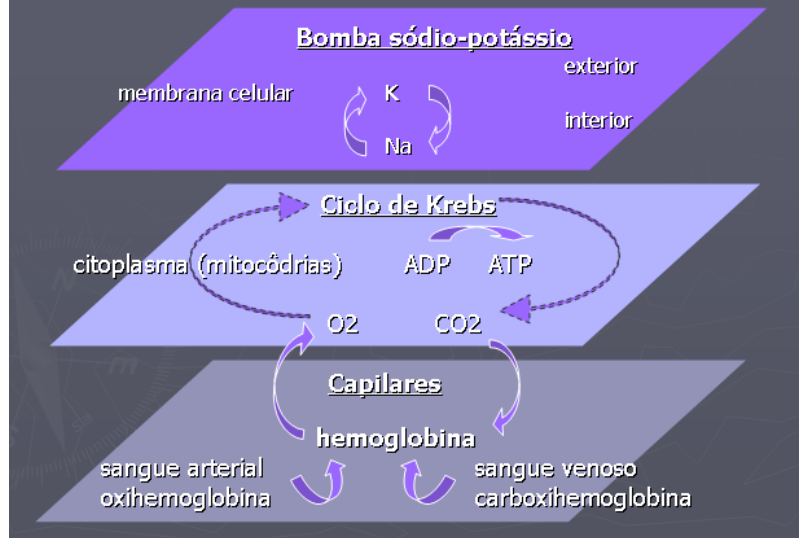
#### 4.2.3.4. Modelo teórico integrativo para organismos vivos

Podemos propor uma hipótese de modelo teórico para organismos vivos dum ponto de vista hodierno que pode ser esquematizado em três níveis integrativos:

1º nível	membranas celulares (bomba sódio-potássio)
2º nível	mitocôndrias (ciclo de Krebs)
3º nível	capilares

Estes três níveis estão em planos diferentes e traduzem uma cadeia de acontecimentos. Nas membranas celulares dão-se as trocas iónicas entre o sódio e o potássio. Com a entrada de sódio na célula, o ADP converte-se em ATP no ciclo de Krebs, nas mitocôndrias, e há libertação de uma molécula de dióxido de carbono. O dióxido de carbono vai ligar-se a uma molécula de hemoglobina ao nível dos capilares dos tecidos formando a carboxihemoglobina. Esta molécula vai ser transportada pela veia cava para o coração e pulmões onde ve dão as trocas gasosas entre o oxigénio do ar inspirado e o dióxido de carbono que é eliminado na expiração. O oxigénio liga-se à hemoglobina formando a oxihemoglobina que é transportada pela artéria aorta a todo o organismo. Nos capilares dos tecidos, o oxigénio vai entrar num novo ciclo de Krebs.

# Modelo explicativo para organismos vivos dum ponto de vista hodierno



## 5. Modelo interpretativo da teoria de Mayer

A tese de Mayer acerca da conservação da energia assenta em equivalências entre diferentes domínios, o inorgânico e o orgânico, que estão patentes nas suas analogias. Ele não explica como e porquê estes fenómenos ocorrem.

### 5.1. Modelo teórico e fenómenos

Analisando a teoria de Mayer relativamente à cor mais clara do sangue venoso nos trópicos há que ter em conta dois aspectos, o modelo teórico conceptual e a sua verificação nos fenómenos.

No livro de 45, Mayer faz alusão a uma passagem de Autenrieth no seu *Handbuch der menschlichen Physiologie* de 1801 que diz que também no ser humano a cor do sangue venoso aproxima-se da cor vermelha do sangue arterial no verão.<sup>176</sup> Esta alusão a esta passagem de Autenrieth tem como finalidade uma fundamentação da sua teoria da cor mais clara do sangue venoso nos trópicos. Mas aqui há que ter em conta dois aspectos. Por um lado, o cariz teórico desta tese que para se aproximar dos fenómenos seria necessário investigar da sua constância em todos os indivíduos sujeitos às mesmas condições; por outro lado, este modelo teórico é condicionado por uma multiplicidade de factores, particularmente quando há patologia associada como no caso da tripulação de Java. Assim, é legítimo pensar que a tese de Autenrieth assenta num modelo teórico e vejamos porquê. Como foi referido, a cor mais clara do sangue depende do teor de oxigénio ligado à hemoglobina. Teoricamente, quanto menor for a diferença de temperatura entre o organismo e o ambiente menos

---

<sup>176</sup> “Wir erinnern hier an die Temperatur- und Farbenverhältnisse der kaltblutigen Thiere, der Winterschlafer, des Fetus, der Blausuchtigen, an die helle Rothe des Blutes, die Thackrah beobachtete, als er einem Patienten im warmen Bade zur Ader liess, endlich an die Farbenverschiedenheit des venosen Blutes in den verschiedenen Jahreszeiten, wie sie seit Autenrieth bekannt ist” (Mayer 1845: 86).

