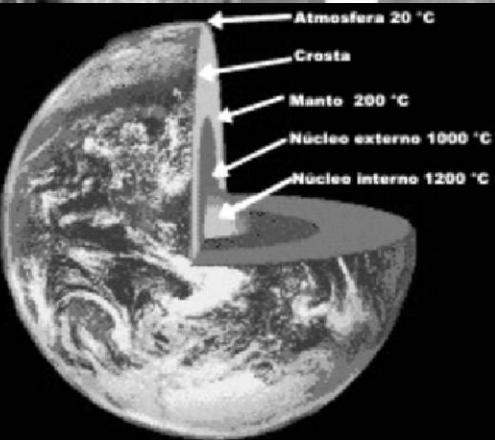


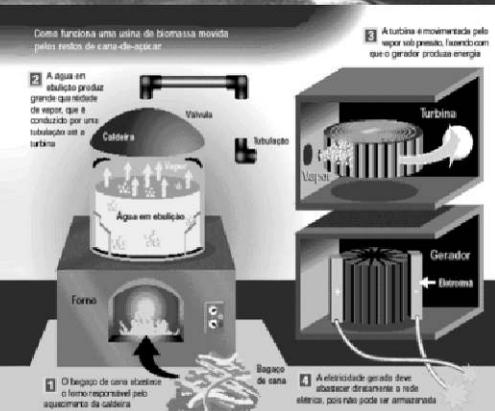


Conversando sobre Ciências em Alagoas

A Energia dos Tempos Antigos aos dias Atuais



Antonio Ornellas



Maceió/AL, 2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Reitora

Ana Dayse Rezende Dórea

Vice-reitor

Eurico de Barros Lôbo Filho

USINA CIÊNCIA / UFAL

Coordenadora

Profa. Dra. Tania Maria Piatti

MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL / UFAL

Diretora

Profa. Dra. Flávia de Barros Prado Moura

Edufal

Diretora

Sheila Diab Maluf

Conselho Editorial

Sheila Diab Maluf (Presidente)
Cícero Pérciles de Oliveira Carvalho
Maria do Socorro Aguiar de Oliveira Cavalcante
Roberto Sarmiento Lima
Iracilda Maria de Moura Lima
Lindemberg Medeiros de Araújo
Flávio Antônio Miranda de Souza
Eurico Pinto de Lemos
Antonio de Pádua Cavalcante
Cristiane Cyrino Estevão Oliveira

Supervisão gráfica:

Márcio Roberto Vieira de Melo

Capa / Diagramação:

Edmilson Vasconcelos

Catálogo na fonte

Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central – Divisão de Tratamento Técnico

-
- 074e Ornellas, Antonio José.
A energia dos tempos antigos aos dias atuais / Antonio José Ornellas. - Maceió :
EDUFAL, 2006.
71p. : il. - (Conversando sobre ciências em Alagoas)

Bibliografia: p. 70-71

1. Energia. 2. Ciências - Estudo e ensino. I. Título. II. Série. (Conversando sobre
ciências em Alagoas)

CDU: 530

Direitos desta edição reservados à

Edufal - Editora da Universidade Federal de Alagoas
Campus A. C. Simões, BR 104, Km, 97,6 - Fone/Fax: (82) 3214.1111
Tabuleiro do Martins - CEP: 57.072-970
Maceió - Alagoas
E-mail: edufal@edufal.ufal.br
Site: www.edufal.ufal.br

ÍNDICE

Apresentação	05
Prefácio	07
I. “Energia” até Aristóteles	10
II. Um repensar às idéias de Aristóteles	14
III. A <i>vis viva</i>: força ou energia?	17
IV. A energia térmica unificando as ciências	18
V. A energia eletromagnética algo recente	25
VI. A necessidade da dimensionalidade e os sistemas de unidades	35
VII. A relação massa-energia	37
VIII. A quantificação da energia	42
IX. A estabilidade atômica	45
X. A energia de cada dia	50
XI. Energia e vida	54
XII. O consumo de energia	60
XIII. Referências Bibliográficas	70

Apresentação

A série Conversando sobre Ciências em Alagoas é composta de cadernos que abordam seis temas científicos relevantes e atuais, tratados de maneira a destacar aspectos relacionados à realidade alagoana. Os cadernos temáticos foram criados com o intuito de contribuir com os professores e alunos de Ciências Naturais do ensino fundamental e médio, para a realização de um ensino contextualizado, interdisciplinar e motivador. A iniciativa surgiu da constatação de quão raras são as bibliografias disponíveis que tratam destes temas, direcionadas para o ensino básico e que abordem características e questões regionais. Esperamos que estes cadernos sejam fonte de atualização e aumentem o interesse de professores, alunos e do público em geral, em conhecer melhor o mundo em que vivem. Os temas abordados são os seguintes:

- **Eossistemas Marinhos: recifes, praias e manguezais**
Prof^a. Dr^a. Monica Dorigo Correia e Prof^a. Dr^a. Hilda Helena Sovierzoski
- **A Mata Atlântica em Alagoas**
Prof^a. Dr^a. Flávia de B. Prado Moura e MSc. Selma Torquato da Silva
- **Escorpiões, Aranhas e Serpentes: aspectos gerais e espécies de interesse médico no Estado de Alagoas**
MSc. Selma Torquato da Silva, Ingrid Caroline Soares Tiburcio, Gabriela Quintela Cavalcante Correia e Rafael Costa Tavares de Aquino
- **A Química dos Alimentos: carboidratos, lipídeos, proteínas, vitaminas e minerais**
Prof^a. Dr^a. Denise M. Pinheiro, MSc. Karla R. A. Porto e Maria Emília S. Menezes
- **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**
Prof^a. Dr^a. Tania Maria Piatti e Prof. Dr. Reinaldo A.F. Rodrigues
- **A Energia: dos tempos antigos aos dias atuais**
Prof. MSc. Antônio José Ornellas

Este projeto foi uma iniciativa da Usina Ciência e do Museu de História Natural da UFAL, sendo financiado pela Secretaria de Ensino Superior do MEC. Teve como ponto de partida a realização de um Ciclo de Palestras abordando todos os seis temas, durante o qual foi possível dialogar com professores do ensino básico a fim de descobrir seus anseios e expectativas. Gostaríamos de agradecer a todos que colaboraram para sua realização e esperamos que ele seja apenas o início de uma parceria mais efetiva entre Universidade e ensino básico em Alagoas.

Os autores

Prefácio

O ensino de ciências deve procurar promover a descrição do mundo natural tendo o cuidado de passar uma compreensão de como as pessoas em sociedade vêm interferindo e modificando o meio ambiente. Neste contexto, o tratamento do tema energia abordado de forma interdisciplinar, por sua abrangência nas questões da vida em sociedade, principalmente em populações com grandes aglomerados humanos, é algo de vital importância para uma alfabetização científica para a cidadania. Este estudo passa inicialmente pela evolução da compreensão do conceito de energia, a partir de uma concepção científica em diferentes épocas do desenvolvimento da ciência.

O texto procura mostrar o caráter integrador da energia entre diferentes áreas da Física e entre diferentes ciências. Essa grandeza da Física, que foi confundida com a força por mais de 2000 anos, trouxe praticidade para a descrição de sistemas complexos de uma infinidade de partículas no funcionamento da estrutura da matéria finita e no universo microscópico, na composição de átomos e moléculas e do núcleo atômico. Daí a necessidade de se abordar desde à questão histórico-filosófica desta grandeza até chegarmos à mesma como um produto de consumo que vem promovendo impactos ambientais para uma vida saudável. Diante de tanta diversidade apresentada por este tema, dentro de uma descrição sintética efetuada foram omitidos muitos detalhes da aplicação deste conceito nas diferentes situações abordadas.

Por ser uma proposta de apoio didático preocupada principalmente em auxiliar no trabalho de sala de aula do professor do ensino básico (fundamental e médio), se procurou passar uma visão que globaliza o assunto. Assim, é recomendável um estudo complementar em livros de textos didáticos, de Física, de Química, de Bioquímica, de Filosofia das Ciências, entre outras diferentes áreas, para uma melhor compreensão das questões energéticas discutidas. Para isto, as referências bibliográficas aqui citadas, entre outras, devem ser consultadas.

A ciência e a tecnologia são duas instâncias que hoje se retro-alimentam pela eficácia operativa da tecnociência. A teoria científica é, na atualidade, um importante instrumento para a ação, para a manipulação, para a construção, para a industrialização e para a transformação, em diferentes setores da sociedade. A orientação instrumental da investigação científica atual precisa trabalhar com uma base de conhecimentos que mostrem resultados potencialmente utilitários, para atender ao mercado de consumo, salvaguardando os segmentos que se dedicam à pesquisa fundamental. Assim, o elo entre a ciência e a tecnologia vem se estabelecendo pela necessidade, na organização social, de obter êxito lucrativo, o fim utilitário. Na atualidade, a dialética existente entre conhecimento e produção nos leva a modos de produção do conhecimento diferente do

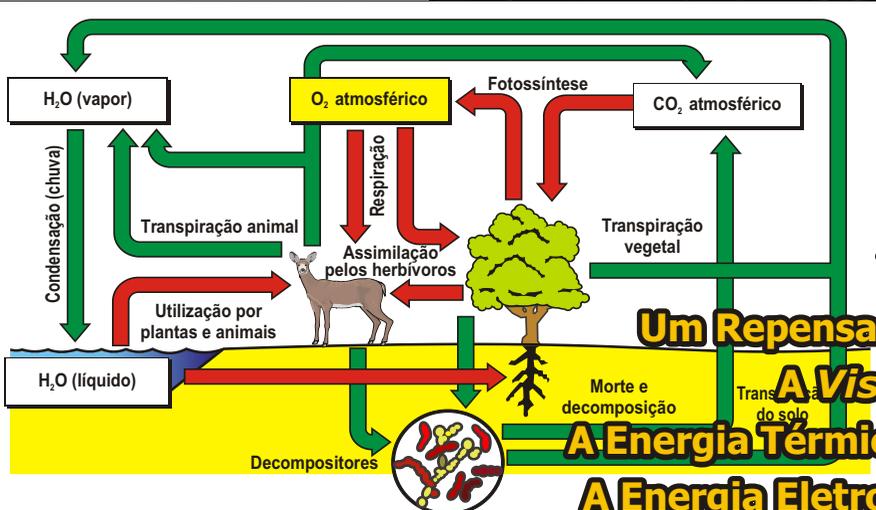
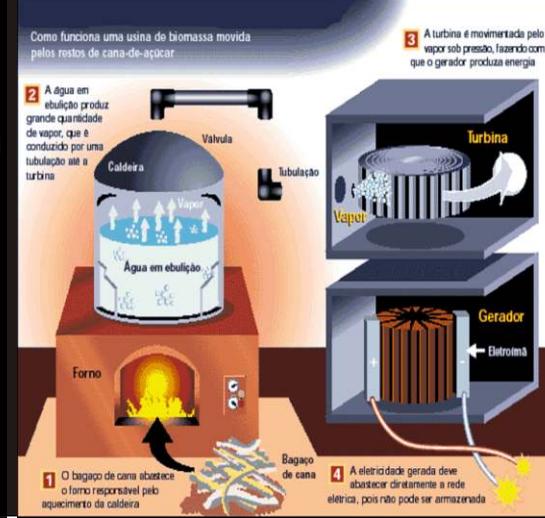
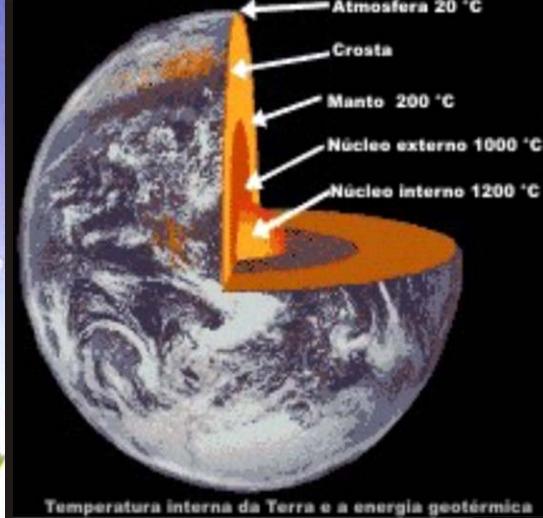
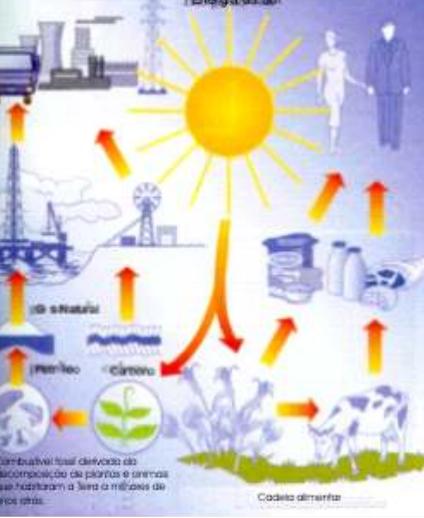
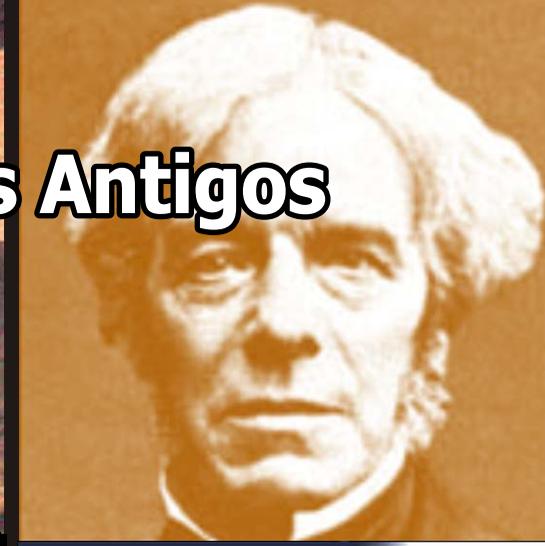
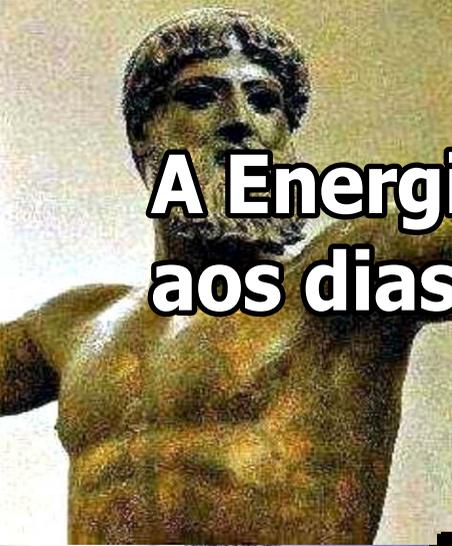
discurso científico ao qual tradicionalmente estávamos habituados. A ciência deixa de ser apenas um sistema de representação de fatos naturais, sociais, para se constituir em um modo de ação, de intervenção social. Passa também a existir uma distinção essencial entre o que é ciência disciplinar (normal, instituída nos ambientes de formação acadêmica) do que é tecnociência, presente no cotidiano da sociedade contemporânea. Assim, para atender aos anseios de um exercício de cidadania, atualmente a escola vem sendo cobrada a direcionar sua ação para um sistema de estudo que integre ciência, tecnologia e sociedade (sistema CTS), numa perspectiva que veio a ser denominada de alfabetização científica e tecnológica ou, simplesmente, alfabetização científica. Esta obra, de um certo modo, como também, o nosso trabalho de exposição experimental desenvolvido na Usina Ciência, tem a preocupação de se inserir dentro de um sistema CTS.

A Usina Ciência da Universidade Federal de Alagoas é um importante canal de interlocução em nosso estado, com o ensino básico desenvolvendo projetos de disseminação e popularização junto aos alunos e aos professores relativos a diferentes temas científicos apresentados de forma teórica e experimental. Para isto, faz-se necessária uma metodologia de trabalho que procure utilizar meios de desenvolver competências e habilidades cognitivas em tratar estas questões, a partir da promoção de aprendizado que apresente significados lógico-científicos. Assim, este projeto consta de uma investigação mais ampla do Programa de Doutorado em Ensino de Ciências que ora desenvolvemos na Universidade de Burgos na Espanha, em convênio com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no Brasil.

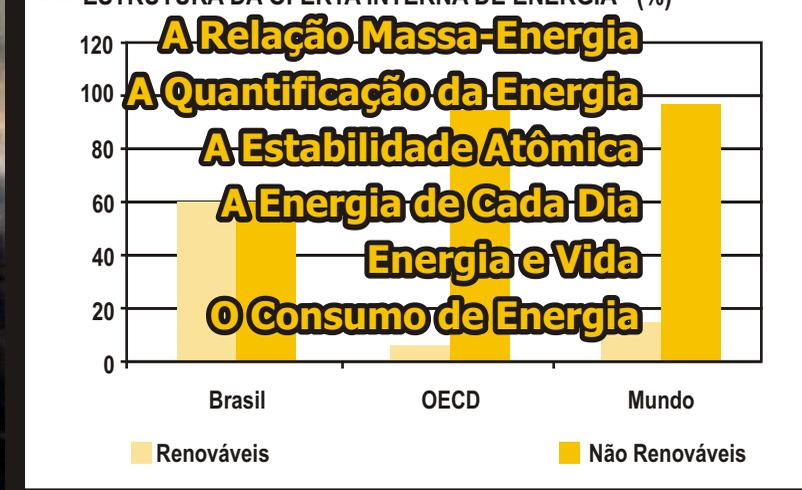
Ultimamente, em nosso Centro de Ciências, estamos em fase de execução e montagem de infra-estrutura de um projeto de modernização e ampliação de nossa exposição sobre energia. O objetivo é o de procurar cada vez mais, mostrar meios de como promover uma sociedade energeticamente auto-sustentável. Estamos assim preocupados, em Alagoas e em todo o mundo, em buscar maneiras de desenvolver ciência e tecnologia, e também, uma consciência para uma cidadania que se preocupe com uma melhor adequação do consumo de energia sem agressão ao ambiente natural. Na atualidade já se aceita a idéia de que a vida no futuro depende de uma mudança de rumo em nossas formas de consumo.