metabolismo da glucose é requerido para manter a temperatura do corpo. Assim, mais clara é a cor do sangue venoso proveniente dos capilares após o metabolismo da glucose nos tecidos periféricos. Se tivermos em conta os fenómenos do organismo vivo a situação é mais complexa. No organismo vivo interferem diversos factores fisiopatológicos que podem condicionar esta lógica do modelo teórico, particularmente quando há patologia associada como no caso da tripulação de Java. Nesta situação, a hiperoxémia venosa é periférica e resulta quer de um mecanismo compensatório a nível renal quer de uma diminuição da hemoglobina no sangue periférico. Seguidamente, vamos analisar algumas patologias nos trópicos e ver o condicionamento do modelo teórico às alterações fisiopatológicas.

Quanto ao modelo teórico, a cor mais clara do sangue venoso nos trópicos deve-se: a) a um menor consumo de oxigénio ou oxidação; b) a um elevado teor de oxigénio livre no sangue. Pode verificar-se nas seguintes condições: a) menos aporte de alimentos ou situações patológicas que conduzem a um menor metabolismo da glucose dos alimentos; b) menos diferença de temperatura entre o organismo e o ambiente; c) situações de hiperóxia ou hiperoxémia; d) menos teor de hemoglobina no sangue e mais oxigénio livre no sangue particularmente em situações de anemia.

A sua verificação nos fenómenos do organismo vivo, particularmente quando há patologia associada, é mais complexa, uma vez que o organismo é um sistema multifactorial de mecanismos fisiopatológicos assente numa base físico-química.

Para que o sangue venoso seja mais claro há que atender aos seguintes casos: a) o nível em que se realiza a flebotomia; b) situações fisiológicas e patológicas de menor metabolismo da glucose; c) situações fisiológicas e patológicas de hiperóxia ou hiperoxémia; d) situações patológicas nos trópicos.

O raciocínio é o seguinte. O sangue venoso contendo dióxido de carbono ligado à hemoglobina sob a forma de carboxihemoglobina provém dos capilares dos tecidos após o metabolismo da glucose nas células e é transportado até à aurícula direita, ao ventrículo direito e pela artéria pulmonar aos pulmões. Nos pulmões, há a troca de dióxido de carbono com o oxigénio do ar inspirado ao nível dos alvéolos pulmonares.

Relativamente ao nível da flebotomia há a considerar. O metabolismo celular não é igual em todas as células e órgãos. Há uma selecção celular dos nutrientes de acordo com as necessidades das células. Assim, o nível a que se realiza a flebotomia é

importante uma vez que há níveis ou zonas do organismo em que há menos ou mais metabolismo da glucose.

## **5.2. Análise e discussão de diferentes patologias**

No caso da teoria de Mayer, ele diz que a tripulação sofria de uma patologia pulmonar à chegada. Há que analisar as patologias pulmonares nos trópicos que cursam com hiperoxémia venosa. Aqui temos que distinguir sangue arterial e venoso. As patologias pulmonares com hiperóxia ou hiperoxémia pulmonar são alterações na troca gasosa ao nível dos alvéolos pulmonares ou alterações ao nível da difusão alveolo-capilar. E o teor mais elevado de oxigénio da oxihemoglobina está nas veias pulmonares que saem dos pulmões e não na artéria pulmonar que chega aos pulmões proveniente de todo o organismo.

Mas o organismo é um todo e para que exista uma situação de hiperoxémia venosa é necessário que exista diminuição do metabolismo da glucose a nível das células do organismo ou elevado teor em oxigénio livre no sangue. Ou seja, a hiperoxémia venosa é periférica e resulta quer de um mecanismo compensatório do equilíbrio ácido-base a nível renal no primeiro caso quer de uma diminuição da hemoglobina no segundo caso.

Vamos analisar algumas patologias:

a) Em situações de má absorção intestinal como no sprue tropical, a doença cursa com alterações fisiopatológicas como a diarreia que acarreta um desequilíbrio ácido-base e a anemia megaloblástica por déficite de absorção do folato e da cobalamina.<sup>177</sup> A alteração iónica na diarreia acarreta um desiquíbrido entre o teor de hidrogénio e bicarbonato e a uma alteração do pH com um quadro de acidose metabólica. Vamos ver como o organismo reage a estas alterações fisiopatológicas.

---

<sup>177</sup> Cf. Braunwald 2001: 1675-77.

Como foi referido, a base dos fenómenos biológicos é físico-química e radica no processo fisiológico da bomba de sódio-potássio electrogénica, uma troca iónica entre o sódio e o potássio e o cálcio. Relembrando, o mecanismo da bomba de sódio-potássio assenta no seguinte. A membrana celular em repouso tem um potencial de repouso negativo de -90 mv no interior da célula. A diferença de potencial entre o interior e o exterior da célula acciona a bomba de sódio-potássio havendo uma permuta de sódio e potássio na membrana celular com entrada de 2 iões de potássio e saída de 3 iões de sódio. Esta maior saída de iões de sódio leva a um potencial de membrana mais negativo no interior da célula, ou seja, o potencial de membrana passa de 86 mv no processo de difusão passiva para 90 mv com o transporte activo da bomba sódio-potássio. Neste momento desencadeia-se o potencial de acção em duas fases. A membrana torna-se muito permeável ao sódio com entrada de iões sódio do interior da célula. O interior da célula torna-se positivo. É a fase de despolarização. Então os canais de sódio começam a fechar e abrem-se os canais de potássio havendo saída de potássio do interior da célula até um novo potencial de membrana negativo. É a fase de repolarização. O cálcio troca com o potássio tal como o sódio. Com a entrada de sódio na membrana celular o ADP ou adenosina difosfato converte-se em ATP.

O mecanismo da acidose e alcalose metabólicas é compensado pelo rins. Um aumento do hidrogénio na acidose metabólica diminui a actividade da bomba de sódio-potássio com menos entrada de iões potássio na célula e menos saída de iões sódio com mais concentração de potássio no espaço extracelular<sup>178</sup> resultando um potencial de membrana menos negativo para desencadear o potencial de acção. A acidose retarda a bomba de sódio-potássio e a produção de ATP assim como o potencial de acção. É a entrada de iões sódio na célula que converte o ADP em ATP. Há menos oxidação e menos produção de dióxido de carbono.

Na acidose metabólica, o excesso de produção de hidrogénio é compensado por uma maior eliminação deste pelos rins e entrada de bicarbonato com alcalose. A diarreia provoca um desequilíbrio ácido-base com acidose metabólica e diminuição da  $PCO_2$  a nível celular e do sangue venoso. O organismo reage à acidose metabólica com uma hiperventilação acarretando uma alcalose respiratória e diminuição da

---

<sup>178</sup> “(...) one effect of increased hydrogen ion concentration is to reduce the activity of the sodium-potassium adenosine triphosphatase (ATPase) pump. This in turn decreases cellular uptake of potassium and raises extracellular potassium concentration” (Guyton 2006: 366).

PCO<sub>2</sub>. Há uma menor concentração de dióxido de carbono no sangue venoso que sai dos tecidos e mais claro é o sangue venoso. Também o déficit em folato e cobalamina pode originar um quadro de anemia com diminuição da hemoglobina e maior teor de oxigênio livre no sangue. É o que acontece por exemplo no sprue tropical. Assim, a hiperoxemia venosa é periférica e resulta quer de um mecanismo compensatório do equilíbrio ácido-base a nível renal quer de uma diminuição da hemoglobina com elevado teor de oxigênio livre no sangue.

b) Analizemos outra situação com hiperoxemia venosa e patologia pulmonar.

A anemia falciforme que ocorre nos trópicos com alterações a nível pulmonar. A anemia das células falciformes ou drepanocitose ocorre por uma mutação no gene da β-globina originando uma hemoglobina anormal, a HbS, e eritrócitos anómalos, as células falciformes. Neste tipo de anemia há hemólise dos eritrócitos prematuros que são destruídos no baço e microenfartes isquêmicos no baço, sistema nervoso central, ossos, fígado, rins e pulmões.<sup>179</sup> Os enfartes pulmonares originam um quadro de acidose respiratória com aumento da PCO<sub>2</sub>. A nível renal há um quadro de acidose metabólica com diminuição da PCO<sub>2</sub> ao nível celular, capilar e do sangue venoso. O organismo reage à acidose metabólica com uma hiperventilação e alcalose respiratória com diminuição da PCO<sub>2</sub>. Mais uma vez a hiperoxemia venosa é periférica.

Desta análise podemos verificar que uma situação de hiperoxemia venosa por menor consumo da glucose é uma situação periférica. Podemos verificar nos fenómenos. No exemplo da anemia das células falciformes, a hiperoxemia venosa é devida a uma compensação do equilíbrio ácido-base a nível renal.

Também no caso da tripulação de Java havia uma patologia pulmonar com uma infecção respiratória de tipo bronquite (com catarro). A bronquite cursa com acidose respiratória com elevação da PCO<sub>2</sub>. A hiperoxemia venosa resulta de um mecanismo compensatório a nível renal. Também pode existir um síndrome gripal endêmico com bronquite. A gripe origina um quadro geral de astenia e pode estar associada a situação de déficit alimentar por anorexia que pode originar uma anemia por carência alimentar. E na anemia há diminuição da hemoglobina com maior teor de oxigênio livre no sangue.