O autor

A Energia dos Tempos Antigos aos dias Atuais



A Necessidade da Dimensionalidade e os Sistemas de Unidades



- A Relação Massa-Energia
- A Quantificação da Energia
- A Estabilidade Atômica
- A Energia de Cada Dia
- Energia e Vida
- O Consumo de Energia

I. “Energia” até Aristóteles

I.1 A energia antes de Aristóteles.

Na atualidade, a Física é uma ciência que apresenta modelos de previsão da evolução cósmica, investiga o mundo submicroscópico das partículas que compõem a matéria, trabalha no desenvolvimento de novas fontes de energia, desenvolve novos materiais e novos produtos que viabilizam novas tecnologias. Toda uma cultura científico-tecnológica incorporada na atualidade é fruto de uma ciência que, apesar de muito recente cronologicamente (comparativamente à escala do tempo de existência da espécie humana), tem como referente inicial registros escritos de pelo menos 2.500 anos atrás. Podemos iniciar o relato desta história por épocas mais remotas ainda, só para mostrar que a capacidade da mente humana em criar é muito antiga, uma vez que cálculos com precisão realizados pelos egípcios na construção das pirâmides, e a própria escrita que registrou toda uma cultura antiga, deve ter surgido por volta de 4000 a.C. O primeiro instrumento destinado a efetuar cálculos, o ábaco, deve ter sido inventado pelos sumérios por volta de 2.500 a.C.

No entanto, os filósofos só aparecem de forma definida a partir do século VI a.C. nas colônias gregas da Jônia, Ásia Menor: Tales fez previsões de eclipses e mediu a distância em que se encontravam os navios no mar. Anaximandro traçou mapas da Terra, construiu o relógio de sol, entre outros grandes feitos dos pensadores daquela época. Nossa preocupação daqui para a frente é a de tratar a evolução do conceito de energia integrada à própria evolução do conceito de matéria, pela relação muito próxima que hoje concebemos entre matéria e energia. É importante observarmos nesta primeira etapa deste processo evolutivo que, apesar da existência de cálculos e de uma quantificação matemática, o conhecimento científico deixado pelas civilizações do mundo antigo mostraram que a descrição dos fenômenos da natureza (da *physis*) era efetuada de forma discursiva, sem a aplicação de uma linguagem matemática, e normalmente justificada pelos poderes dos deuses e de seres mitológicos. O deus Zeus (**figura 1**) da mitologia grega, “o pai dos deuses e dos humanos”, simbolizava uma ordem racional, era o brilho e a luz para as coisas do mundo, que poderia na certa ser denominado, na concepção mítica daquela época, de Deus Energia.

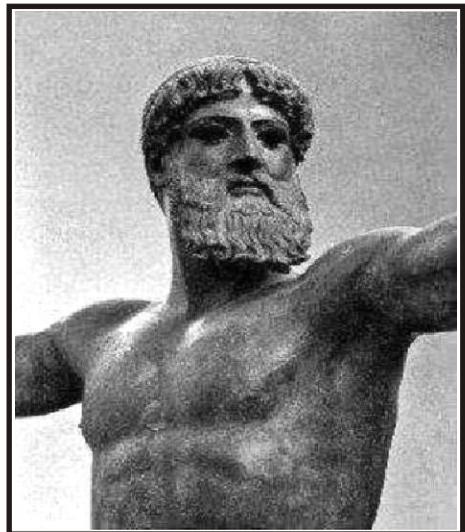


fig. 1 - O Deus Zeus da mitologia grega que representava a luz e o brilho.

Na filosofia antiga a procura por um elemento comum a toda a matéria desempenhou esse papel: ora a água, ora o ar, ora a terra, e ora o fogo, tidos como uma substância a partir da qual se originavam as outras. Posteriormente, no século V a.C., essas quatro substâncias foram agrupadas e classificadas como elementos essenciais de mesma relevância, que se combinavam por razões místicas (como o amor e a amizade que os unia e o ódio e a inimizade que os separava), para formar todos os demais meios materiais. Ainda no século VI a.C. surge uma nova maneira de pensar a matéria, através de Anaxágoras de Clazômena, não mais como um elemento ou substância primordial (água, ar, terra ou fogo), mas a partir de uma porção única que podia ser subdividida microscopicamente: as “sementes” (homeomerias), que seriam o princípio (a *arché*) da constituição de todos os meios materiais existentes, que podiam ser diferenciadas numa estrutura plurívoca para a matéria. Podiam existir novas sementes dentro das sementes, numa divisão sem fim.

Contraoendo-se ao pensamento da época, que era o de atribuir aos fenômenos simplesmente justificativas de razões mitológicas ou de divindades, para Anaxágoras deveria haver na natureza algum tipo de “força” ou de “energia” (os *nuos*) que estruturasse, que ligasse e que modificasse as variedades infinitas de meios materiais. Assim, sob ação dos *nuos* que significavam “mente”, passaria a existir um número infinito de “sementes”, numa concepção estrutural de “mente cósmica” para a matéria. É oportuno aqui ressaltar que a idéia do átomo como minúscula partícula, o elemento estrutural da matéria, surge na mesma época com Leucipo e seu aluno Demócrito, que denominou essas partículas pela primeira vez de *atomein* (que significava em grego: aquilo que não pode ser dividido). O átomo era caracterizado como uma partícula eterna, imperecível, que se movimenta no vazio (aparecendo então o primeiro registro de suposição da existência do vácuo). Apesar de ser considerada na atualidade como a concepção inicial da idéia de átomo, não é mostrada nos registros e interpretações da obra destes primeiros atomistas uma dosagem de elementos racionais como os efetuados por Anaxágoras, na tentativa de justificar não só um embrião para a matéria, mas também justificar a forma com que estes componentes se agregam. É importante ressaltarmos neste ponto que, apesar de se afirmar que o atomismo científico teve origem no século XIX, com os trabalhos de Dalton, Gay-Lussac e Avogrado, não podemos desprezar, para a composição da matéria e conseqüentemente para uma idéia embrionária de força e energia interna, o trabalho de Anaxágoras e dos criadores antigos do atomismo.

I.2 A energia em Aristóteles.

Aristóteles (**figura 2**), que viveu no século seguinte, coletou, classificou e sistematizou toda a cultura grega deixada por seus antecessores. A metafísica aristotélica pode ser reduzida a quatro questões fundamentais: a da potência e ato, a da matéria e forma, a do particular e universal, e a do movido e motor. Aristóteles incorpora a idéia mais aceita em sua época, das substâncias do espaço sublunar: terra, água, ar e fogo. Fora desta ordenação, estas substâncias procuram ocupar seus lugares naturais, estabelecendo-se as

regras para as ocorrências dos movimentos. Aristóteles cria uma quinta substância, o éter, que permeia todo o espaço supralunar entre os astros, o que estabelece nos corpos celestes um único tipo de movimento cíclico, estável e permanente, ao redor da Terra. Os movimentos, assim, seguem leis diferentes: na superfície da Terra são mutáveis, enquanto os movimentos dos corpos celestes, no céu, se mantêm imutáveis.



fig. 2 - Aristóteles

É nessa mesma época que se origina a palavra energia na ciência aristotélica, da terminologia grega “*energeia*”, que significa ato (no dicionário clássico grego expressa força, algo que atua, que transforma, que movimenta). Para a compreensão de seu sentido se costuma usar uma palavra oposta, “*dinamis*”, que significa potência. Nestes dois termos reside a base do problema mais importante da física aristotélica. A potência (*dinamis*) significa possibilidade, potencialidade, capacidade de ser ou não ser, ou capacidade de transformação, de mudança, de variação, enquanto o ato (*energeia*) significa a realidade, a perfeição, a efetivação do ser, um estado estacionário, um aprimoramento do ser, um lugar natural a todo ser. A potência e o ato são termos correlatos desenvolvidos para serem usados de forma associada. Aplicando estes dois termos na questão do relacionamento entre matéria e forma, segundo Aristóteles, a matéria é a potencialidade pura, “*dinamis*”, que vem realizada de virtudes da “*energeia*”, quando passa ao ato da forma. A matéria e as formas a serem assumidas são inseparáveis, pois o ato surge através da potência. Por exemplo, na música, os meios materiais constituintes, os instrumentos, as ondas sonoras no ar, as pessoas dançando, retratados na cultura grega (**figura 3**), são potencialidades puras que passam ao ato da forma através da virtude estabelecida nas notas musicais criadas pelo homem e trazidas pela sonoridade da energia.

A natureza requer intrinsecamente o movimento dos corpos, a transformação, a mutação. Assim como o movimento aristotélico



Fig. 3 - Na Grécia antiga uma imagem que poderia retratar o relacionamento de matéria e forma com potência e energia

(transformação, mutação, mudança de posição) foi considerado como o primeiro princípio para a natureza, Aristóteles considerou a matéria, a forma e a privação da forma como os últimos princípios intrínsecos para a natureza. Devemos observar que na natureza matéria e forma são princípios inseparáveis, do mesmo modo que na arte, onde a matéria sempre se ordena em uma forma. O movimento, no entanto, não pode ser explicado somente por suas causas intrínsecas: a material e a formal, uma vez que podemos considerá-las como princípios passivos do movimento. Por este motivo, necessitamos acrescentar mais duas razões de natureza extrínseca: são as causas eficiente e final. A causa eficiente é considerada um princípio ativo, isto é, aquilo que faz com que efetivamente haja a transformação, haja a mudança de posição (a necessidade do movido e do motor). Já a causa final, como o nome diz, é um princípio que estabelece a necessidade do fim para qualquer transformação ou mudança de posição entre dois estados (inicial e final). A causa final é tida como a causa que move todas as outras. Isto porque na doutrina da potência e do ato nada pode ser movido (passado da potência para o ato) espontaneamente, a não ser por um agente externo (o motor) que já esteja em ato, isto é, em *energeia* (a causa final do movimento). As doutrinas de Aristóteles, como uma das primeiras visões de mundo de caráter racionalista, destacada na cultura grega e incorporada pela Igreja Católica como dogma, dominou o pensamento da cultura ocidental até o Renascimento, influenciando no desenvolvimento científico, por imposição da Santa Inquisição, até o século XVII, quando Galileu e Newton reformulam a mecânica dos movimentos dos corpos.

Analisando a doutrina aristotélica da potência e do ato, dentro da nossa concepção científica atual de energia, é nossa compreensão que podemos associar a potência (*dinamis*) às transformações energéticas normalmente advindas por realização de trabalho, que ocorrem no transcurso do tempo (o conceito de potência na atualidade é a razão entre o trabalho ou variação de energia e o tempo). O ato (*energeia*), podemos interpretar como o próprio estado inicial ou final de toda transformação, isto é, um estado mais aperfeiçoado excitado ou estacionário preexistente de energia (que pode ser máximo, intermediário, ou de mínima energia). O estado estacionário de energia previamente estabelecido na natureza de ser de todo objeto material deve ser buscado, uma vez que fora dele existe a instabilidade, e se requer o retorno à estabilidade, dentro de certas condições ambientais impostas por sua vizinhança, ou mesmo se o objeto se encontra isoladamente. A massa, por exemplo, uma das propriedades fundamentais do atual ser material, quando em constantes transformações ambientais não se apresenta em ato, mas sim em potência, por sua própria capacidade ou potencialidade de se transformar e adquirir nova forma de ser (através de uma reação química, por uma mudança de estado físico, através de uma reação nuclear), na busca de se constituir em ato, isto é, um estado mais aperfeiçoado ou estável de energia que as condições externas impostas, o contato, estão a lhe oferecer. Na própria equação de Einstein: $E = m.c^2$, que estreita a ligação entre massa e energia, evidencia-se a relação entre matéria e forma pelas constantes necessidades de transformação que a natureza impõe às coisas, que a metafísica aristotélica já concebia.

II. Um repensar das idéias de Aristóteles

II.1 O início da racionalização matemática na ciência.

A doutrina da potência e do ato teve grande influência no campo da filosofia, onde continuou vigorando por muito tempo, porém, apesar disso, a evolução do conceito físico de energia vai trilhar novos caminhos, como veremos agora, através do tratamento do complexo “força-energia”. Na Idade Média, o filósofo Tomás de Aquino, monge da Igreja Católica, mesmo dentro de suas posições teológicas do catolicismo, inicia um repensar da filosofia aristotélica, com um processo de troca do antimatematismo e a valorização do empirismo observacional, pelo uso da racionalização matemática. Entra em questionamento o conceito aristotélico de força, que dizia que um objeto que se move é movido por alguma coisa (o motor), que deve estar em contato permanente com o mesmo e, conseqüentemente, também se movimenta. O que levou a argumentos de contestação da época, uma vez que, se pensarmos nessa linha de quem moveria a força (motor) que move o objeto, chegaríamos a uma cadeia infinita de agentes para o movimento.

Apesar da grande influência das concepções aristotélicas no pensamento filosófico da época, vamos encontrar estudiosos com contribuições independentes como a do monge Roger Bacon. Para eles, força era algo que se propagava no espaço do mesmo modo que os raios de luz. Na sua concepção os objetos do universo, embora diferentes nas substâncias de que eram compostos, se encontravam ligados por uma rede de ações recíprocas, ativadas por difusão de “virtudes celestiais”. Segundo ele, a difusão de “virtudes” era efetuada por uma substância denominada “espécie”, que quando cedida ao corpo ocasionava o seu movimento. Uma dada “espécie” teria potencialidade de ativar o movimento de determinado corpo se o mesmo fosse receptivo àquela “virtude”. Assim, um corpo que apresentasse “virtude” a propagaria no espaço através da substância “espécie”, que não poderia se manter em atividade permanente sob pena de perder todo o seu conteúdo (sua “virtude”). Para evitar a dissipação da “espécie”, esta foi interpretada como algo pertencente e já estabelecido no meio éter (“pneuma”), que só seria ativada na presença de um corpo, para alcançar outro e ser absorvida por ele. Pode-se notar nas idéias apresentadas que, apesar de o conceito de “virtude” ser obscuro para promover o conceito atual de força de ação à distância, este se aproxima do conceito de energia potencial de ligação, de nossa concepção vigente.

As contribuições seguintes iniciam um processo determinante para o desenvolvimento do complexo força-energia e mostram que a fundamentação teórica passa a utilizar a linguagem matemática e a razão humana passa a delinear a forma de observar. Iniciamos esta etapa com as contribuições de Simon Stevinus, que estabelece que, para um sistema de corpos suspensos e interligados por polias, são iguais os produtos de seus pesos pelos deslocamentos respectivos. Fica aí caracterizada, em nossa visão atual,

uma relação de conservação do trabalho ou a conservação na variação da energia potencial gravitacional. Galileu, em seguida, estudando o equilíbrio dos corpos sobre um plano inclinado, reforça as idéias de Stevinus, e usa estas idéias para tratar do equilíbrio de líquidos, como no problema do sifão.

Em contribuição à construção do conceito de trabalho, Galileu, nos seus últimos anos de vida, deixa ainda registrado que o “trabalho” necessário para elevar um corpo de uma certa altura era o mesmo, independentemente do caminho escolhido. Podemos identificar hoje que, por trás desta afirmação, se encontra o conceito de trabalho realizado por uma força de natureza conservativa. Galileu, apesar de não ter dado contribuições relevantes ao desenvolvimento do conceito de energia, se preocupou em buscar alternativas mais plausíveis relativas às idéias aristotélicas das causas do movimento, dando início aos fundamentos da mecânica newtoniana. A história confere a Galileu ter sido o primeiro a instituir uma metodologia de análise científica, que o levou ao tratamento correto para as propriedades inerciais da matéria, apesar de o conceito de massa ainda não se encontrar devidamente estabelecido (naquela época, Galileu pensava que num corpo em movimento existiam dois fatores fundamentais: seu peso e sua velocidade). O sucesso de Galileu em enxergar o mundo físico deveu-se muito a ter tido como fonte de inspiração a razão, e fazer uso da matemática como a linguagem mais apropriada para a descrição natural, em contraposição às idéias de Aristóteles, que tiveram como fonte inspiradora a experiência sensível na descrição dos fenômenos, sem o uso da descrição matemática.

Descartes desenvolve a corrente filosófica do racionalismo clássico, que traz como idéia básica a de que se encontra na razão humana, exclusivamente, a capacidade que temos de estabelecer a verdade e de modelar a natureza; o fator mais importante no cartesianismo é que só se observa a partir de razões prévias. Em seus estudos sobre o movimento dos corpos, introduz o termo quantidade de movimento (o produto da extensão ou de seu volume por sua velocidade), referindo-se a esta quantidade como um efeito de uma força atuando sobre um corpo em movimento. É porém Newton, adepto da filosofia cartesiana, na publicação de seu *Principia* em 1687, que desenvolve o conceito da mecânica clássica de massa e estabelece o conceito de quantidade de movimento como o produto da massa pela velocidade. Por sua vez, atribui-se a John Wallis, em 1668, a demonstração da conservação da quantidade de movimento (também denominada de momento linear) a partir da colisão dos corpos, comprovando as idéias extraídas teoricamente pela razão pura e simples de Descartes de pensar a natureza sem a necessidade de comprovar experimentalmente.

II.2 As primeiras formalizações matemáticas envolvendo a energia.

Uma polêmica entre o que seria a “vis viva” se estabelece em contraposição às idéias de Descartes com Cristian Huygens, físico holandês, que em 1669 apresentou a Royal Society of London um estudo sobre choque recíproco entre dois corpos. Na oportunidade, ele mostrava que o que se conservava na colisão era a soma dos produtos das

massas pelos quadrados das velocidades. Neste importante momento histórico na construção do conceito de energia, Leibniz (aluno de Huygens) introduz o conceito de força viva (a “vis viva”), que expressava o produto da massa pela velocidade ao quadrado ($m.v^2$). Esta é a primeira definição formal que se aproxima do nosso conceito atual de energia do movimento ($K = 1/2m.v^2$), apesar de ter sido definida, naquele momento, na concepção de força.

Na busca da construção do conceito de trabalho e energia, e no trato com o complexo força-energia, o momento histórico nos obriga a registrar que, apesar da valiosa contribuição de Isaac Newton com suas quatro leis que tratam da força na mecânica, os conceitos de trabalho e energia não constavam de seu programa de pesquisa. No *Principia*, que elucida todo o conceito de força e a própria dinâmica do Universo, o conceito e as relações entre trabalho e energia não são citadas uma única vez.

Uma das primeiras contribuições utilizando o formalismo matemático para a conservação da energia mecânica (cinética mais potencial) vem de Daniel Bernoulli (filho de John). Ele apresenta um teorema relacionado ao escoamento dos fluidos em tubos horizontais (posteriormente denominado princípio de Bernoulli): “quando a velocidade do fluxo dos fluidos aumenta, sua pressão diminui”, onde usa o princípio da conservação da força viva de Leibniz na sua elaboração. É importante destacar ainda que nessa obra Daniel apresentou a idéia de que uma força pode ser deduzida de uma “função potencial”, expressão essa usada em seu manuscrito. Seu pai John Bernoulli posteriormente generaliza as idéias do filho, apresentando em 1734 já na idade moderna, o teorema da hidrodinâmica escrito formalmente por: $p + \rho V^2/2 + \rho gh = \text{constante}$ (esta equação de conservação das contribuições de pressão em um escoamento fluido ideal necessita levar em conta a noção de energia de movimento de uma certa quantidade de massa do fluido e de sua energia potencial; na atualidade, costumamos deduzi-la a partir de uma relação entre o trabalho e a variação da energia mecânica, que utiliza como princípio a conservação da energia mecânica).

III. A *vis viva*: força ou energia?

D'Alembert, que em 1743 publica seu livro “*Traité de Dynamique*”, procura resolver a controvérsia entre a quantidade de movimento de Descartes e a *vis viva* de Leibniz. Em sua argumentação era exposto o seguinte: um corpo sob a ação de uma certa força leva um certo tempo para percorrer determinada distância; a ação dessa força poderia ser calculada por seu efeito no tempo e no espaço. No primeiro caso, ele mostrou, a partir da lei de movimento de Newton ($F = m.a$), que a medida da força se faz através da quantidade de movimento cartesiana produzida [$F \cdot t = \Delta(mv)$]. No segundo caso, ele mostrou que essa medida se faz por intermédio da força viva, isto é, pela variação da força viva produzida [$F_x \cdot X = \Delta(mv^2)$], na concepção atual, utilizando a relação entre trabalho ($F_x \cdot X$) e variação da energia cinética [$\Delta(mv^2/2)$].

Em 1744, Euler, trabalhando no seu princípio de mínima ação (atribuído Euler-Maupertuis), utiliza o conceito de energia potencial denominado de “*vis potentialis*”. Além de dar grandes contribuições para a mecânica dos fluidos, também desenvolveu a mecânica dos corpos rígidos em rotação. Em 1736 publicou o livro “*La Mechanica*”, onde divulga sua obra.

Em 1788, Lagrange publica seu famoso livro “*Mecanique Analytique*” (mecânica analítica). A Mecânica Clássica de Euler-Lagrange e de outros nobres antecessores é consolidada no início do século XIX, com as contribuições de Hamilton, Jacob, Poisson, Poincaré, entre outros importantes cientistas. Sua aplicação na solução de diversificados problemas da natureza mecânica fez parecer que todos os problemas de análise de movimentos estariam resolvidos. Podemos observar que dentro de nossa visão atual já vislumbramos uma nítida separação efetuada entre o que se poderia chamar de força e o que seria energia. No entanto, as terminologias força viva cinética e força viva potencial, ou mesmo força na concepção newtoniana, continuaram a vigorar, até porque não existia no século XVIII uma preocupação bem definida com a dimensionalidade das grandezas e parâmetros desenvolvidos que pudesse separar uma coisa da outra.

IV. A energia térmica unificando as ciências

IV.1 A distinção entre temperatura e calor

Como acabamos de ver, grandes desenvolvimentos científicos ocorreram no século XVIII. Havia a necessidade de se buscar uma equivalência entre a mecânica vetorial desenvolvida por Newton e por seus seguidores ingleses, e a mecânica escalar desenvolvida no continente por Euler e Lagrange e outros. Este fato trouxe aos pensadores da época uma crescente consciência da importância da análise dimensional. Então passamos a ter um entendimento mais amplo do relacionamento entre diferentes áreas da Física, e da própria Física com as outras ciências (Química, Biologia), que vinham paralelamente sendo desenvolvidas. Inicia-se uma compreensão da necessidade de se buscar relações entre os diferentes tipos de força que vinham se estabelecendo. A distinção entre temperatura e calor tem início nesse período.

Desde muito cedo o ser humano aprendeu a conviver com o Sol e com o fogo, a partir de suas sensações fisiológicas térmicas de quente e de frio pelo contato com meios materiais. Na ciência aristotélica, o fogo era a última substância da Terra ao espaço abaixo da Lua (observa-se que o fogo sempre procura as camadas superiores da atmosfera). Não se conseguia efetuar uma distinção entre o calor e a temperatura. Os primeiros registros de experimentos em calorimetria, visando distinguir a temperatura do calor, datam de 1690, com o filósofo inglês John Locke, que observou que uma pessoa que mergulhar uma mão na água quente e a outra em água fria, e após um certo tempo de acomodação, colocar as duas mãos em água morna, vai experimentar sensações térmicas diferenciadas entre suas mãos.

Em 1724, o médico holandês Hermann Boerhaave já sabia que na troca de calor entre dois sistemas de uma mesma substância com volumes diferentes, e inicialmente separadas, quando postas em contato, a temperatura de equilíbrio térmico era obtida a partir de uma média ponderada das temperaturas iniciais em relação ao volume de cada uma: $T = (T_1 \cdot V_1 + T_2 \cdot V_2) / (V_1 + V_2)$. Posteriormente, em 1747, o físico russo Georg Richmann (morto por uma descarga elétrica ao testar um pára-raios) substituiu o volume pela massa na média ponderada, ficando a expressão dada por: $T = (T_1 \cdot m_1 + T_2 \cdot m_2) / (m_1 + m_2)$. Já o químico escocês Joseph Black, em 1757, mostrou que a temperatura do equilíbrio nem sempre se ajustava à expressão anterior, como na situação em que havia mudança de fase (ao misturar uma mesma quantidade de água com gelo, a temperatura de equilíbrio era a do gelo e não a da média entre as temperaturas iniciais).

Outras verificações nesta mesma linha na época já haviam levado o físico sueco Samuel Klingestjerna a levantar a hipótese de haver diferença entre grau de termicidade

(temperatura) e quantidade de calor. Esta diferença foi resolvida por Black em 1760, verificando que a uma mesma temperatura um bloco de ferro parece mais aquecido que um bloco de madeira de igual volume, e concluindo que o ferro apresenta uma maior matéria de calor que a madeira para volumes ou pesos iguais (maior “capacidade térmica” em acumular calor). Black foi o primeiro a relacionar e, conseqüentemente, a distinguir uma capacidade de calor (Q) de sua respectiva variação de temperatura (ΔT); tinha a concepção de calor como um fluido imponderável e indestrutível, e não como energia.

No entanto, a idéia de calor como alguma forma de movimento no interior da matéria já era defendida desde 1620 pelos filósofos ingleses Francis Bacon e Lord Verulan, e posteriormente pelos físicos ingleses Robert Boyle e Robert Hook (que utilizaram a mecânica newtoniana no desenvolvimento da teoria cinética dos gases). Porém atribui-se ao físico anglo-americano Benjamin Thompson (o conde de Rumford) ser o primeiro a demonstrar experimentalmente que o calor era uma conseqüência do movimento interno (energia cinética). Naquela época, contribuições importantes como esta para o nosso conceito atual de calor não se difundiam e não tinham aceitação tão imediata, e, como veremos um pouco mais adiante, a polêmica energia ou substância não acaba aqui.

Dando continuidade a uma formulação para o calor, um pouco mais tarde, em 1772, o físico sueco Johan Wilcke mostra que uma mesma quantidade de substâncias diferentes necessita de diferentes quantidades de calor para uma mesma elevação de temperatura. A equação denominada de Black-Wilcke é escrita por: $Q = m.c.\Delta T = C.\Delta T$; onde c (na atualidade, o calor específico) foi denominado de “afinidade para o calor” e $C = m.c$ é a capacidade calorífica do objeto (na atualidade, denominado de capacidade térmica), com m sendo a massa do corpo (importante propriedade da matéria já conceituada por Newton, há 100 anos atrás). Diante das trocas de calor na mudança do estado físico da matéria sem elevação da temperatura, Black ainda introduz, em 1761, o conceito de calor latente (L), para justificar as trocas de calor na fusão ou solidificação ($L_f = L_s$) e ainda na vaporização ou no sentido inverso da condensação ($L_v = L_c$), onde definiu como $Q = m.L$. Black chegou ainda a verificar que o calor necessário para vaporização era 445 vezes maior que o calor de fusão ($L_v = 445 L_f$). É oportuno observar que na determinação do calor de vaporização, Black trabalhou com o engenheiro escocês James Watt, quando chegaram à conclusão que a quantidade de calor cedida por uma fonte externa para provocar a expansão do vapor era igual à quantidade de calor recebida e utilizada para provocar a expansão (nascendo aí as primeiras idéias da conservação da energia térmica). Watt ainda utilizou os resultados destes experimentos para desenvolver o condensador da máquina a vapor, que veio a revolucionar a utilização de nossos primeiros motores de combustão, em virtude de ter aumentado sua eficiência.

O calor específico instituído até então era um parâmetro constante e, por esta razão, apresentava imprecisões, situação que foi mudada pelos experimentos desenvolvidos pelo astrônomo francês Pierre-Simon (Marquês de Laplace) e pelo químico francês Antoine-Laurent Lavoisier. A partir de 1780 mostraram que o calor específico dependia da temperatura, dentro da nossa concepção atual, não sendo uma constante. Estes dois

pesquisadores também se preocuparam com a natureza do calor (uma indefinição ainda naquela época), uma vez que em uma de suas comunicações à Academia Francesa de Ciências relataram que os físicos naquele momento estavam divididos quanto à natureza do calor; uns o pensavam como um fluido que penetra nos corpos em quantidade que vai depender de suas temperaturas e de sua disposição (a substância calórica); outros físicos acreditam que o calor não é mais que o resultado dos movimentos insensíveis das moléculas que compõem a matéria (energia cinética). Lavoisier por exemplo, um dos precursores do princípio da conservação, em uma de suas publicações mostrou estar mais inclinado à hipótese do calor como um “corpúsculo” que denominou em 1787 de calórico. O calórico, dependendo de sua quantidade inserida ou retirada dos corpos, ocasionava um dos três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso). Pelo que acabamos de relatar, no século XVIII vemos que se conseguiu efetuar uma clara distinção entre o calor e a temperatura. No entanto, o calor ainda foi considerado como uma substância para uns e como “energia” para outros, até a metade do século seguinte, com a lei de conservação da energia.

IV.2 A conservação unificando as energias.

O século XIX é marcante para o desenvolvimento do conceito de energia e da concepção da idéia de campo magnético e de campo elétrico, e para a unificação dos fenômenos elétricos com os fenômenos magnéticos, com a energia passando a ser relacionada aos campos físicos e a interligar os fenômenos térmicos, eletromagnéticos e mecânicos. A energia colocada ainda como uma força pela tradição, mas já concebida como sendo algo diferente da idéia de força estabelecida por Newton, passa a constituir-se numa grandeza física das mais importantes. Seu papel centralizador na descrição do comportamento interno e dinâmico de sistemas físicos ocorre principalmente no transcurso do desenvolvimento da teoria termodinâmica.

As contribuições importantes para a lei de conservação de energia e para a unificação de diferentes formas de concepção de energia, bem como o próprio advento da teoria termodinâmica, serão apresentadas a partir deste momento. Inicialmente, para mostrar o processo histórico da utilização do termo energia, em 1803, Carnot no seu estudo sobre eficiência das máquinas térmicas, trata da noção de energia potencial, à qual dá o nome de força viva virtual. Thomas Young, em 1807, usa o termo energia no sentido que hoje é conhecido, qual seja, a capacidade de realizar trabalho. Apesar disto, a definição de trabalho como sendo o produto da força pelo deslocamento ($W = Fx.X$) só fica estabelecida em 1826 pelo matemático e general francês Jean Victor Poncelet. Uma outra contribuição importante para o desenvolvimento do conceito e definição de energia cinética aparece em 1829, através do físico francês Gustave Gaspar Coriolis. Ele publicou que o importante no movimento de um corpo era a metade da força-viva, isto é: $mv^2 / 2$ (fazendo uma correção no conceito introduzido por Leibniz em 1686). Porém, somente em 1862, é que Thomson (Lord Kelvin), adepto inicialmente da teoria do calórico, usa o termo energia cinética pela primeira vez para representar a energia do movimento dentro de nossa concepção atual.

A compreensão do que era energia e de sua lei de conservação passava pela necessidade de se relacionar o fluido calórico à energia mecânica estabelecida. Esta etapa inicia-se em 1832, quando Carnot escreveu uma série de notas onde descreve novas experiências com sua máquina. Ele compara a “queda” do calórico (esta era a concepção de Carnot na época) em sua máquina com a queda d’água de um reservatório, considerando que a água pode voltar ao reservatório se a mesma for bombeada. Assim a substância calórica ora “caía” espontaneamente de uma fonte quente para uma fonte fria, ora “subia” de forma estimulada por realização de trabalho. Nessa linha de raciocínio ficava uma dúvida de como harmonizar a conservação do calórico nesse processo reversível, com a conservação do calórico nos processos irreversíveis (como nos processos em que a produção de calor ocorria pela existência do atrito).

Para responder a essa dúvida e pôr em cheque a teoria do calórico, era necessário se determinar o equivalente mecânico do calor, o que foi realizado 1842 pelo médico alemão Júlio Robert Mayer, o que deixava evidente, com boa aproximação, a relação do calor com o trabalho realizado ou variação da energia potencial. Em 1843 o físico inglês James Prescott Joule apresentou na Reunião da Associação Britânica para o Progresso da Ciência a primeira medição do J, relacionando o calor gerado pela corrente elétrica introduzida por indução eletromagnética com o trabalho realizado para movimentar a máquina geradora, ficando estabelecido o equivalente mecânico e o equivalente elétrico do calor. Na verdade, desde 1840 que Joule e Helmholtz confirmaram em trabalhos independentes que a eletricidade é uma forma de energia, uma vez que se relaciona com o calor. Porém, medidas precisas do equivalente mecânico só foram obtidas em 1879, com o aprimoramento dos aparatos experimentais de medidas que possibilitaram ao físico norte-americano Henry Augustos Rowland obter $J=4,188$ joule / caloria, dentro da precisão das medidas atuais e após estabelecida a primeira lei da termodinâmica.

As comprovações experimentais de Mayer e Joule abrem caminho (encontravam-se a um passo) para qualquer um dos grandes físicos que trabalhavam nessa linha de pesquisa formalizar uma lei geral de conservação para a “energia”. Em 1847 o fisiologista e físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, no célebre trabalho intitulado *Ueber die Erhaltung der Kraft* (sobre a conservação da força), enunciou o Princípio Geral da Conservação da Energia (ficando depois estabelecida como o primeiro princípio da termodinâmica). Este princípio apresenta o seguinte enunciado: todo sistema termodinâmico possui, em estado de equilíbrio, uma variável de estado denominada de energia interna U , cuja variação $\Delta U = Q - W$; onde (Q) representa calor inserido no sistema e (W) representa o trabalho realizado pelo sistema. Na oportunidade, Helmholtz relaciona a conservação da energia à mecânica e à gravitação. Considerada como a primeira lei da termodinâmica, estabelecia a conservação nos processos onde havia trocas de calor, variação da energia interna e realização de trabalho, porém não regulava a forma e o sentido como as transformações energéticas poderiam ocorrer na natureza.

IV.3 O sentido e a eficiência das transformações energéticas

Em 1850, Rudolf Clausius apresenta um princípio que vem para generalizar a forma com que os fenômenos térmicos podem ocorrer na natureza, estabelecendo que na troca de calor entre dois sistemas termodinâmicos em contato térmico, a temperaturas diferentes, não há nenhum processo cujo único efeito seja o fluxo espontâneo de calor do reservatório de temperatura menor para o reservatório de temperatura maior (na atualidade, dizemos tratar-se de um processo que precisa ser estimulado pela realização de trabalho externo, como nas máquinas refrigeradoras). O que é espontâneo é o fluxo de calor no sentido inverso, isto é, do reservatório quente para o reservatório frio, usado pela máquina a vapor da época e pelo motor a combustão na atualidade. Logo em seguida, em 1851, William Thomson (o Lord Kelvin) apresenta uma teoria dinâmica para o calor, em que a interpretação deste segundo princípio expressa que: é impossível remover energia térmica de um sistema a uma determinada temperatura e converter integralmente a energia removida em trabalho mecânico sem modificar de alguma maneira o sistema ou as vizinhanças deste sistema (como o fato de ter que rejeitar o calor, não disponibilizado para realização de trabalho, para um reservatório a temperatura menor). O sentido inverso na natureza é permitido, sendo possível transformar toda energia mecânica utilizada em um trabalho de fricção (movimento com atrito) em energia térmica (calor). Estes dois princípios, apesar de apresentados separadamente, foram reconhecidos posteriormente como equivalentes e denominados de 2ª lei da termodinâmica.