Estão assim reunidas duas causas de hiperoxemia venosa: a) menor metabolismo da glucose nos tecidos periféricos com menos produção de dióxido de

---

<sup>179</sup> Cf. Braunwald 2001:669.

carbono; b) menos hemoglobina e mais teor de oxigénio livre no sangue. Mais uma vez a hiperoxémia venosa é periférica.

Para verificarmos da aproximação do modelo teórico aos fenómenos do organismo seria necessário investigar todas as situações fisiológicas e patológicas de hiperoxémia venosa. Poderíamos começar por investigar a cor do sangue venoso no verão em indivíduos saudáveis mas nunca podemos descurar a variabilidade individual pela forma idiossincrática de interagir com os diversos factores exteriores. E, como vimos, na tripulação de Java havia um quadro sistémico de gripe com infecção respiratória. Logo, é necessário ter em conta as situações fisiopatológicas que conduzem a uma alteração fisiopatológica no organismo condicionando o modelo teórico.

## Conclusão

Persistem hoje ainda controvérsias quanto à definição do conceito de energia. Nos textos de física, a energia é definida como a capacidade de realizar trabalho e o trabalho como a transferência de uma forma de energia de um sistema para outro.

Atribui-se a descoberta da energia a Mayer, Joule, Helmholtz e Colding. Então o que eles descobriram deve ser a energia.

Este estudo incidiu em dois aspectos. Uma análise do caso de Mayer e a elaboração de uma hipótese de modelo explicativo hodierno para as equivalências que Mayer estabeleceu.

Mayer estabeleceu equivalências entre diferentes grandezas, entre os domínios inorgânico e orgânico. No domínio inorgânico ele estabeleceu equivalência entre calor e movimento, calor e efeito mecânico. O estabelecimento destas equivalências inscreve-se numa metodologia para a compreensão da relação entre os fenómenos, particularmente entre calor e movimento. Mas Mayer não está preocupado em saber a essência do calor. Apenas pretende compreender a relação entre calor e movimento.

Gerald Holton e Stephan Brush falam da convertibilidade da energia em Mayer. Esta tese está incorrecta. Mayer fala da transformabilidade do calor em efeito mecânico e não em convertibilidade. Esta tese é de Joule. O termo energia foi introduzido por Thomson em 1851 e nunca foi utilizado por Mayer.

Gerald Holton, David Cassiday, Thomas Kuhn, James Rutherford, falam de uma influência da *Naturphilosophie* no pensamento de Mayer. Esta tese é historicamente questionável. Mayer diz que *ex nihilo nil fit*, nada vem do nada, tudo é transformação. A causa e o efeito são diferentes formas de um mesmo objecto mas sem serem o mesmo objecto.

As equivalências no domínio orgânico assentam no inorgânico. A equivalência primordial do domínio orgânico, motriz da ideia da conservação da energia, foi entre o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono na respiração dos seres vivos. Esta equivalência já tinha sido proposta por Theodore Saussure acerca da germinação dos vegetais e assenta no processo de combustão das substâncias de Lavoisier.

A hipótese explicativa para as equivalências que Mayer estabeleceu entre os fenómenos assenta num modelo teórico físico-químico e fisiológico para os seres vivos. Este modelo partiu do raciocínio de Mayer acerca da cor do sangue venoso nos trópicos e baseou-se nas teorias hodiernas dos sistemas biológicos.

Podemos dizer que o raciocínio de Mayer está de acordo com as teorias biológicas hodiernas. Porém, há que distinguir entre o modelo conceptual e os fenómenos, uma vez que os organismos vivos são entidades complexas onde confluem diversos factores fisiopatológicos que condicionam o modelo teórico.

O raciocínio de Mayer assenta num modelo teórico. Mayer diz que a cor do sangue venoso nos trópicos é mais clara que nas zonas mais frias porque nestas últimas se consome mais oxigénio para manter a temperatura do corpo. Teoricamente, quanto menor for a diferença de temperatura entre o organismo e o ambiente menos metabolismo da glucose é requerido.