A impossibilidade de uma máquina térmica com uma eficiência de 100% levou a se pensar em um ciclo que estabelecesse o melhor rendimento. A razão humana procurava uma eficiência possível para uma máquina hipotética, a eficiência ideal reversível. Este ciclo reversível já havia sido idealizado pelo engenheiro francês Sadi Carnot em 1824, antes dos enunciados da primeira e da segunda lei. Este ciclo reversível passa a ser incorporado ao enunciado da 2ª lei para as máquinas térmicas (nenhuma máquina operando entre dois reservatórios de calor, um quente e um frio, a temperaturas definidas, pode apresentar um rendimento maior do que o da máquina de Carnot, operando entre os mesmos reservatórios de calor). Na mesma oportunidade, Thomson estabelece o zero absoluto de temperatura como sendo uma temperatura inatingível por nenhum meio material em processo de resfriamento (3º princípio da termodinâmica). Pensar no zero absoluto da escala Kelvin seria termodinamicamente pensar numa matéria sem a existência de nenhuma energia interna de movimento, o que se torna algo proibitivo nesta teoria.

IV.4 A ordem e a desordem na matéria relacionada a energia

Ainda em 1865, Clausius introduz o termo entropia na termodinâmica, uma grandeza associada ao estado de ordem e desordem de sistemas físicos termodinâmicos (normalmente constituídos por uma infinidade de partículas: átomos ou moléculas). Trata-se de uma grandeza diretamente associada à energia, já que para os processos

isotérmicos por definição: $\Delta S = Q/T$, e pela 2ª lei em relação à entropia, para qualquer transformação, qualquer fenômeno verificado na natureza vale sempre que: $\Delta S \geq 0$ (a igualdade refere-se a processos reversíveis, onde $\Delta S = 0$). Existem muitos processos irreversíveis na natureza que não vão poder ser justificados pelos enunciados de Clausius e de Kelvin, da disponibilidade do calor: a fragmentação de um copo sobre o solo, solto em queda de uma certa altura, é um exemplo disto, onde vamos sair de um estado termodinâmico mais ordenado, o copo inteiro localizado a uma altura h (um estado de entropia menor ou de energia potencial gravitacional disponível para realização de trabalho, mgh), para um estado menos ordenado, o copo fragmentado sobre o solo (entropia maior, a energia potencial transformada em energia térmica no copo e na vizinhança do solo, não mais disponível para a realização de trabalho), justificado pela 2ª lei, $\Delta S > 0$.

A entropia é uma função termodinâmica associada ao estado de ordem ou desordem de um sistema termodinâmico cuja variação vai regular as formas de se viabilizar transformações e conseqüentemente caracterizar a qualidade das energias (limpas e degradadas). Nos processos termodinâmicos irreversíveis a entropia do universo sempre aumenta, o que causa a passagem de um estado de maior ordem energética para um estado de menor ordem energética ou de desordem energética. A energia potencial elétrica, contida em substâncias químicas como os combustíveis, por exemplo, apresenta uma entropia bem menor do que os produtos resultantes do processo de combustão (a energia calorífica dos gases resultantes). De acordo com a segunda lei, os processos espontâneos são caracterizados pela conversão de um estado de ordem para um estado de desordem termodinâmica, e representam os modos energeticamente equivalentes em que um sistema material se encontra internamente quando observado isoladamente a uma dada temperatura. A entropia é a função de estado que vai caracterizar este comportamento nos sistemas. Por exemplo, uma certa quantidade de substância, isolada termicamente, apresenta uma energia interna (arrumação interna de átomos ou moléculas) que pode caracterizar um estado físico sólido, líquido ou gasoso. Nesta seqüência, saímos de um estado de ordem para um estado de desordem desta substância, isto é, uma situação de menor entropia (maior arrumação interna) para uma situação de maior entropia (menor arrumação interna).

Em todos os processos espontâneos existentes na natureza vamos ter o aumento da entropia ($\Delta S > 0$), mesmo num caso extremo, quando a energia interna permanece constante ($\Delta U = 0$), a temperatura e a pressão também permanecem constantes, como é o caso da expansão livre dos gases, onde a variação de entropia se encontra relacionada apenas ao aumento do volume. Em 1877, o físico austríaco Boltzmann apresenta uma definição alternativa para entropia, que passa a depender de uma função do número de microestados termodinâmicos de um sistema que apresentam a mesma energia (W), e é expressa por: $S = K \ln W$ (K representa um valor constante denominado de constante de Boltzmann, e \ln é o símbolo da função matemática logaritmo neperiano). Sendo a teoria termodinâmica uma ciência que se aplica para descrever sistemas de uma infinidade de partículas (só para se ter uma idéia, 1 mol do gás com aproximadamente 10^{23} moléculas livres, umas das outras

confinadas em um recipiente, ocupa aproximadamente um espaço de 24 litros em condições normais a 20 °C de temperatura e a 1 atm de pressão atmosférica), esta definição de entropia veio estabelecer uma natureza probabilista de ocorrência para as funções de estado, e colocar esta ciência com a característica de ser uma termodinâmica estatística. A mecânica estatística clássica também vinha sendo desenvolvida neste período pelo próprio Boltzmann, por Maxwell, e por outros físicos da época, com o objetivo de descrever sistemas complexos de muitas partículas a partir de funções de distribuição de estados de energia.

IV.5 A energia desenvolvendo outras ciências

Em 1878, o físico americano Gibbs apresentou um novo critério para a espontaneidade, definindo uma função de estado de energia (G), que posteriormente foi denominada de energia livre de Gibbs, como: $G = H - TS$. H representa uma nova função de estado de energia, a entalpia (do grego *enthalpein*, que significa aquecer). A função entalpia é definida por: $H = U + PV$, e atua na termodinâmica de forma a que, quando um sistema recebe calor e aumenta sua energia interna, o mesmo se aquece, isto é, aumenta sua entalpia, sem a necessidade da realização do trabalho ou tornando o trabalho realizado desprezível, o que é previsto na primeira lei (a da conservação da energia: $\Delta U = Q + W = Q + P\Delta V$). Vejamos como isto ocorre formalmente, variando a entalpia com incidência de calor a pressão constante: $\Delta H = \Delta(U + PV) = \Delta U + P\Delta V = Q - P\Delta V + P\Delta V$. Que resulta formalmente em: $\Delta H = Q$ (a variação da entalpia associada apenas ao calor). Podemos citar como exemplo que as transformações bioquímicas (reações bioquímicas), no meio ambiente, normalmente ocorrem a pressão e temperatura constantes, onde vamos ter pela 2ª lei que: $\Delta S \geq (Q/T) \geq \Delta H/T$, o que leva a concluir que: $\Delta H \leq T\Delta S$ ou $\Delta H - T\Delta S \leq 0$ (a igualdade refere-se à reversibilidade dos processos). Desta forma, a variação da função livre de Gibbs: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S \leq 0$. No caso dos processos espontâneos: $\Delta G < 0$ (a igualdade não é levada em conta, por estarmos tratando com processos irreversíveis). As variações de ΔH e de ΔS , se positivas ou negativas, é que vai estabelecer quando espontaneamente uma reação é quimicamente favorável ou desfavorável. Essas funções de energia introduzidas na teoria termodinâmica vieram para disciplinar teoricamente as reações químicas e bioquímicas, trazendo interdisciplinaridade para as ciências que vinham se desenvolvendo na época de forma independente. Por suas contribuições, Gibbs é considerado um dos responsáveis por transformar a termodinâmica em uma ciência de grandes aplicações, como a de ser utilizada para descrever o comportamento energético das reações químicas em geral.

V. A energia eletromagnética: algo recente

V.1 A eletricidade gerando energia independente do magnetismo

O fenômeno de interação magnética já era conhecido, indagado e motivo de curiosidade desde os tempos de Tales de Mileto no ano de 580 a.C. O desenvolvimento da bússola pelos chineses, apesar de ter antecipado as grandes navegações, os pólos magnéticos da Terra atribuídos a Gerardus Mercator, data de 1546. As propriedades magnéticas da matéria só começam a ser justificadas pela física clássica a partir de Ampère no século XVIII, e nossa concepção atual data do século XX, com o advento da mecânica quântica. Quanto aos fenômenos de natureza elétrica, os primeiros experimentos têm origem na Grécia, na Idade Antiga. Surgem com a eletrização por atrito do âmbar, denominado na época de “electron” por sua capacidade de eletrificação (material ainda hoje utilizado para fazer adereços como o colar). Um outro registro da experiência dos gregos com o âmbar só ocorre no século XVI, com Gilbert, que também verificou ser possível eletrizar outros materiais. Porém uma definição relativa à observação do fenômeno de atração e repulsão elétrica é atribuída a Cabaeus somente em 1630 e, por volta de 1660, Otto de Guericke constrói a primeira máquina eletrizadora, quando também ficou evidenciada a natureza atrativa e repulsiva da eletricidade.

Máquinas eletrostáticas são geradores que, a partir do trabalho mecânico, eletrizam por atrito para produzir uma eletricidade (energia eletrostática) com um alto potencial elétrico. As máquinas de atrito, como é o caso da máquina de Guericke, foram às primeiras formas desenvolvidas para a geração de eletricidade em quantidade significativa. As máquinas de atrito apenas realizam, de forma mais prática, geralmente por rotação de um isolador atritado com um material adequado, uma forma de eletrização já conhecida desde a antiguidade, quando alguns materiais isolantes eram atritados entre si. Em 1776, Alessandro Volta inventa um importante instrumento para as investigações nesta área, o “eletróforo”. Consistia em uma placa isolante eletrizada por atrito, para em seguida eletrizar com sinal contrário por contato, uma placa metálica com bordas arredondadas suportada por um cabo isolante. Com o afastamento entre ambas as placas, provocava-se um aumento de tensão, onde pequenas faíscas podiam ser observadas entre as placas metálicas (se observa daí outras possibilidades de eletrização). Verificava-se que o processo de eletrização podia ser repetido enquanto a placa isolante estivesse eletrizada. Verificava-se também que processo de carga na placa metálica do eletróforo podia ocorrer por um fenômeno de indução da placa isolante eletrizada, sem a necessidade do contato, a partir da existência de um aterramento. Este processo de geração de eletricidade por indução, que

não ficava restrito apenas a fricção, com o invento do eletrofo, desencadeou o desenvolvimento das “máquinas de influência”. Com o tempo, estas máquinas de influência foram sendo aperfeiçoadas e ficando mais potentes. Neste período, no século XIX, já eram conhecidas formas mais eficientes de geração de eletricidade para alimentar circuitos com altas correntes elétricas e baixo potencial elétrico, inicialmente para estudos da eletrólise e de “circuitos galvânicos” (os geradores eletroquímicos e posteriormente os geradores por indução eletromagnética).

A máquina construída originalmente por James Wimshurst em 1884 (que se encontra hoje em um museu em Chicago) tornou-se a máquina de influência mais difundida na atualidade nos museus e centros de ciências (**figura 4**). Consiste em dois discos isolantes, originalmente de vidro ou ebonite, com uma série de setores metálicos colados, que giram em sentidos opostos a curta distância. Duas barras neutralizadoras cruzadas, uma em frente a cada disco, formam dois pares de eletróforos de funcionamentos contínuos para geração de eletricidade.

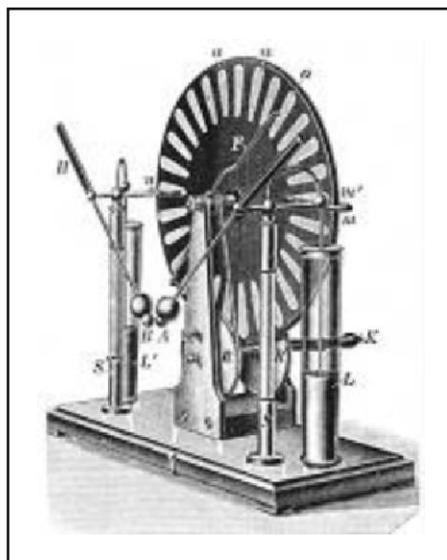


Fig.4- gerador eletrostático

Praticamente toda a pesquisa inicial sobre eletricidade iniciadas nos séculos XVII deve-se a estas primeiras fontes de energia elétrica, que serviram principalmente para estudos e desenvolvimento da teoria eletrostática. Ao fim do século XIX, ainda existiu um breve período aplicações médicas em eletroterapia com estas máquinas sendo usadas como fontes de alimentação para produção de raios X. Podemos dizer que a era das máquinas eletrostáticas de discos chegou ao fim, ao menos para fins da investigação científica, com o desenvolvimento do gerador de Van de Graaff, primeiramente descrito em 1931 (uma enorme máquina construída por Van de Graaff em 1934, que está em exposição no Museu de Ciências de Boston). Esta máquina foi muito utilizada em pesquisas na área de Física de Altas Energias no século passado, mas é também ainda muito comum na atualidade em laboratórios de ensino e como peça de exposição para mostrar os fenômenos eletrostáticos nos museus e centros de ciências. Consiste basicamente em uma correia isolante que se eletriza em seu movimento por atrito e transporta esta carga até o interior do terminal esférico do gerador que se eletriza a partir de uma descarga corona entre pontas condutoras ligadas a este terminal e a superfície da correia eletrizada. O gerador de Van de Graaff gera tensões muito altas da ordem de grandeza de 10^5 volts em seu terminal esférico, em virtude da alta concentração de carga que aí se verifica.

Os geradores eletrostáticos trazem subsídios a que, os fenômenos elétricos, apareçam para estudo de uma forma mais definida, a partir do século XVIII, tendo como principais adventos: 1) a identificação de duas espécies de eletricidade: a positiva e a

negativa, atribuída a Du Fay; 2) a idéia de tensão, inicialmente associada à eletricidade estática, foi introduzida por Benjamin Franklin entre 1747 e 1748, com a finalidade de justificar o funcionamento da garrafa de Leiden (acumulador eletrostático de carga); ele ainda estabeleceu que toda eletrificação representa a separação das duas formas de eletricidade (induzindo assim o conceito de matéria eletricamente neutra por conter igualmente as duas naturezas de eletricidade); 3) a eletricidade em animais, que data de 1771; 4) o condensador elétrico (acumulador de carga) de Alexandre Volta que data de 1775; 5) as leis de eletrização da matéria por ficção, somente atribuídas a Coulomb que datam de 1779; 6) a lei de Coulomb, que rege a interação entre cargas elétricas [a força eletrostática (F) é diretamente proporcional ao produto das cargas interagentes (q_1 e q_2) e inversamente proporcional ao inverso do quadrado da distância que as separam: $F = K q_1 \cdot q_2 / d^2$], data de 1785, mostrando formalmente a maneira com que as eletricidades se influenciam; 7) o termo potencial elétrico (V), que foi utilizado por Laplace em 1784, quando divulgava seu trabalho sobre um operador diferencial matemático denominado na atualidade de operador laplaciano (o termo tensão, associado posteriormente à diferença de potencial elétrico, já havia se estabelecido anteriormente).

Diante de todas estas contribuições para a eletricidade, um ponto ainda se mantinha desconhecido quanto à natureza da eletrificação dos corpos. Seria uma propriedade da matéria ou haveria uma eletricidade pura (uma “substância” ou mesmo uma “partícula” que comporia determinados meios materiais)? Na época, relativo à teoria do calor, existia uma crença do calor como uma substância, o calórico, e não como uma propriedade da matéria (energia térmica). Porém na eletrização a natureza revelou uma realidade contrária à do calor (energia transmitida, trocada, ou transferida), mostrando ser um fluxo de partículas, uma eletricidade pura negativa contida na matéria. Esta idéia ficou evidenciada a partir dos experimentos de Crookes por volta de 1870. Nestes experimentos observaram-se as descargas elétricas fluorescentes (os raios catódicos), produzidas no cátodo eletrizado contido em ampolas de vidro em atmosfera evacuada. A proposta da hipótese da existência de uma “unidade natural de eletricidade” aparece em 1874, com Stoney, que sugeriu o nome “electrons” para estas unidades naturais quantizadas de eletricidade. Com base nas informações dos trabalhos em eletrólise já desenvolvidos por Faraday, coube a Stoney determinar um valor, que era (1/16) do valor da carga atual.

Na eletrólise, observou-se que a ação química de uma corrente elétrica (eletricidade em uma solução e a massa da substância depositada no eletrodo por passagem de eletricidade), implicavam a necessidade da existência de uma unidade elementar da carga, na oportunidade, não confirmada por Faraday, e nem mesmo posteriormente por Maxwell (hesitaram em aceitar tal idéia, por não saberem como levá-la para justificar a condução nos metais, só descoberta no século seguinte com o desenvolvimento da mecânica quântica). Em 1876, nas mesmas ampolas, foram descobertos por Goldstein os “raios canais”, que atravessavam os orifícios canais pertencentes ao cátodo. As partículas dos raios canais apresentavam uma massa muito superior à massa da eletricidade pura, os raios catódicos (em torno de 1.840 vezes maior que a dos “eléctrons”). Posteriormente, com o experimento de Milikan das gotas de óleo, se conseguiu uma maior evidência da

natureza quantizada da carga elétrica e também determinar a carga elementar do elétron aceita nos dias atuais: ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

Porém, é somente a partir dos experimentos de Rutheford e do modelo atômico de Bohr em 1913, que vamos chegar a nossa concepção atômica atual, e a puder, a partir daí, afirmar que um corpo se eletriza por saída (ionização positiva) ou entrada (ionização negativa) de elétrons nos átomos, que em situação normal se encontram eletricamente neutros na composição da matéria. Estes fatos históricos apresentados até aqui, procuraram mostrar um processo evolutivo da origem da eletricidade, de certo modo, em separado da ciência do magnetismo. Na verdade, a ocupação do elétron em um nível de energia atômico só pôde ser justificada levando-se em conta a propriedade magnética de spin eletrônico associada ao princípio de exclusão do físico austríaco Wolfgang Pauli, enunciado em 1925.

Como ponto de partida para a eletrodinâmica, os primeiros relatos sobre os movimentos de carga elétrica datam de 1786 e são atribuídos a Luigi Galvani. É porém no século seguinte que a teoria eletromagnética começa a ser formada com a junção dos fenômenos elétricos aos fenômenos magnéticos. As primeiras fontes de energia elétrica eram necessárias para movimentar as cargas, desenvolver uma eletricidade dinâmica, uma vez que daí a natureza iria comprovar ser possível a conexão da eletricidade com o magnetismo. O funcionamento da primeira bateria elétrica foi apresentado em 1801 na França ao imperador Napoleão Bonaparte por Alexandre Volta, o que lhe valeu título e prestígio no império napoleônico.

As primeiras pilhas a seco são atribuídas ao químico francês Charles Desormes, na mesma época, e consistiam de discos metálicos separados por uma pasta salina. Em 1830 Sturgeon inventou uma pilha de vida mais longa utilizando o amalgamento (misturando mercúrio à placa de zinco das pilhas voltaicas) e em 1836 John Daniell aumentou a vida média das pilhas voltaicas separando com uma membrana seus elementos de cobre e zinco. É importante observar que o desenvolvimento de pilhas mais eficientes e duradouras, como as de níquel-cadmínio, continua nos dias atuais, sendo consideradas hoje em dia nossa principal fonte de energia elétrica móvel. Afirmase que a primeira idéia de pilha que levaria a uma CaC (célula combustível) foi desenvolvida em 1801 por Humprey Davy, a partir de estudos usando ácido nítrico e carbono. Porém William Grove apresenta-se um pouco depois como o precursor das células combustíveis, utilizando um eletrodo de platina imerso em ácido nítrico e um eletrodo de zinco imerso em sulfato de cobre. Especulava, sem uma fundamentação teórica definida, que as reações que ocorriam em sua bateria a gás se davam a partir do contato entre o eletrodo, o gás e o eletrólito. Posteriormente, Fiedrich Ostwald, em 1893, determinou as funções dos vários componentes de uma célula combustível (eletrodos, gás, eletrólito). Em 1939 foi desenvolvida por Francis Thomas Bacon, utilizando eletrodos de níquel, uma célula alcalina em alta pressão 220 atm e a uma temperatura de 100 °C. Dava início ao desenvolvimento de células combustíveis, que já se mostraram na época como de desenvolvimento confiável para no futuro serem uma das possíveis fontes de energia elétrica. Utilizam uma fonte de produção do gás

hidrogênio com a função de reagir com os eletrodos, produzindo energia elétrica, água, e liberando calor.

Com a possibilidade de geração da corrente elétrica inicia-se o desenvolvimento da teoria de circuitos. Inicialmente Wollaston, com finalidades químicas a partir de 1803, conseguiu isolar por eletrólise alguns elementos químicos como o paládio, o rádio, entre outros elementos químicos que foram isolados posteriormente. É atribuído a Wollaston ser o primeiro cientista a observar a produção de corrente elétrica em meios condutores utilizando as baterias eletroquímicas. Ampère, em 1820, em seus estudos introduz o termo eletrostática para caracterizar os fenômenos produzidos pela carga em repouso e também o de eletrodinâmica para o estudo do comportamento de cargas em movimento. Para ele se podia distinguir a tensão elétrica (de Franklin), responsável por fenômenos eletrostáticos, da corrente elétrica que provoca efeitos magnéticos, já detectados por Oersted, como veremos mais adiante e que faziam parte do programa de investigação de Ampère. Existiam, porém, programas específicos para o desenvolvimento da teoria de circuitos, como a do alemão Georg Ohm em 1825, que realizou uma série de experimentos com uma bateria, sucessão de pilhas voltaicas ligadas sucessivamente a diferentes fios condutores metálicos, de comprimento e seção reta diferentes. Constituíam o que denominou de “circuitos galvânicos”. Seu objetivo era medir a quantidade de eletricidade que passava na seção reta de cada condutor em função de um tempo de observação definido, o que denominou de corrente elétrica (I). Para efetuar esta medida, Ohm utilizou uma mola de torção associada ao galvanômetro desenvolvido por Ampère, com uma calibração tal que a força de torção no ponteiro indicador fosse proporcional à intensidade de corrente (um amperímetro de escala linear). Ohm observou que quanto maior o comprimento do condutor havia uma “perda de força”, um parâmetro que foi definido por ele como sendo a relação: $(I - I_0)/I_0$, onde I representava a intensidade de corrente medida para os fios mais compridos e I_0 a intensidade de corrente para o fio de menor comprimento, utilizado como referência. Desta forma, a perda de força (que na concepção atual denominaríamos de redução do potencial elétrico) era expressa pelo desvio relativo de redução de corrente em relação à maior corrente de referência utilizada (I_0). Havia dificuldades experimentais nesta investigação por uma redução na “perda de força” ocasionada por uma possível redução na concentração salina da pilha.

Foi sugerido a Ohm que refizesse seu experimento com uma pilha mais estável, sendo recomendada a utilização de um termopar de cobre-bismuto, já desenvolvido a partir do efeito Seebeck, descoberto em 1821. Na oportunidade da divulgação dos resultados, ele utiliza o termo força eletromotriz (ϵ), aplicado ao circuito, como sendo algo relacionado ao produto da intensidade de corrente (I) pela resistência elétrica (R) oferecida pelo circuito (aparecendo então os primeiros registros da relação escrita posteriormente por Ohm). Em 1827 Ohm desenvolve novos experimentos com seus “circuitos galvânicos”, quando estudou a condutividade dos condutores e também formulou a dependência entre a força eletromotriz (ϵ), a resistência elétrica (R), e a corrente elétrica (I), estabelecendo que $\epsilon = R \cdot I$, formalmente (costumamos utilizar na atualidade um termo alternativo: diferença de potencial, V , introduzido pelo matemático Georg Green em 1828).

Em 1837, o físico francês Claude Pouillet repetiu as experiências de Ohm obtendo os mesmos resultados, mas com uma contribuição adicional que levava em conta a resistência interna (r) dos geradores, obtendo a relação de Ohm-Pouillet: $I = \varepsilon / (R + r)$. Outra importante contribuição vem através do físico alemão Gustav Kirchhoff, entre 1845 e 1847, que realizou uma série de experiências com redes elétricas (conjunto de malhas planas e mesmo tridimensionais seriadas e em paralelos, isto é, de forma mista. Nestas experiências ele utiliza a lei de conservação da carga e da conservação da energia para obter o que denominou de lei das malhas e lei dos nós. Verificou que em um nó a quantidade de corrente que entra pelos vários ramos do circuito é igual à quantidade que sai do nó pelos outros ramos associados. Com respeito a uma malha do circuito, composto de baterias e resistências, foi registrado que a soma das forças eletromotrizes das baterias é igual à soma das quedas de potencial ou voltagem na resistência (a mesma terminologia é usada na atualidade).

V.2 O magnetismo associado à eletricidade e produzindo energia elétrica

Em 1807 o físico dinamarquês Oersted inicia experiências com a finalidade de buscar relações entre a eletricidade e o magnetismo. Porém somente no período entre 1819 e 1820, ministrando um curso na Universidade de Copenhague, envolvendo eletricidade, galvanismo (circuitos) e magnetismo, vistos como teorias em separado, é que utilizando uma agulha magnética disposta perpendicularmente a um fio condutor de um circuito galvânico, nada observou na disposição da agulha, porém dispendo-a paralelamente ao fio, ela era defletida de seu alinhamento original, mostrando haver uma interação com o fio. Este fato foi do conhecimento do físico e químico inglês Michael Faraday. Oersted comunica seus resultados sobre os efeitos magnéticos da corrente à Academia Francesa de Ciências em 1820, e nos Anais de Filosofia, n. 16, mostra ter analisado, ainda qualitativamente, que a lei de ação e reação de Newton continua válida na interação de um fio com corrente e um ímã. No entanto foi somente em 1823 que Oersted veio a confirmar a circularidade do magnetismo em volta do fio.

Ampère, em 1820, também efetua suas experiências sobre o efeito magnético da corrente e também observa a circularidade do magnetismo em volta de um fio com corrente. Na oportunidade, observou que o produto do “campo magnético” (\mathbf{B}) pela circularidade ($2\pi r$) era proporcional à corrente elétrica (na atualidade é denominada lei de Ampère-Oersted: $\mathbf{B} \cdot 2\pi r = \mu_0 I$; com μ_0 sendo a permeabilidade magnética do meio). Ele percebe que a tensão elétrica responsável por fenômenos eletrostáticos não provoca os efeitos magnéticos da corrente observados por Oersted. Ele observa a existência de força entre fios paralelos com corrente (atrativa, se as correntes se encontram no mesmo sentido e repulsiva, se em sentidos contrários). Ele também, nesta oportunidade, verifica o comportamento de uma bobina de fio condutor de forma circular (a que denominou de solenóide), que quando com corrente apresenta efeitos magnéticos semelhantes aos das barras imantadas.

Em 1822, Ampère se preocupou com a origem do magnetismo natural da matéria, apresentando a idéia de que o magnetismo intrínseco era de origem de uma substância magnética que apresentava em seu interior pequenos círculos (espiras) de correntes (denominadas de correntes amperianas), ressaltando ainda que as substâncias não-magnéticas tinham estas espiras dispostas aleatoriamente. Estávamos muito longe de conhecer as propriedades magnéticas da matéria, já que ainda iniciávamos um processo de conhecimento da estrutura atômica com a distinção por Avogadro entre átomos e moléculas, e estávamos muito longe de conhecer a propriedade de spin das partículas elementares e as propriedades paramagnéticas e ferromagnéticas da matéria fundamentadas pela Mecânica Quântica, o que se deu no século XX.

Outro registro importante surge em 1820 através dos físicos franceses Jean Biot e Félix Savart, que comunicam à Academia Francesa de Ciências ser a intensidade do “campo magnético” criado por uma corrente elétrica (fio limitado de corrente) proporcional ao inverso da distância (que foi posteriormente corrigida para o inverso do quadrado da distância). Na mesma época outros pesquisadores repetiram e confirmaram esta primeira conexão entre a eletricidade e o magnetismo, e algumas aplicações nesta área para o futuro da ciência e tecnologia começaram a surgir em 1831, com a construção do eletro-ímã na universidade de Yale. Desenvolvido pelo físico norte-americano Joseph Henry, o eletro-ímã conseguia levantar uma carga de uma tonelada. Neste mesmo ano Henry descobre o princípio de funcionamento do motor elétrico (que converte energia elétrica em mecânica), a partir da força magnética, numa bobina girante com corrente, produzida por um ímã situado nas proximidades. Henry chegou a iniciar experiências em que observou o fenômeno da indução magnética (fenômeno que provocava o sentido inverso do observado por Oersted-Ampère, isto é, obter eletricidade a partir do magnetismo), feito posteriormente atribuído ao físico e químico inglês Michael Faraday, que foi quem efetuou a primeira divulgação deste importante fenômeno em 1831.

Quando iniciou a trabalhar com as correntes elétricas da Física, Faraday teve a oportunidade de conhecer os trabalhos em eletrostática de Coulomb e os efeitos magnéticos da corrente de Oersted-Ampère, observando que não havia sido investigado o sentido inverso. Este ato de racionalidade o levou à iniciativa de tentar mostrar a eletricidade a partir do magnetismo. Faraday observou que o deslocamento de um ímã nas proximidades de um fio produzia corrente elétrica. Observou ainda que uma corrente variável passando por uma bobina provocava o aparecimento de uma corrente transitória em outra bobina. A estes fenômenos Faraday denominou de indução magnética. Neste mesmo ano Faraday inventou o primeiro gerador (que viria a se constituir em nossa principal forma de gerar energia elétrica ainda nos dias atuais), uma pequena máquina que convertia força mecânica (energia mecânica na notação atual) em força elétrica (energia elétrica na notação atual) utilizando o fenômeno recém-descoberto da indução magnética. Na verdade, Faraday já havia registrado, em publicação datada de 1821, que em experimentos realizados havia convertido força mecânica em força elétrica. Neste período em que ocorria a revolução industrial, já se mostrava iminente a necessidade e a visão do conhecimento científico para fins tecnológicos.

Em 1838 Faraday retomou experiências realizadas com limalhas de ferro próximas dos ímãs para, em função da configuração assumida, visualizar uma grandeza que idealizou e denominou de linhas de força. O fato de essas linhas virem a ocupar todo o espaço em volta do ímã fez Faraday pensar nelas como um campo de forças, uma grandeza que em sua propagação no espaço necessita ter uma característica vetorial, que denominou de campo magnético (\mathbf{B}) em 1845. Precisou estabelecer a idéia de um fluxo para este campo de força: $\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$ (o produto do campo pela área frontal em que se dá o fluxo). Este fluxo estático não gerava eletricidade, necessitando se estabelecer uma variação deste fluxo ($\Delta\Phi_B$) em função do tempo (t) para produzir força eletromotriz (ε). A expressão formal da lei de Faraday é: $\varepsilon = \Delta\Phi_B/\Delta t$. Essa é a forma mais eficaz que nós, seres humanos, aprendemos para produzir a energia elétrica tão necessária em grande quantidade.

Faraday (**figura 5**) nasceu em uma família pobre. Naquela época a ciência era algo de divulgação restrita a quem pertencia às academias de ciências e a seus alunos, normalmente de famílias nobres ou burguesas. A oportunidade que teve de entrar em contato com o conhecimento científico deve-se ao fato de ter trabalhado numa gráfica como encadernador de livros. Sua grande oportunidade veio após ter assistido a algumas palestras do químico Humpry Davy, quando procurou transcrever algumas de suas idéias, encadernando-as e enviando-as ao palestrante, juntamente com uma solicitação de emprego, passando daí a ser assistente de Humpry em seu Laboratório. Com sua tamanha capacidade conseguiu em laboratório isolar o benzeno e descobrir dois novos cloretos de carbono, no início de sua carreira. Um de seus maiores feitos em Química, com base nos trabalhos de eletrodeposição em metais efetuados por Humpry, foi estabelecer as leis da eletrólise, apresentadas em 1857.

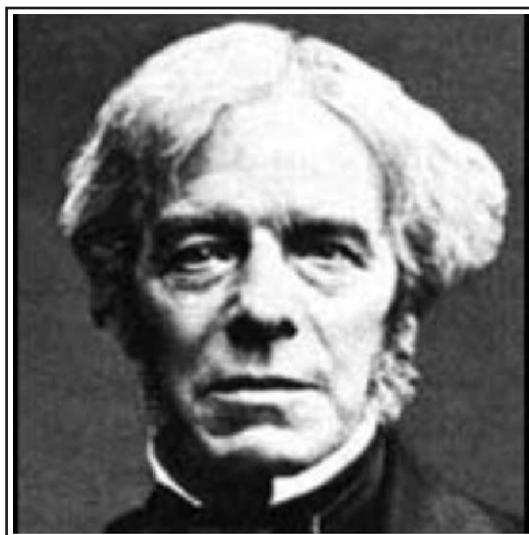


fig. 5 - Michael Faraday

A Lei de Faraday da indução eletromagnética estabelecia a geração de eletricidade induzida pelo magnetismo dinâmico, porém faltava algo a complementar, uma vez que não tratava das relações de energia nesta transformação. A tradição que ainda vigorava naquela época era de que uma grandeza gerada que produzia uma ação de mover poderia ser denominada “força motriz” (eletromotriz), já caracterizada nos circuitos galvânicos com pilhas. Porém, sabemos hoje que Heinrich Lenz, físico de origem germano-russo, em 1833, antes de Faraday, efetuou a complementação necessária, por esta razão denominada na atualidade de lei de Faraday-Lenz, quando comunicou à Academia de Ciências de São Petersburgo um trabalho em que ressaltou que a corrente de auto-indução

já observada por Henry em 1832 apresenta um sentido contrário à corrente que a criou, o que significa dizer que os efeitos de uma corrente induzida por uma força eletromotriz sempre se opõem à força eletromotriz que induziu este efeito. O fenômeno de efeito contrário impõe, para mantê-lo, a necessidade de realização de um trabalho externo (força vezes deslocamento), o que expressa a necessidade de transformar energia mecânica em energia eletromagnética, uma vez que não poderíamos movimentar um ímã livremente, sem nenhum esforço, próximo ao núcleo de uma bobina em circuito fechado e criar energia elétrica, como único efeito.

V.3 As ondas eletromagnéticas transmitindo energia

Atribui-se a Faraday ser o primeiro físico a introduzir a idéia de campo na Física, quando demonstrou que uma luz plano-polarizada submetida a um campo magnético muito intenso tinha seu plano de polarização rotacionado (efeito Faraday), o que permitia indagações sobre a natureza eletromagnética da luz. Faraday também observou que os corpos reagem ao campo magnético de forma diferenciada, de modo que aos materiais que conduzem bem o magnetismo denominou de paramagnéticos e aos que conduzem mal denominou de diamagnéticos (como o antimônio e o bismuto). Sabemos na atualidade que Faraday, no entanto, não tinha os conhecimentos matemáticos necessários à relação entre os campos elétricos e magnéticos, ficando para o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell não somente esta função, mas toda uma tarefa de desenvolver a teoria que unifica o eletromagnetismo e associa a natureza ondulatória da luz à transmissão de um campo elétrico e de um campo magnético relacionados. Em 1865, Maxwell apresentou no *Philosophical Magazine* 29, seu trabalho mais importante, em que demonstra que a luz é uma onda eletromagnética que se transmitia no éter luminífero cartesiano existente no vácuo.