Esta conclusão assenta no seguinte raciocínio. A base dos sistemas biológicos é a bomba electrogénica de sódio-potássio ao nível da membrana celular, com uma permuta de iões sódio e iões potássio. A entrada de iões sódio converte o ADP em ATP no ciclo de Krebs nas mitocôndrias. No ciclo de Krebs liberta-se uma molécula de dióxido de carbono que se liga à hemoglobina ao nível dos capilares formando a carboxihemoglobina que confere a cor mais escura ao sangue. O sangue depois de oxigenado nos pulmões contém uma molécula de oxigénio ligada à hemoglobina sob a forma de oxihemoglobina que confere a cor mais clara ao sangue. E este oxigénio vai reentrar num novo ciclo de Krebs ao nível dos capilares. Assim, quanto menor for o metabolismo da glucose no ciclo de Krebs menos moléculas de dióxido de carbono são libertadas e menos escuro é o sangue.

Na teoria de Mayer há que ter em conta a distinção entre o modelo teórico e os fenómenos. A tripulação de Java sofria de uma patologia pulmonar à chegada. As situações que cursam com hiperoxémia venosa e patologia pulmonar são situações periféricas. As patologias pulmonares com hiperoxémia resultam de uma alteração na difusão alveolo-capilar pulmonar e o oxigénio está nas veias pulmonares que entram na aurícula esquerda. Porém, o sangue sai do ventrículo esquerdo pela artéria aorta para todo o organismo. Assim, uma situação de hiperoxémia venosa existe no sangue venoso após o metabolismo da glucose ao nível dos tecidos periféricos ou em situações de anemia por diminuição da hemoglobina e maior teor em oxigénio livre no sangue.

Esta hipótese explicativa da teoria de Mayer assenta numa equivalência entre o consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono já presente na teoria.

Assim, a energia é uma equivalência entre grandezas. Mas, o que significa o termo energia? Será um objecto concreto, um princípio matemático, uma equivalência entre grandezas? Mas, mesmo neste último caso, qual o fundamento de tais equivalências?

Nos textos de física, a energia é a capacidade de realizar trabalho e o trabalho é a forma de transferência de energia de um sistema a outro. Mas, considerando esta afirmação estamos a particularizar a energia e a descurar a energia potencial que à luz da teoria da relatividade de Einstein é tão real quanto a energia cinética.

Para a definição de energia, torna-se necessário redefinir os conceitos de trabalho, calor e energia. No modelo apresentado nesta dissertação para os sistemas biológicos, a energia é uma equivalência físico-química e fisiológica. O trabalho e o calor são equivalentes e são maneiras diferentes de designar energia de acordo com o referencial de unidades em questão.

Em suma, tal como Feynman refere, a energia não é um objecto concreto. Mas, diferentemente do que Feynman sustenta, não é um princípio matemático. Propomos assim que a energia é uma equivalência entre grandezas cuja natureza é um fenómeno físico-químico e fisiológico nos seres vivos.

## **Bibliografia**

### **Abreviaturas das publicações periódicas**

*Am. J. Phys.* *American Journal of Physics*

*Eur. J. Sci. Educ.* *European Journal of Science Education*

*Int. J. Sci. Educ.* *International Journal of Science Education*

*Phil. Magaz.* *Philosophical Magazine*

*Phys. Educ.* *Physics Education*

*Phys. Teac.* *The Physics Teacher*

*Res. Sci. Tech. Educ.* *Research in Science & Technological Education*

*Sci. Educ.* *Science and Education*

*SSR* *School Scientific Review*

## Obras e artigos

- Allen, H. S; Maxwell, R. S. (1962) *A Text-book of Heat*. London: Macmillan.
- Alonso, Marcelo ; Finn, Edward J. (1996) *Physics*. Harlow (etc): Addison Wesley.
- Ampère, A. M. (1822) “Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques“, *Annales de Chimie et de Physique* 20, 60-74.
- Anderson, G. M. (2005) *Thermodynamics of Natural Systems*. 1ª ed.: 1996. Cambridge: Cambridge University Press.
- Arons, Arnold. B. (1965) *Developments of Concepts of Physics*. Reading, Mass: Addison-Wesley.
- Arons, Arnold B. (1999) “Development of energy concepts in introductory physics courses”, *Am. J. Phys.*, vol. 67, 12, 1999: 1063-1067.
- Autenrieth, Johann (1801) *Handbuch der menschlichen Physiologie*. Tübingen.
- Barbosa, João Paulino Vale; Borges, António Tarciso (2006) “O Entendimento dos Estudantes sobre Energia no início do Ensino Médio”, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 23, 2:182-215.
- Bauman, Robert P. (1992) “Physics that Textbook Writers Usually Get Wrong”, *Phys. Teac.*, vol. 30: 264-269.
- Benenson, Walter; Harris, John; Stocker, Horst; Lutz, Holger (2001) *Handbook of Physics*. New York: Springer.
- Bergmann Ludwig; Schaefer, Clements (1998) *Lehrbuch der Experimentalphysik I*. 11ª ed. Berlin, New York: de Gruyter.
- Beynon, John (1990) “Some myths surrounding energy”, *Phys. Educ.* 25: 314-316.
- Blundell, Stephen J.; Blundell, Katherine M. (2006) *Concepts in Thermal Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- Borgnakke, Clauss; Sonntag, Richard E. (2009) *Fundamentals of Thermodynamics*. Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons.
- Braunwald, Eugene et al. (2001) *Harrison`s Principles of Internal Medicine*. 15<sup>th</sup> ed. New York (etc): McGraw-Hill.