Os campos elétrico e magnético são criados para justificar a ação à distância de uma carga elétrica em repouso e em movimento (corrente elétrica), que podem se transmitir no espaço de forma independente (como campos eletrostáticos e magnetostáticos no vácuo ou em meios materiais); e como campos dinâmicos interdependentes, como no caso dos campos oscilantes associados às ondas eletromagnéticas. São grandezas, estritamente teóricas, uma vez que só podem ser observadas diretamente pelo efeito da força de ação à distância, em sua interação com a carga elétrica estática ou em movimento (corrente elétrica). Por gerar interação e provocar deslocamento da carga elétrica, estes campos são grandezas com capacidade de realizar trabalho mecânico e conseqüentemente efetuar transformações energéticas. Podemos daí efetuar a associação destes campos com a energia, e mais ainda, uma vez que os campos físicos podem ser vistos como potenciais transmissores de energia, como campos estáticos, por exemplo, se transmitindo nos fios condutores para produzir a corrente elétrica, e como campos dinâmicos, por exemplo, transmitindo a energia das ondas eletromagnéticas do espectro visível, das ondas eletromagnéticas dos meios de comunicação, entre outras situações. As próprias leis de

ação à distância: elétrica (envolvendo a propriedade: carga *versus* carga), magnética (envolvendo a propriedade: corrente *versus* corrente), e gravitacional (envolvendo a propriedade: massa *versus* massa), foram repensadas por uma ação: propriedade *versus* campo (carga *versus* campo elétrico, corrente *versus* campo magnético, e massa *versus* campo gravitacional).

Procuraremos mostrar registros de alguns estudos que induziriam a associação dos campos físicos como transmissores de energia (elétrica, magnética, eletromagnética ou luminosa, e gravitacional). Em 1840, no desenvolvimento da Teoria Termodinâmica, Joule e Helmholtz já haviam mostrado evidências em trabalhos independentes que a eletricidade é uma forma de energia pelo seu relacionamento com o calor. Em 1746, Euler já havia desenvolvido uma teoria da luz e cor na qual mostrava haver uma semelhança entre a luz e o som, afirmando que a luz é no éter a mesma coisa que o som é no ar. Trabalhos como o de Bouguer, datados de 1729, referiam-se à intensidade luminosa como algo que variava com o inverso do quadrado da distância da fonte. Posteriormente, em outro trabalho sobre graduação luminosa, ele introduz algumas grandezas como “quantidade de luz”, mais tarde identificada como “fluxo luminoso” e como “força absoluta de luz”, identificada posteriormente como “iluminação”.

A descoberta dos raios infravermelhos (posteriormente denominados de radiação térmica) em 1800 por Herschel, que observou com um termômetro enegrecido exposto ao espectro da radiação solar que a temperatura aumentava à medida que se aproximava da extremidade da cor vermelha, sendo mais alta ainda além do vermelho. Com a edificação da teoria eletromagnética, Maxwell, além de sintetizar o comportamento do campo elétrico e do campo magnético e mostrar sua interdependência, também mostra a natureza da luz como uma associação de um campo elétrico com o campo magnético se transmitindo no espaço em forma de uma onda. Como uma onda transmite energia, faltava nesta teoria uma grandeza desenvolvida para relacionar estes campos à energia. Esta grandeza foi formalizada pelo físico inglês John Henry Poynting no final do século XIX, e foi denominada posteriormente de vetor de Poynting. Tem a função de indicar no fluxo de um feixe de luz a direção de propagação e a intensidade da energia luminosa que está sendo irradiada no espaço. Trata-se de uma grandeza que envolve a intensidade do campo elétrico e do campo magnético para representar a intensidade média (I) com que se transmite a energia luminosa no espaço (por exemplo, a intensidade da radiação solar que chega à Terra, na camada superior de nossa atmosfera, é de aproximadamente 1.360 W/m^2 , também denominada de constante solar).

VI. A necessidade da dimensionalidade e os sistemas de unidades

Grandes desenvolvimentos científicos ocorreram no século XVIII, no campo da matemática e em especial na mecânica racional. Havia a necessidade de se buscar uma equivalência entre a mecânica vetorial desenvolvida por Newton e por seus seguidores ingleses, e a mecânica escalar desenvolvida no continente por Euler e Lagrange. Este fato trouxe aos pensadores da época uma crescente consciência da importância da análise dimensional. A idéia central era de que as forças que fossem conversíveis filosoficamente ou fisicamente, numa ou noutra teoria, deveriam ter a mesma dimensão física. Com esta preocupação com a dimensionalidade, nasce a necessidade de se criar um sistema de unidade padrão para ser também usado cientificamente. Para fins sócioeconômicos e de interesse comercial, já havia unidades arbitrárias por diferentes regiões, muitas vezes sem relações de dependências entre elas. Por exemplo, para o comprimento, a polegada; a de superfície, o alqueire; e a de volume, o galão; e a unidade de peso, a libra.

Um sistema racional absoluto foi instituído pela Academia de Ciências de Paris em 1790, o Sistema Métrico Decimal (obrigatório na França em 1840 e no Brasil em 1874). Este sistema foi pensado inicialmente para expressar medidas de comprimento, superfície, volume, capacidade, e peso. Atribui-se a Gauss um primeiro sistema absoluto aplicável à Física. O sistema decimal estendido aos vários ramos da física, o M. Kp.S., trabalhava com o metro para a unidade de comprimento, o quilograma para o peso e o segundo para o tempo. A massa substitui o peso como grandeza fundamental com os sistemas C.G.S. (1881) e no M.K.S. (1902). Ainda em 1901 o engenheiro elétrico italiano Giovanni Giorgi introduz no sistema MKS a unidade de intensidade de corrente (ampère), tornado MKSA, removendo uma distinção que ainda se fazia na época entre unidades da eletrostática e unidades eletromagnéticas.

Com o aparecimento de mais grandezas físicas fundamentais (a carga elétrica e a temperatura, além do espaço, tempo e massa, já existentes), se procurou incorporar como padrão no sistema MKS o Coulomb para a carga elétrica e o Kelvin para a temperatura. Porém, como a carga elétrica é definida a partir da corrente ($1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ ampère/segundo}$), e por sua vez o ampère é definido a partir da força magnética entre fios com corrente, a carga elétrica nada acrescenta dimensionalmente, além do espaço, tempo e massa da mecânica. Por outro lado a incorporação da temperatura como grandeza fundamental, através da escala absoluta Kelvin, também nada acrescenta pelo fato de a temperatura ser definida a partir da energia cinética. Assim, na natureza física podemos concluir que dimensionalmente todas as grandezas têm origem mecânica, no espaço, tempo e massa (MKS). Independentemente dos sistemas de unidades usuais, para muitas grandezas físicas houve a necessidade de se estabelecer um padrão de unidade, como a

caloria para expressar a quantidade da substância calórica em 1858 pelo físico francês Gustave Hirne. Posteriormente, com o calórico não mais identificado como uma substância que se transmitia de um corpo para outro, e sim como energia, continuou-se a utilizar esta unidade para expressar a energia (principalmente na termodinâmica, na físico-química, na bioenergética), cuja relação já havia sido determinada pelo equivalente mecânico do calor: 1 caloria = 4,18 Joules.

No início do século XX, com tantas formalizações teóricas estabelecidas e muitas outras se desenvolvendo, surge uma preocupação ainda maior com a dimensionalidade. A análise dimensional passa a ser de vital importância para relacionar grandezas tidas antes como não relacionáveis, e a partir daí passamos a ter um entendimento mais amplo tanto do relacionamento entre diferentes áreas da Física, como da Física com as outras ciências que vinham sendo desenvolvidas. Neste processo de integração, a grandeza física energia, originada na mecânica do espaço (L), do tempo (T) e da massa (M), assume um papel centralizador (sua dimensão física é igual a: ML^2/T^2), uma vez que qualquer que seja a forma de expressá-la: energia térmica, energia química, energia biológica, energia nuclear, energia luminosa, energia sonora, trata-se de algo homogêneo que apresenta uma única dimensionalidade física, trazida da *vis viva* cinética e da *vis viva* potencial, isto é, de origem mecânica. A dimensionalidade física mostrou definitivamente que não poderiam existir diferentes naturezas de forças, e como vimos, a distinção entre o que seria força, energia, e quantidade de movimento, era algo que vinha ocorrendo naturalmente na construção da teoria clássica até o final do século XIX.

VII. A relação massa-energia

VII.1 Um manancial de energia contido na matéria

Albert Einstein em 1905 apresenta o desenvolvimento da Teoria especial da relatividade. Na época já começava a existir uma tradição de que a pequenas distâncias fica difícil se determinar as forças, por serem grandezas de natureza vetorial (e também se medir experimentalmente), sendo mais proveitoso se descrever as propriedades do sistema pela energia (uma grandeza escalar). Dessa forma vai existir um uso pouco freqüente da força relativística, que poderia ser útil para determinar o trabalho relativístico (que é assumido pela relatividade, na sua formulação convencional da mecânica clássica, como o produto da força pelo deslocamento), que na relatividade conduz à formulação dada por: $W = mc^2 - m_0c^2 = (m - m_0)c^2 = (\Delta m)c^2$. Melhor seria relacionar este resultado à energia cinética relativista (relação assumida na relatividade da mesma forma que na mecânica clássica: $W = \Delta K = K$, se considerarmos K_{inicial} igual a zero). Obtém-se daí que: $K = mc^2 - m_0c^2$. Por definição, a energia relativista total (E) é o produto da massa relativista m por c^2 , isto é: $E = mc^2$. Desta forma, pela conservação da energia, a energia total é dada por: $E = K + m_0c^2$, observando ainda que a variação da massa em função da velocidade (v) é expressa pela transformação de Lorentz como: $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Como exemplo, vamos considerar uma partícula que apresente massa de repouso (elétron, próton, nêutron etc.), para verificar qual a velocidade desta partícula se sua energia cinética fosse igual à energia de repouso ($K = m_0c^2$)?

Para responder vamos tomar a equação relativista: $K = mc^2 - m_0c^2$, assumindo que $K = m_0c^2$, logo temos que: $m_0c^2 = mc^2 - m_0c^2 \rightarrow mc^2 = 2m_0c^2 \rightarrow m = 2m_0$, isto é, a massa relativista seria o dobro da massa de repouso porque a energia relativista é o dobro da energia de repouso (existe na relatividade uma equivalência direta entre massa e energia): $E \propto m$ (a energia relativista diretamente proporcional à massa relativista). Como, pelas transformações de Lorentz, a massa é expressa pela equação: $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$; vamos ter que $(m/m_0) = 2 \rightarrow [m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}/m_0] = 2 \rightarrow [1/\sqrt{1 - v^2/c^2}] = 2 \rightarrow (v^2/c^2) = 3/4 \rightarrow v = \sqrt{(3/4)c^2} \rightarrow v = 0,866 c$, o que significa dizer que uma energia cinética igual à energia de repouso representa uma energia cinética muito elevada pois se associa a uma alta velocidade para a partícula em relação à velocidade da luz. O fato de a energia de repouso (E_0) já dispor por definição de uma enorme fator multiplicador na expressão da energia: $c^2 = 10^{16}$, exige grandes velocidades para as partículas que apresentem uma energia cinética da mesma ordem de grandeza de sua energia de repouso.

Sabemos que ao ser usada a relação trabalho-energia cinética, estamos assumindo que a energia relativística total ($E=mc^2$) também se conserva. Por outro lado, no limite relativístico para pequenas velocidades, expandindo-se a expressão da energia cinética relativística, vamos obter: $K \approx m_0 v^2/2$. Resultado este colocado por muitos autores como uma evidência da Mecânica Clássica, um caso particular da Mecânica Relativística, o que é contestado pela epistemologia contemporânea através de Thomas Kuhn, uma vez que os princípios fundamentais destas duas ciências se contrapõem. Somente para efeito de ilustração, para a física clássica, o espaço, o tempo e a massa são grandezas absolutas que não variam quando observadas em diferentes velocidades, enquanto que na física relativística, o espaço, o tempo e a massa variam em diferentes velocidades, passando a ter relações entre si e a serem algo relativo ao movimento, para um dado sistema de referência inercial.

A mecânica relativista estabelece que um observador em repouso num sistema de referência inercial mede no objeto um comprimento L_0 , e vê este comprimento diminuir para L quando se encontra em outro referencial inercial em movimento em relação ao anterior. Vai também verificar que quanto maior é sua velocidade, mais curto se torna o espaço à sua volta do referencial em repouso. O tempo deixa de ser um invariante com o movimento e também sofre uma correção relativista, de acordo com o movimento. O tempo vai se passar mais lentamente num referencial em movimento (assim, uma unidade de tempo se torna mais longa para quem observa o relógio em movimento). A massa sofre igualmente uma correção na relatividade, de acordo com seu movimento. Conforme já mostramos anteriormente, a massa de uma pessoa também sofre uma correção relativista, tornando-se crescente por efeito do aumento de seu movimento (sem a pessoa engordar bioquimicamente!).

Neste exemplo que daremos agora, queremos mostrar que apesar de a massa de repouso do elétron ser muito inferior à massa de repouso do próton, a mecânica relativista prevê que o elétron em movimento pode apresentar uma massa relativista igual ou maior que a massa de repouso do próton. Sejam as energias de repouso destas partículas dadas por: $(E_0)_{\text{próton}} = 938 \text{ MeV}$ e $(E_0)_{\text{elétron}} = 0,51 \text{ MeV}$, vejamos como isto é possível!

Vamos determinar a velocidade necessária para que o elétron iguale a massa de repouso do próton. Sendo a razão entre a energia de repouso do próton e a energia de repouso do elétron igual a: $(938/0,51) = 1839,2 \approx 1840$, o que leva a se concluir que também a massa de repouso do próton é aproximadamente 1.840 vezes maior que a massa do elétron ($m_{\text{op}} = 1840 m_{\text{oe}}$). Logo, utilizando a correção relativista: $m_c = m_{\text{oe}} / \sqrt{1 - v^2/c^2} \rightarrow 1840 m_{\text{oe}} = m_{\text{oe}} / \sqrt{1 - v^2/c^2} \rightarrow 1840 = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \rightarrow v = 0,988 c$.

O que mostra que somente a uma altíssima velocidade (próxima à velocidade da luz, $0,988c$) o elétron conseguiria igualar e superar a massa de repouso do próton. Pela transformação de Lorentz, precisa ser compreendido que, a partir da velocidade obtida, qualquer aumento que se aproxime ainda mais da velocidade da luz leva a massa do elétron a crescer assustadoramente para uma massa de grandeza infinita. Por esta razão, temos como princípio relativístico que nenhuma partícula que apresente massa de repouso pode atingir ou superar em seu movimento a velocidade da luz (um limite relativista ao

movimento dos corpos). Por sua vez, nessas circunstâncias, também a energia total relativista e a energia cinética do elétron assumiriam proporções infinitas.

Em 1905, em um segundo artigo, Einstein afirmou que: “a inércia de um corpo será dependente de seu conteúdo energético” (essa afirmação permitiu a ele concluir que na cisão de átomos se libertaria uma energia igual ao excesso da massa multiplicada por c^2 . A concepção da existência de uma energia intrínseca na matéria, mesmo quando em repouso ($E_0 = m_0 c^2$), e quando na ausência de campos físicos externos, significou uma notável evolução para o conceito de energia. Por sua vez, passam a existir partículas relativísticas (como o fóton e o gráviton), que apresentam massa de movimento (m), mas não apresentam massa de repouso ($m_0 = 0$), o que torna sua energia total igual a sua energia cinética ($K = mc^2$, uma vez que vamos ter $m_0 c^2 = 0$).

Mais que uma lei, a expressão da energia relativista mostra estar contida na matéria uma fonte muitíssimo grande de energia, o que levou Einstein a pensar que a mesma poderia explicar a enorme quantidade de energia produzida por experimentos de fissão nuclear que vinham sendo desenvolvidos na época. Por exemplo, se tomarmos apenas 1 grama de matéria em repouso, qualquer que seja sua natureza (animal, mineral, vegetal), ela apresenta intrinsecamente uma energia $E_0 = 10^{-3} \text{kg} \times (3.10^8 \text{m/s})^2$, que dá aproximadamente 10^{14} Joules. Para efeito de comparação, as indústrias de açúcar e álcool do estado de Alagoas apresentam uma capacidade instalada em suas usinas termoelétricas da ordem de grandeza de 10^8 Joules por segundo. Para produzir 10^{14} Joules de energia, necessitariam trabalhar por um período de tempo de 10^6 segundos, o que corresponde aproximadamente ao tempo de um mês de geração, o que, relativisticamente, conseguiríamos com apenas 1 grama de massa, se pudéssemos transformar toda matéria em energia. No entanto, o princípio de conservação da quantidade de partículas pesadas, antes e após uma reação nuclear, impossibilitaria tal transformação.

VII.2 A energia das reações nucleares

A energia relativista desempenha na física muitas funções, sendo uma das mais importantes a de determinar a energia contida no núcleo atômico (a energia nuclear). Tudo começa a partir do fenômeno de que o somatório das massas individuais das partículas que compõem o núcleo atômico (prótons e nêutrons) é maior do que a massa do núcleo inteiro (integrado por estas partículas). Ocorre assim na composição nuclear uma não-conservação da massa que diminui vindo a se conservar a relação massa e energia relativista. A energia nuclear vai ser assim expressa por: $\Delta E = (\Delta m)c^2$, onde (Δm) é a perda de massa necessária para gerar a energia de ligação entre os núcleons (prótons e nêutrons). Por exemplo, a energia emitida pelas estrelas tem origem na fusão nuclear, onde dois núcleos leves formam um núcleo mais pesado, liberando energia. Neste tipo de reação vamos ter dois dêuterons (um próton ligado a um nêutron - ^1H , isótopo do hidrogênio), com massa total de suas partículas igual a $2. m_n + 2. m_p = (2 \times 1,008665 \text{ u} + 2 \times 1,007825 \text{ u}) = 4,03298$

u, que se fundem para formar o isótopo do hélio (^4He), de massa igual a 4,002603 u (como pode se observar, menor que a soma das massas das partículas individuais constituintes). O $\Delta m = 0,03298$ u corresponde a uma energia nuclear de ligação: $\Delta E = 0,03298 \text{ uc}^2$, que em milhões de eletronsvolts ($1 \text{ uc}^2 = 931,5 \text{ Mev}$) vai resultar em: $\Delta E = 28,30 \text{ Mev}$ (observe que uma grandiosa quantidade de energia é liberada na fusão nuclear em apenas um núcleo de isótopo de hélio formado, o que vem a despertar grande interesse como combustível no futuro, com o desenvolvimento de reatores de fusão).

Os reatores nucleares utilizados para produção de energia elétrica vêm utilizando o fenômeno de fissão nuclear do elemento químico radioativo urânio (^{235}U), que significa uma quebra estimulada por bombardeamento de núcleos pesados via uma reação em cadeia, estimulada com a emissão e absorção de nêutrons. Devido à escassez, baixa concentração do urânio radioativo em nossas reservas naturais na Terra, e à capacidade limitada das usinas de enriquecimento, aos riscos e dificuldades de armazenamento do lixo radioativo, à possibilidade (mesmo que pequena) de vazamento destas usinas em escala mundial, não temos crescido muito, nem investido nesta possibilidade de extração energética nos últimos dez anos. A outra alternativa que vem se procurando viabilizar tecnologicamente são os reatores por fusão de núcleos leves (um combustível abundante na natureza, como o isótopo de hidrogênio citado no exemplo acima). Estes reatores conseguem produzir cerca de 3,5 vezes mais energia que os reatores de fissão e não oferecem todos os riscos e problemas que foram colocados para os reatores de fissão.

No Sol, a energia que dá origem à vida na Terra surge em seu núcleo central a partir de uma reação de fusão nuclear entre núcleos do átomo de hidrogênio (reação em cadeia próton-próton, numa sucessão de três reações: na primeira, $^1\text{H} + ^1\text{H}$, resulta no ^2H ; na segunda, $^1\text{H} + ^2\text{H}$, resulta no ^3He ; e na terceira, $^1\text{H} + ^3\text{He}$, resulta no ^4He), que vão colidir na sucessão indicada para, no final, formar um núcleo de hélio estável. Nesta reação se verifica que a massa não se conserva (o que se conserva é a relação massa-energia einsteiniana), existindo uma perda de uma certa quantidade de massa ($\Delta m = 0,02871$) que se transforma em energia ($E = \Delta m \times c^2 = 26,7 \text{ MeV}$). Esta energia, ao final da reação em cadeia, aparece na formação de partículas elementares: a radiação gama (fótons altamente energéticos), parecida com os raios X pesados do tratamento por radioterapia de tumores cancerígenos do organismo humano. O Sol em sua constituição lembra a estrutura atômica, uma vez que, além de seu núcleo central (o caroço mais denso em matéria, composto principalmente de prótons-núcleo de hidrogênio e de núcleos de hélio), apresenta também uma coroa periférica que compõe a maior parte do seu volume, e é composta de elétrons (matéria bem menos densa). A altíssima temperatura existente na matéria estelar (a temperatura do núcleo estelar é cerca de 15 milhões de graus Celsius, a da coroa estelar é cerca de 10 mil graus Celsius, e sua periferia apresenta cerca de 5,5 mil graus Celsius), não permite que a matéria se estruture em forma de átomos e moléculas, mesmo em estado gasoso. A alta temperatura do núcleo solar justifica também a altíssima velocidade das partículas que compõem o combustível nuclear, necessária à aproximação entre dois núcleos de hidrogênio, já que a energia térmica consiste em energia cinética: $KT = \frac{1}{2}(mv^2)$; K sendo a constante de Boltzmann.

As reações de fusão nuclear só ocorrem a curtíssimas distâncias, da ordem de 10^{-13} metros, e a esta distância uma intensa força de repulsão coulombiana começa a ser vencida pela força de aproximação de dois núcleos. Assim, se os mesmos não se aproximassem munidos de uma altíssima energia de movimento, propiciada pela temperatura do núcleo estelar, os dois núcleos não se fundiriam em um único núcleo atômico, e não gerariam a radiação gama, altamente energética. Os fótons gama apresentam uma massa de repouso nula, e se transmitem para o espaço passando pela coroa solar com muitas dificuldades, por interagirem com os elétrons aí existentes. Com esta interação, a energia inicial dos fótons gama vai sendo atenuada a cada absorção pela matéria eletrônica e re-irradiação, e faz a luz ficar muito lenta nesta região. Este processo de atenuação energética até deixar o Sol leva muito tempo, em torno de 2 milhões de anos para percorrer a coroa solar, que não é tão extensa (da ordem de grandeza de 1 milhão de quilômetros). A radiação inicialmente gama que deixa o Sol, bem menos energética, é composta principalmente de um espectro que vai da radiação ultravioleta, passando pela radiação visível do violeta, ao vermelho, indo à radiação infravermelha (radiação térmica). Após este grande obstáculo, no espaço livre os fótons levam um tempo bem menor, apenas 8 minutos, para percorrer a distância de 150 milhões de quilômetros que separa a superfície do Sol da Terra.

VIII. A quantificação da energia

VIII.1 O *quantum* de energia uma idéia revolucionária

Max Planck em 1897 estudando o problema de radiação do corpo negro se preocupa em averiguar como a radiação e a matéria interagem e atingem o equilíbrio térmico. Utiliza como fundamentação teórica a teoria clássica da termodinâmica e da eletrodinâmica, procurando uma abordagem que levasse em conta os aspectos eletrodinâmicos da radiação, considerasse a irreversibilidade do processo, e conduzisse a radiação ao equilíbrio térmico. A idéia na época foi a de considerar um sistema conservativo, constituído pela radiação eletromagnética e por uma coleção de osciladores harmônicos clássicos, que denominou de ressonadores. No entanto, no cálculo da densidade de energia para grandes frequências, como a da radiação ultravioleta, seus cálculos conduziam a resultados não satisfatórios (fato que passou a ser denominado posteriormente de catástrofe do ultravioleta). Isto levou Planck, em 1900, a propor uma idéia audaciosa, assumindo que as dificuldades da estabilidade térmica poderiam ser resolvidas postulando-se a existência de *quantas* de energia finitos e discretos ($\epsilon_0, 2\epsilon_0, 3\epsilon_0, \dots$), o que veio a ser denominado de lei da radiação de Planck, onde um *quantum* de energia: $\epsilon_0 = h\nu$ é algo diretamente relacionado à frequência (ν) da radiação, que é igual ao inverso do período de tempo; e como constante, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, que veio a se tornar um importante parâmetro a estabelecer uma separação, uma delimitação quantitativa entre o universo clássico (o mundo macroscópico onde a energia nos objetos varia continuamente) e o universo quântico (o mundo microscópico onde a energia varia em porções discretas). Posteriormente denominada de constante de Planck, conseguiu dar a idéia da dimensão da quantidade de energia que atua nas transformações do microcosmo quando associada à frequência da partícula irradiante. Essa idéia mostra que a emissão e absorção da energia radiante pela matéria não é um processo contínuo, mas se dá através de pacotes de energia, de forma discreta através de *quantas* de energia ($E = n\cdot\epsilon_0$; com $n = 1,2,3,\dots$).

Neste contexto, Einstein (1905) foi bem mais longe que Planck, uma vez que, dando continuidade à quantização da energia, não se limitou a quantizar apenas os processos de emissão e absorção da radiação, como procedeu Planck, mas também quantizou a própria radiação. A hipótese dos *quantas* de luz, que pode ser considerada uma retomada da natureza corpuscular proposta por Newton no século XVII, denominados de fótons de energia ($E = h\nu$), que se propagam no vácuo com a velocidade da luz, era uma idéia bastante revolucionária na época. Isto porque após Maxwell já se encontrava bem estabelecida a natureza eletromagnética da luz como ondas, de forma que os fótons vieram trazer de volta para a Física uma polêmica iniciada com Newton e Huygens: a luz é onda ou partícula?

VIII.2- Efeitos da quantização da energia

O experimento do efeito “fotoelétrico” (a transformação mais direta da energia luminosa em energia mecânica) já havia sido observado por Franck Hertz em 1887, mas somente após Planck e Einstein se passou a ter um domínio claro do porquê de as quantidade de elétrons arrancados para fora de uma placa metálica (sua energia cinética, $K_c = mv^2/2$) não depender da intensidade de luz sobre a placa metálica, e sim da frequência de luz incidente: $K_c = hv - \phi$, onde ϕ é uma constante característica da dificuldade oferecida pela superfície do metal em liberar elétrons livres, denominada de função trabalho. Nele um fóton de luz incidindo sobre uma placa metálica, ao ser absorvido, consegue excitar o elétron para deixar a placa em movimento. Trata-se de um experimento pioneiro para caracterizar a natureza corpuscular da luz e a excitação de elétrons por *quantas* de luz. É mostrado pela conservação da energia que: $hv = K + \phi$, o que significa dizer que o trabalho que a luz realiza para arrancar os elétrons em movimento, depende da qualidade da energia incidente caracterizada pela frequência da luz (ν), isto é, do tipo de luz que chega ao elétron para arrancá-lo. Não é um fenômeno que dependa da quantidade de luz incidente, qualquer que seja a frequência, como previam os adeptos da natureza ondulatória da luz. A intensidade do fenômeno, sim, depende da intensidade de luz (quantidade de fótons), a partir do momento que tenhamos fótons qualificados para provocar o efeito em um maior número de elétrons da superfície do metal.

Um outro efeito de interesse refere-se ao efeito fotoelétrico secundário provocado em um meio semiconductor quando submetido a uma irradiação luminosa. Neste, a absorção de fótons não tem a função de arrancar elétrons do material, e sim a função de aumentar a população de elétrons de condução, inicialmente pequena, para torná-lo um meio mais condutor. As placas solares, por exemplo, uma importante fonte ecológica de produção de energia elétrica a partir da energia luminosa, utilizam o efeito fotovoltaico. Trata-se de utilizar a absorção da energia dos fótons de luz na superfície do material para estimular a migração de elétrons que irá causar uma separação de cargas no material eletricamente neutro, tendo como consequência a eletrização no local. O fenômeno da eletrização (separação de cargas: positiva de um lado e negativa do outro) ocorre ao se juntar dois semicondutores (como, por exemplo, placas de silício dopadas com diferentes impurezas) que apresentam condutividade elétrica de características diferentes. Um lado da junção tem tendência para conduzir por migração de elétrons, enquanto que o outro lado da junção vai conduzir por falta de elétrons de condução átomo a átomo. A placa fotovoltaica consiste desta junção de materiais com afinidade eletrônica diferente, em que vai haver uma transferência espontânea de elétrons de um lado para outro da junção, até um ponto onde ocorre uma saturação. Esta placa fotovoltaica, quando colocada para funcionar em circuitos, a saída dos elétrons da região negativa com o seu retorno à região eletrizada positivamente tende rapidamente a neutralizar a eletrificação inicialmente espontânea. Necessita possuir uma fonte de energia que dinamize a migração de elétrons, para evitar a neutralização das duas regiões eletrificadas da junção. Assim, a manutenção do

fornecimento de energia elétrica ao circuito exige a alimentação da célula por meio de uma fonte primária (no caso, a energia solar). Na atualidade aceitamos a natureza dual (onda e partícula) para a luz, uma vez que, por exemplo, quando nos referimos ao sinal que transmite energia das telecomunicações estamos nos referindo às ondas eletromagnéticas. Quando nos referimos à incidência de luz para provocar a fotossíntese, o efeito fotovoltaico, e o efeito fotoelétrico, estamos tratando com a natureza corpuscular, estamos tratando da excitação de elétrons na matéria (em átomos ou moléculas) com fótons (**figura 6**).



Fig. 6 - Excitação de elétrons em átomos ou moléculas por fótons.

A natureza dual da luz é descrita por dois modelos teóricos diferentes de tratar os fenômenos luminosos energeticamente. No entanto, não pode haver a composição de ambas as naturezas na descrição de um dado fenômeno. Não se pode adicionar a energia das ondas eletromagnéticas à energia fotonica no tratamento de um dado fenômeno.

IX. A estabilidade atômica

IX.1 Um início para estabilidade do elétron no nível atômico de energia

Uma nova etapa na concepção do átomo tem origem no início do século XX, com o físico inglês Ernest Rutherford, que ainda afirmava que o átomo de hidrogênio era uma estrutura complexa, constituída provavelmente de mil ou mais elétrons, o que era reafirmado por Thomson em 1904, ao dizer que o hidrogênio continha cerca de mil elétrons, utilizando seu modelo atômico conhecido como “pudim de passas”, que ainda situava os elétrons na parte interior deste pudim. Porém, sem mudar esta concepção, Thomson, em 1906, reformula seus resultados para o número de elétrons no hidrogênio, ao afirmar que o número de elétrons em um átomo situa-se entre 0,2 e 2 vezes o peso atômico de uma substância, e para o hidrogênio este número não poderia diferir muito de um elétron.

Por volta de 1911, com os experimentos realizados por H. Geiger e E. Marsden, supervisionados por Rutherford, com o espalhamento de partículas alfa em finas lâminas de ouro, se pode concluir que a estrutura atômica consiste de uma pequeníssima região nuclear muito densa por conter as partículas mais pesadas (prótons e nêutrons) e apresentar pequeno volume, com carga elétrica positiva, e uma região periférica, praticamente compondo o volume do átomo, de massa muito menor por conter os elétrons. Coube ao físico dinamarquês Niels Bohr, que trabalhava no laboratório de Rutherford em 1913, com base nos trabalhos desenvolvidos principalmente por Planck, Einstein e Rutherford, estabelecer o primeiro passo revolucionário para a construção da teoria quântica. Sua proposta sugeria que os elétrons nos átomos poderiam mover-se em certas “órbitas” sem irradiar energia como previsto pela teoria eletrodinâmica clássica. Estas órbitas estáveis associadas a “estados estacionários” de energia eram determinadas por condições quânticas. Os elétrons poderiam se transferir de uma órbita estável para outra emitindo ou absorvendo, com a diferença entre dois estados de energia 1 e 2 dada por: $h\nu = E_1 - E_2$. Numa formulação híbrida clássico-quântica, Bohr sugere que as órbitas permitidas eram aquelas em que o momento angular (mvr) era igual a $nh/2\pi$ ($m.v.r = nh/2\pi$). Esta relação foi desenvolvida a partir de seu princípio da correspondência entre grandezas clássicas e quânticas, usando para isto argumentos da mecânica clássica e da interação coulombiana (assumindo a força centrípeta necessária ao movimento orbital como de natureza eletrostática: $m v^2/r = k e^2/r^2$). Desta forma, a energia total do estado estacionário é expressa pela lei de conservação: $E = K + U$ [energia cinética (K) mais a energia potencial eletrostática (U)]. Com isto se consegue obter uma relação de quantização para as órbitas obtidas: $r = \epsilon_0 \cdot n^2 \cdot h^2 / \pi \cdot m \cdot Z \cdot e^2$, onde para o átomo de hidrogênio, $Z = 1$ e $n = 1$ (estado quântico fundamental do elétron), obtém-se: $r_0 = 0,529$ angstrom

(surge a necessidade de uma unidade conveniente à escala atômica, 1 angstrom= 10^{-10} metros). A concordância de r_0 com a dimensão estimada experimentalmente, na interpretação do espectro do átomo de hidrogênio, foi o principal triunfo desta teoria.

IX.2 Os elétrons nos níveis atômicos de energia um problema de maior complexidade

Apesar do sucesso com o átomo de hidrogênio, a teoria de Bohr teve que ser abandonada por apresentar sérias dificuldades quando trata de átomos com muitos elétrons. A revolução científica iniciada em 1905 aprofunda e enriquece o conceito de energia, pois além de usar a conservação de energia lhe atribui uma nova propriedade, a da quantização. A importância da energia na Física e em outras Ciências já vinha ocorrendo desde o advento da termodinâmica e da teoria estatística clássica, em meados e final do século XIX. Em 1925, Luis de Broglie propõe como hipótese o dualismo entre a onda e a partícula (já verificado para a luz), isto é, toda a matéria (partículas com massa de repouso) se propaga de forma ondulatória. Esta proposta audaciosa de que uma partícula material em movimento se constitui numa onda de matéria traz grandes implicações para o desenvolvimento da física moderna e particularmente para o desenvolvimento da teoria quântica (os elétrons de Bohr agora passam a ser vistos classicamente em órbitas ondulatórias (conforme mostrado na **figura 7**).

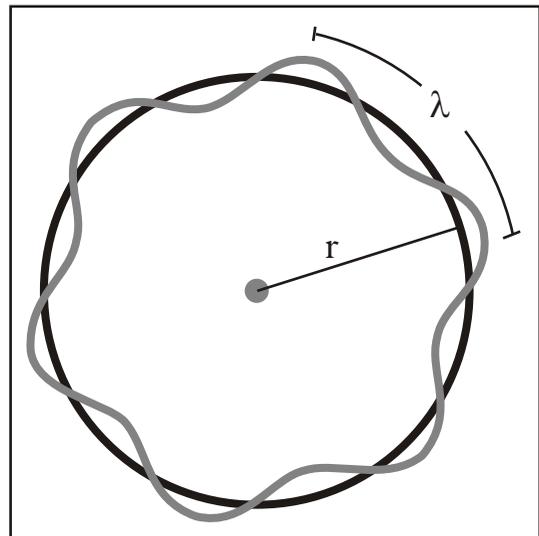


Fig. 7 – O electron ondulatório em seu nível de energia no átomo de hidrogênio

Na verdade, a natureza dual para radiação, movimento ondulatório de matéria, teve sua concepção onda e partícula iniciada por Hamilton no século XIX, quando eram formulados os últimos fundamentos para a mecânica escalar clássica da energia. Ele procurou subordinar a mecânica a um único princípio que apresentava uma analogia muito próxima ao comportamento do princípio do “raio luminoso veloz”. Utilizando o princípio de Hamilton se conseguia deduzir por que um raio luminoso atravessando a atmosfera e por que uma pedra arremessada no campo gravitacional da Terra percorrem uma linha curva. Porém naquela época não havia ainda uma maturidade científica suficiente para se considerar tal síntese de uma junção entre princípios mecânicos e ópticos, de forma que seu trabalho matemático preliminar para a compreensão da natureza ondulatória das partículas materiais ficou no esquecimento.