- Breithaupt, Jim (1999) *Physics*. Brasingstoke: Macmillan.
- Bunge, Mario (2000) "Energy: Between Physics and Metaphysics", *Sci. Educ.* 9: 457-461.
- Callen, Herbert B. (1985) *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. New York (etc): John Wiley & Sons.
- Caneva, Kenneth (1993) *Robert Mayer and the Conservation of Energy*. Princeton: Princeton University Press.
- Caruso, Francisco; Oguri, Vitor (2006) *Física Moderna*. Rio de Janeiro: Editora Campus/Elsevier.
- Cassiday, David; Holton, Gerald; Rutherford, James (2002) *Understanding Physics*. New York: Springer.
- Çengel, Yunus A. (1997) *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. Boston (etc): McGraw-Hill.
- Çengel, Y.; Boles, M. (2002) *Thermodynamics*. Boston(etc): McGraw-Hill.
- Chalmers, B. (1963) *Energy*. New York-London: Academic Press.
- Chrisholm, Dennis (1992) "Some energetic thoughts", *Phys. Educ.* 27: 215-220.
- Coelho, Ricardo Lopes (2006) *O Conceito de Energia. Passado e Sentido*. Aachen: Shaker Verlag GmbH/Instituto Rocha Cabral.
- Coelho, Ricardo Lopes (2009) "On the Concept of Energy: How Understanding its History can Improve Physics Teaching", *Sci. Educ.* 18: 961-983.
- Coelho, R. Lopes, Marques M., Homem, T. Rocha (2010) "Introduction of Topics of History of Energy in the Teaching of Physics and Chemistry" in *HIPST - History and Philosophy in Science Teaching - Developed Case Studies* (Projecto do 7. Programa Quadro, a disponibilizar on-line brevemente)
- Cotignola, Maria I.; Bordogna, Clelia; Puente, Graciela; Cappannini, Osvaldo M. (2002) "Difficulties in Learning Thermodynamic Concepts: Are they Linked to the Historical Development of this Field?", *Sci. Educ.* 11: 279-291.
- Cutnell, John; Johnson, Kenneth (1997) *Physics*. Toronto (etc): John Wiley & Sons.
- Cutnell, John D.; Johnson, Kenneth W. (2006) *Essentials of Physics*. Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons, Inc.
- Darnsfeld, K; Kunle, P.; Kalvius, G. M. (2001) *Physik I: Mechanik und Wärme*. 9<sup>a</sup> ed. Munchen/Wien: Oldenbourg.

Doménech, Josep Lluís et al. (2007) "Teaching of Energy Issues : A Debate Proposal for a Global Reorientation", *Sci. Educ.* 16: 43-64.

Douville (1832) *Journal de Chimie Médicale de Pharmacie et de Toxicologie*. Tome Huitième. Paris : Béchét Jeune.

Duit, Reinders (1987) "Should energy be illustrated as something quasi-material?", *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 9, 2:139-145.

Einstein, Albert (1989) *The Collected Papers of...* Vol. 2. The Swiss Years: Writings, 1900-1909. Princeton: Princeton University Press.

Eisberg, Robert M.; Lerner, Lawrence S. (1981) *Physics. Foundations and Applications*. New York (etc): McGraw-Hill.

Farber, Eduard (1954) "The Colour of Venous Blood", *Isis*, 45: 3-9.

Faughn, Jerry S.; Serway, Raymond A. (2006) *Serway's College Physics*. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.

Fermi, Enrico (1937) *Thermodynamics*. New York: Dover, 1956.

Feynman, Richard (1966) *The Feynman Lectures on Physics*. 2<sup>nd</sup> ed. London: Addison Verlag.

Gartenhaus, Solomon (1975) *Physics. Basic principles*. Vol. 1. New York (etc): Holt, Rinehart and Winston.

Gil Perez, Daniel; Carrascosa Alis, Jaime (1985) "Science learning as a conceptual and methodological change", *Eur. J. Sci. Educ.*, vol. 7, 3:231-236.

Grenslade Jr. Thomas B. (2002) "Nineteenth-Century Measurements of the Mechanical Equivalent of Heat", *Phys. Teac.*, vol. 40: 243-248.

Guyton, Arthur; Hall, John (2006) *Textbook of Medical Physiology*. 11<sup>th</sup> ed. Philadelphia: Elsevier.

Halliday, D.; Resnick, R.; Walter, J. (2003) *Fundamentals of Physics*. Hoboken, N J: John Wiley & Sons.

Halzen, Francis; Martin, Alan D. (1984) *Quarks and Leptons: An introductory Course in Modern Particle Physics*. New York (etc): John Wiley & Sons.

Hecht, Eugene (2003) "An Historico-Critical Account of Potential Energy: Is PE Really Real?", *Phys. Teac.* Vol. 41: 486-493.

Hertz, Heinrich (1894) *Die Principien der Mechanik*. Leipzig: J. A. Barth.

Hewitt, Paul G. (2009) *Fundamentos de Física Conceitual*. Porto Alegre: Bookman.

- Hicks, Nancy (1983) “Energy is the capacity to do work-or is it?”, *Phys. Teac.*, 1983: 529-530.
- Holton, Gerald (1985) *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*. Revised by Stephan Brush. Princeton: Princeton University Press.
- Hudson, Alvin; Nelson, Rex (1982) *University Physics*. New York: H. B. Jovanovich.
- Hund, Friedrich (1956) *Theoretische Physik*. Vol. 3. Stuttgart: Teubner.
- Jentsch, Ernest (1916) “Zur Geschichte der Entdeckung Julius Robert Mayer”, *Die Naturwissenschaften* 4, 90-93.
- Keller, Frederick J.; Gettys, W. Eduard; Skove, Malcolm J. (1993) *Physics: classical and modern*. 2 ed. New York (etc): McGraw-Hill.
- Kemp, H. R. (1984) “The concept of energy without heat or work”, *Phys. Educ.* 19: 234-240.
- Kestin, Joseph (1979) *A Course in Thermodynamics*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, vol. 1.
- Kibble, T. W. B.; Berkshire, F. H. (1996) *Classical Mechanics*. London: Longman.
- Kittel, Charles; Knight, Walter D. Ruderman, Malvin A. (1970) *Curso de Física de Berkeley. Volume I Mecânica*. S. Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.
- Kuhn, Thomas (1989) *A Tensão Essencial*. Lisboa: Edições 70 (ed. orig. 1977).
- Lavoisier, Antoine-Laurent (1789) *Traité Élémentaire de Chimie. Présenté Dans Un Ordre Nouveau et d'après les Découvertes Modernes Avec Figures Y2*. Reprints from the collection of the University of Michigan Library, 2009.
- Lavoisier, Antoine-Laurent (1790) *Elements of Chemistry*. New York: Dover, 1965.
- Lavoisier, Antoine-Laurent (1920) *Mémoires sur la respiration et la transpiration des animaux*. Paris : Gauthier-Villars.
- Lehrman, Robert L. (1973) “Energy is not the ability to do work”, *Phys. Teac.*, 1973: 15-18.
- Lindsay, R. B. (1973) *Men of Physics: Julius Robert Mayer, Prophet of Energy*. Oxford: Pergamon Press.
- Lodge, O. J. (1879) “An attempt at a systematic classification of the various forms of energy”, *Phil. Magaz.*, 277-86.
- Martins, Roberto de Andrade (1984) “Mayer e a conservação da energia”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 6: 63-95.

- Mayer, J. R. (1842) “Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur”, *Annalen der Chemie und Pharmazie* 42: 233-40.
- Mayer, J. R. (1845) *Die Organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel*. Heilbronn. (In Mayer 1978).
- Mayer, J. R. (1848 a) *Beiträge zur Dynamik des Himmels*. Heilbronn. (in Mayer 1978).
- Mayer, J. R. (1848 b) “Sur la transformation de la force vive en chaleur, et réciproquement” *Comptes Rendus* 27 : 385-7.
- Mayer, J. R. (1851) *Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Warm.* Heilbronn. (In Mayer 1978).
- Mayer, J. R. (1978 ) “Sur la production de la lumière et de la chaleur du soleil “, in *Die Mechanik der Wärme: Samtliche Schriften*. H. P. Munzenmayer e Stadtarchiv Heilbronn (eds). Heilbronn: Stadtarchiv Heilbronn.
- Maxwell, James Clerk (1872) *Theory of Heat*. London: Longmans. Elibron Classics Replica Edition, 2005.
- Maxwell, James Clerk (1888) *Matter and Motion*. New York: Dover, 1991.
- Mckelvey, John P.; Grotch, Howard (1979) *Física*. São Paulo: Harbra. Editora Harper & Row do Brasil.
- Muller; Pouillet (1926) *Lehrbuch der Physik*. Vol. 3, I Parte. 11 ed. Braunschweig. Friedr. Vieweg & Sohn.
- Nelkon, M.; Parker, P. (1977) *Advanced Level Physics*. London: Heinemann Educational Books.
- Nicholls, Gillian; Ogborn, Jon (1993) “Dimensions of children’s conceptions of energy”, *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 15: 73-81.
- Ostwald, Wilhelm (1908) *Die Energie*. Leipzig : T. A. Barth, 1912<sup>2</sup>.
- Pfister, E. (1914) “Über den Schiffarzt Julius Robert Mayer”, *Archiv für Schiffs- und Tropenhygiene unter besonderer Berücksichtigung der Pathologie und Therapie*, XVIII, Heft XIV.
- Preston, Thomas (1894) *The Theory of Heat*. 3<sup>a</sup> ed. By R. Cotter. London: Macmillan.
- Preston, Thomas (1919) *The Theory of Heat*. 3<sup>t</sup> ed. R. Cotter (ed.). London: Macmillan.
- Prideaux, Ned (1995) “Different approaches to the teaching of the energy concept”, *SSR* 77(278): 49-57.

- Rankine, William (1853) “On the General Law of the transformation of Energy”, *Phil. Magaz.* 34, 106-17.
- Rezende, Joffre M. de (2009) “O enigma da respiração: como foi decifrado”, in *À Sombra do Plátano*. São Paulo: UNIFESP.
- Saha, M; Srisvastava, D (1935) *A Treatise on Heat*. 2<sup>f</sup> ed. Calcuta.
- Saussure, Theodore (1804) *Recherches chimiques sur la végétation*. Paris : chez la V Nion.
- Seebeck (1821-2) “Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz”, *Abhandlungen der Koniglichen Akademie der Wissenschaften zu Berlim* (1822-23), 265-373.
- Sexl, Roman U. (1981) “Some Observations Concerning the Teaching of the Energy Concept”, *Eur. J. Sci. Educ.*, vol. 3, 3:285-289.
- Singh, Jagjit (1961) *Great Ideas and Theories of Modern Cosmology*. New York: Dover publications, inc.
- Shamos, Morris H. (1987) *Great Experiments in Physics*. New York: Dover Publications, Inc.
- Smith, Crosbie (2003) “Force, Energy, and Thermodynamics”, in Mary Joe Nye, org., *Cambridge History of Science. The Modern Physical and Mathematical Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, vol. 5, pp. 289-310.
- Solomon, Joan (1985) “Teaching the conservation of energy”, *Phys. Educ.*, vol. 20:165-170.
- Tipler, Paul (2000) *Physik*. 3<sup>a</sup> reimpressão corrigida da 1<sup>a</sup> ed. 1994. Heidelberg: Spektrum Akd. Verl.
- Thomson, William (1848) “On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot’s Theory of the Motive Power of Heat”, *Phil. Magaz.*, 33, 313-17.
- Thomson, William (1849) “An account of Carnot’s Theory of the Motive Power of Heat; with Numerical Results deduced from Regnault’s Experiments of Steam”, *Transactions of the R. S. of Edinburgh* 16, 541-74.
- Thomson, William e Tait, Peter (1862) “Energy”, *Good Words* 3, 601-7.
- Trumper, Ricardo (1997) “Applying Conceptual Conflict Strategies in the Learning of the Energy Concept”, *Res. Sci. Tech. Educ.*, vol. 15, 1: 5-18.
- Valente, Mariana de Jesus Pedreira (1999) *Uma Leitura Pedagógica da Construção Histórica do Conceito de Energia*. Lisboa: Universidade Nova. Dissertação de Doutorado. Policopiado.

Van Roon, P. H.; Van Sprang, H. F.; Verdonk, A. H. (1994) "Work and Heat: on a road towards thermodynamics", *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 16, 2: 131-144.

Voigt, W. (1903) *Termodynamik I*. Leipzig: G. J. Goschensche.

Young, Hugh D. (1974) *Fundamentals of Mechanics and Heat*. New York (etc): McGraw-Hill.

Young, H.; Freedman, R. (2004) *Sears and Zemansky's University Physics*. 11<sup>a</sup> ed. San Francisco (etc): P. Addison-Wesley.

Warren, J. W. (1982) "The nature of energy", *Eur. J. Sci. Educ.*, vol. 4, 3: 295-297.

Watts, Michael (1983) "Some alternative views of energy", *Phys. Educ.*, vol. 18:213-217.

Westphal, W. (1970) *Physik*. 25/26 ed. Berlin: Springer.

Wolf, Franz (1949) *Grundzuge der Physik I*. Karlsruhe: G. Braun.

Zubay, Geoffrey (1983) *Biochemistry*. Reading, Mass (etc): Addison-Wesley.