No entanto, Schrödinger em 1925, quando desenvolvia sua teoria quântica ondulatória para explicar a estabilidade dos elétrons nos níveis de energia do átomo, retoma essa questão afirmando que não é mero acaso a igualdade matemática entre o princípio mecânico e o princípio óptico, quando procurou interpretar o princípio de Hamilton à luz da sua teoria ondulatória para os elétrons nos níveis atômicos. Para isto, considera a fórmula do *quantum* de luz ($E = hv$), caracterizando que numa onda o número de vibrações ν (frequência) corresponde à energia do elétron (o precursor do elétron ondulatório, das ondas de matéria, como já nos referimos, é considerado, Luis de Broglie, em 1923). Schrödinger utiliza o fato de o núcleo ser muito pequeno para calcular como uma onda de matéria é desviada por difração pelo núcleo (o fenômeno de difração é uma propriedade das ondas quando passam por obstáculos). A figura de difração ocasionada por este desvio corresponde a uma nuvem de contornos indefinidos ao redor do núcleo, mas cuja dimensão tem a ordem de grandeza do comprimento da onda material (10^{-10} m).

As órbitas definidas por Bohr dão lugar aos elétrons ondulatórios de Schrödinger, compondo um halo de difração em torno do núcleo. Porém as ondas estacionárias ao redor do núcleo, só podem assumir modos normais de vibração ou de ondulação, que vão ser caracterizados por números quânticos inteiros ($n = 1, 2, 3, \dots$), o que requer níveis discretos principais de energia (pacotes de energia quantizados), já previstos pelo modelo do átomo de hidrogênio de Bohr. A previsão da mecânica quântica ondulatória melhor se adaptou aos resultados experimentais para átomos de mais de um elétron. Para isto a teoria atômica vai requerer, para cada valor de n (nível de energia principal), a existência de subníveis de energia representados por mais três números quânticos; o secundário (mede a quantidade de movimento angular), o magnético (mede o momento de dipolo magnético do elétron em órbita) ambos estabelecidos por Schrödinger. Um quarto número quântico, o de spin (mede o momento de dipolo magnético intrínseco relativo à propriedade de spin das partículas elementares) foi instituído por W. Pauli também em 1925, para explicar o porque mais de dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado de energia ou órbita eletrônicas, mas não se encontra presente na teoria ondulatória de Schrödinger. Foi necessário posteriormente que Dirac, Pauli, entre outros colaboradores do desenvolvimento da mecânica quântica, escrevessem uma teoria que contemplasse a propriedade de spin do elétron. Na formulação da mecânica quântica estes estados quânticos da micromatéria vão ser representados por funções ondulatórias que trarão informações das partículas materiais. Esta descrição funciona como uma espécie de sombra dessas partículas em trajetórias ondulantes num espaço cuja medida de seu comportamento funcional (posição, quantidade de movimento, energia etc.) é algo que precisa assumir uma natureza probabilística, dentro de uma faixa de possíveis estados em que as partículas tratadas podem se apresentar. Vamos admitir, por exemplo, que as ondas atravessando um cristal em superposição acusam o fenômeno de interferência; fica evidente que nesta região de interferência (fenômeno ondulatório) também devemos encontrar partículas. O que precisa ficar claro é que ondas e partículas são duas faces de um todo na transmissão de matéria e de energia. Como se refere Schrödinger sobre a natureza dual, no momento de receber o prêmio Nobel, “até agora não conseguimos concebê-las ambas numa imagem unitária. Só em casos extremos prepondera uma ou outra relação, de tal modo que julgamos suficiente ou a imagem de onda ou a de partícula”.

A mecânica quântica ondulatória de Schödinger e a dos operadores matriciais de Heisenberg, apresentadas a partir de 1926, mostram como característica fundamental a descrição do comportamento funcional da energia nos sistemas quânticos. Por tratar-se de um universo microscópico com pequeníssimas partículas, necessitava-se de uma teoria que cuidasse em descrever propriedades de fatos apenas observados por medidas obtidas de forma indireta pelos aparatos experimentais. Na mecânica clássica já existia o consenso de que, para descrever a dinâmica de evolução de uma partícula, se precisa conhecer um par de variáveis de estado: posição-momentum, ou energia-tempo. No entanto, por ser uma ciência que atua no universo microscópico, com as grandezas físicas assumindo valores infinitesimais, descobriu-se a existência de princípio na teoria quântica que proibisse se prever simultaneamente com precisão: a posição e o *momentum*, ou a energia e o tempo. Existe assim uma incerteza na medida de cada um desses pares de variáveis, atribuída à ordem de grandeza do fator: $h/2\pi$ (princípio da incerteza de Heisenberg). Assim, embora não possamos “conhecer” precisamente a evolução dinâmica de uma partícula, podemos prever os estados mais prováveis em que se encontram.

Quando estamos trabalhando com um grande número de sistemas idênticos (partículas), podemos considerar a natureza tendo seu comportamento observado por probabilidade estatística de seus possíveis estados: de posição, de quantidade de movimento, de energia, e de instante no tempo. Trata-se assim de uma teoria de natureza probabilística onde, na representação de Schödinger, a “equação de onda” se aplica a uma função de distribuição que descreve os prováveis estados estacionários de energia. Na representação dos operadores matriciais de Heisenberg, a energia se encontra representada pelo operador hamiltoniano quântico, que por sua vez é aplicado às autofunções de energia.

Esta sintética e rápida passagem historiando a mecânica quântica tem apenas o propósito de mostrar a vital importância da energia nesta construção teórica. Na atualidade, na Física e em outras áreas correlacionadas, não se faz mais ciência sem se tratar com a energia, um conceito que ainda não dominamos de todo, um conceito em evolução com a própria Física. Entretanto, no ensino básico de física, pouca ênfase se dá ao estudo de energia e praticamente não se estudam noções de mecânica quântica, bem diferente do ensino de química, que se preocupa em estudar a estrutura atômica quanticamente e as transformações energéticas que ocorrem nas reações químicas.

IX.3 A teoria quântica da condutividade elétrica em metais

Com o desenvolvimento da mecânica quântica, entre outras explicações de fenômenos microscópicos que estruturam a matéria, se pôde ter uma idéia de como ocorre a condutividade elétrica nos metais, a partir de uma teoria desenvolvida por Fermi no século XX. Também se pôde ter a compreensão de como, nos circuitos elétricos, a energia elétrica é transmitida através do campo elétrico no interior dos fios metálicos. Campo este que vai forçar o movimento ordenado em determinado sentido de alguns dos elétrons

pertencentes ao que poderíamos denominar de um gás de elétrons livres de Fermi, disponíveis para condução (corrente elétrica nos metais). Esses elétrons livres já apresentam espontaneamente mobilidade para fluírem na estrutura da matéria metálica de um átomo para outro de forma caótica. Os estados de energia a que pertencem são denominados de níveis de energia de Fermi, e se encontram dentro da distribuição de elétrons por camadas e subcamadas eletrônicas, numa região que é denominada da banda de condução. Os níveis de energia de elétrons que não conduzem pertencem à banda de valência, onde os elétrons se encontram ligados a seus átomos, não dispondo de mobilidade espontânea na estrutura da matéria atômica.

Somente para dar uma idéia de dimensão, a diferença entre dois níveis de energia atômicos do elétron é da ordem de grandeza de 1 eV. Existe um efeito térmico na matéria que estimula o movimento de oscilação entre átomos, que vai criar dificuldades à mobilidade de elétrons de condução (o que vai se constituir numa resistência à corrente elétrica, e ocasionar perda de energia elétrica por efeito Joule). Esta energia térmica ($KT = 0,025$ eV) à temperatura ambiente (300 K) vem contribuir como um dado adicional energético, uma vez que, quanto maior o efeito térmico, isto é, quanto maior a temperatura em um condutor, menor será sua condutividade elétrica (e maior será sua resistividade). Por sua vez, estes elétrons, apesar de estarem livres para fluírem interiormente possibilitando a corrente elétrica, não podem também escapar livremente saindo do interior do metal. Isto ocorre em virtude estarem na estrutura atômica ligados ao núcleo por uma energia potencial elétrica de ligação: $U = - U_0$, sendo a energia total expressa por: $E = K + U = K - U_0$, com a energia cinética (K) menor que a potencial (U_0), para que a energia total (E) seja negativa. Isto representa fisicamente um estado de energia de ligação, isto é, na banda de condução o elétron que se encontra livre na estrutura interatômica para se movimentar de um átomo para outro, mas por outro lado se encontra ligado para não escapar do metal ($K < U_0$). Para arrancar elétrons da superfície de um metal, existe o efeito quântico fotoelétrico, a que já nos referimos, que ocorre de forma estimulada energeticamente por incidência de luz no metal.

X. A energia de cada dia

X.1 Conceito de energia e sua relação com o trabalho

Todos os processos e transformações realizados na natureza envolvem trocas de energia, e necessariamente é preciso atender sua lei de conservação. Qualquer atividade diária que realizemos, um trabalho manual, uma locomoção, um pensamento, exige a utilização de energia. Apesar de ser tão concreta sua necessidade no dia-a-dia para a nossa vida, costumamos dizer tratar-se em física de uma grandeza abstrata. Reconhecemos uma fonte de energia a partir de uma interação (força) entre dois agentes (duas massas, duas cargas, dois fios com correntes, entre outras situações), e de algumas transformações naturais como nas reações químicas (reação de combustão, na fotossíntese), nas reações nucleares (emissão de luz pelas estrelas), entre outros diversificados fenômenos naturais. Em todas as situações, a transformação de energia se encontra associada à capacidade de se produzir trabalho, o que mantém uma estreita ligação com a força (com quem foi muito confundida no passado), que exerce a transformação (deslocamento, rearranjo dos átomos numa estrutura molecular, entre outras situações).

Apesar de suas diversas nomenclaturas (energia química, energia biológica, energia nuclear, energia atômica, energia eólica, entre outras), só existem dois tipos de energia na natureza: a cinética ($K = \frac{1}{2} m v^2$), e a potencial, uma energia armazenada de acordo com a configuração das partículas que compõem o sistema. A energia mecânica é a soma da energia cinética com a energia potencial de natureza mecânica, tal como a armazenada numa mola ($U = \frac{1}{2} K \cdot X^2$), a armazenada na interação gravitacional ($U = m \cdot g \cdot h = G \cdot M_1 \cdot M_2 / d$). Existem outras naturezas de energia potencial, como, por exemplo, na interação entre as cargas, a energia potencial elétrica: $U = V \cdot q = K \cdot q_1 \cdot q_2 / d$. Por sua vez, a energia cinética pode se apresentar como uma energia de diferentes naturezas, como a energia térmica (energia interna), pela teoria cinética dos gases, dada por: $E = \frac{3}{2} K \cdot T = K_{\text{média}}$ (energia cinética; os demais K apresentados em outras equações representam constantes - as equações apresentadas nesta página estão apenas sendo citadas sem preocupações em especificá-las).

Toda transformação de energia (dentro de uma mesma natureza ou entre naturezas diferentes) exige a realização de trabalho (em mecânica definido como o produto da força pelo deslocamento, que na termodinâmica vai resultar no produto da pressão pela variação do volume, isto é $F \times \Delta X = P \times \Delta V$). Conforme já citamos exemplos, diferentes naturezas de energia foram propostas em diferentes áreas da física e também entre diferentes ciências. Todas elas relacionam-se entre si, pois têm uma única natureza extraída de sua origem na mecânica, que envolve a massa (M), o espaço (L) e o tempo (T). A expressão $M \cdot L^2/T^2$ é geral, isto é, é sua única dimensionalidade, qualquer que seja sua natureza (química, biológica, nuclear, sonora, luminosa, térmica) ou em qualquer uma das suas formulações apresentadas, tais como: $(\frac{3}{2} KT, mc^2, hf, mgh, K \cdot q_1 \cdot q_2 / d)$. Trata-se de uma grandeza que unifica

diferentes ciências, que generaliza diferentes transformações na natureza, responsável por diversificados fenômenos, inclusive pela vida (o que significa que na natureza está sempre ocorrendo uma transformação de energia cinética em potencial ou vice-versa).

A energia é algo que se encontra intrínseco à matéria animada (com vida) e inanimada (sem vida), e surge em potencial de suas propriedades: carga, massa e do spin das partículas elementares; é algo inerente ao movimento da massa dos corpos no espaço (energia cinética) e ao movimento intrínseco das partículas (átomos ou moléculas) que constituem os meios materiais, uma energia interna, também denominada de energia térmica (uma energia cinética intrínseca à matéria). A energia potencial gravitacional rege o agregamento da matéria em nosso macrocosmo (quando associada à energia cinética de seus movimentos), enquanto que a energia potencial elétrica é a responsável pelas ligações químicas (ou bioquímicas) dos átomos e moléculas do universo microscópico.

X.2- A energia e os problemas ambientais

No mundo em que vivemos a energia de cada dia (**figura 8**) controla e propicia as condições para os estudos, para a atividade profissional, para o lazer, para a prática esportiva. Na verdade, tudo na vida sempre foi regulado por transferência energética de um ser para outro ser. Como do solo para as plantas, dos alimentos para nosso organismo, do sol para a folha de uma planta, de uma queda d'água para um gerador elétrico por indução magnética, de uma placa metálica para uma solução ácida numa reação química por eletrólise, do sol para um painel fotovoltaico. Mas só agora sabemos cientificamente dessa coisa chamada energia, que ao mesmo tempo que seu desenvolvimento histórico-epistemológico lhe situou como algo da nossa razão mental abstrata, ela se configura tão

concretamente nas situações de vida, colocadas a todo o momento nessa busca constante para consumo de insumos retirados da natureza. Até quando a natureza poderá nos favorecer em nossa opção na forma de viver? Temos limites na utilização do solo, da água, e da atmosfera, por maiores que sejam suas capacidades de absorção dos impactos ambientais que lhes causamos.

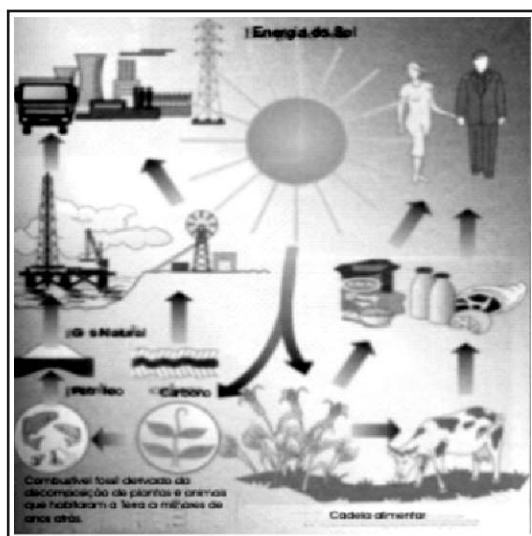


Fig. 8 - A vida no dia a dia a partir das transformações energéticas da energia solar.

Tomemos como exemplo prático o consumo anual de nossa principal fonte de combustíveis, o petróleo. Quando utilizado principalmente em combustão, descarregando gases a alta temperatura em nossa atmosfera, qual a variação de temperatura global que consegue provocar a cada ano? Para responder a esta questão necessitamos saber que extraímos atualmente para consumo no mundo algo na ordem de grandeza de 10^8 toneladas equivalentes de petróleo por ano (tep/ano), e que o petróleo apresenta um poder calorífico por tonelada de 10^7 kcal. Estes dados levam a uma quantidade de calor (Q) descarregada na atmosfera por ano de 10^{15} kcal ($Q = 10^8 \times 10^7 = 10^{15}$ kcal = $4,18 \times 10^{18}$ J). Por sua vez, esta quantidade de calor é expressa por: $Q = C_{\text{atm.}} \times \Delta T$; com $C_{\text{atm.}}$ representando a capacidade térmica da atmosfera que temos que determinar, para conhecermos ΔT . Nossa atmosfera é composta principalmente de nitrogênio (77%), oxigênio (20%), e hidrogênio (2%), sendo suas capacidades térmicas molares (por mol do gás) muito próximas. Por simplicidade, vamos considerar como se fosse uma atmosfera de nitrogênio seu elemento químico mais abundante (moléculas de N_2 , com 1 mol de N_2 tendo uma massa molecular de 28 gramas); o nitrogênio apresenta uma capacidade térmica molar ($C_{\text{molar}}_{\text{atm.}} = 28 \text{ J/mol. K}$). Assim, para sabermos a capacidade térmica total da atmosfera necessitamos saber o número de moles (n) contido em toda a atmosfera, e para obter isto, podemos recorrer à massa total de toda a atmosfera ($M_{\text{atm.}}$). Para determinar esta massa total, vamos tomar a pressão atmosférica (10^5 Pascal) correspondente à razão entre o peso da atmosfera e a área da superfície terrestre. Com o peso $P = M_{\text{atm.}} \times g$ (onde g representa a ação da gravidade, que faremos igual a 10 m/s^2), e a área da superfície da Terra [igual a $4\pi R_{\text{terra}}^2 = 4 \times 3,14 \times (6,37 \times 10^6 \text{ m})^2 \approx 10^{12} \text{ m}^2$]. De forma que da relação pressão = peso/área, vamos ter que: $10^5 = 10 \times M_{\text{atm.}} / 10^{12}$; onde, isolando a massa da Terra, concluímos que: $M_{\text{atm.}} = 10^{16} \text{ kg} = 10^{19} \text{ g}$. Logo, chegaremos ao número de moles contidos na atmosfera a partir da seguinte relação: se 1 mol de N_2 corresponde a 28 g, quantos moles contém uma massa de 10^{19} g ($n = 10^{19} \times 28 \approx 10^{20}$ moles)? O que leva a uma capacidade térmica total da atmosfera $C_{\text{atm.}} = n \times C_{\text{molar}} = (10^{20} \text{ moles} \times 28 \text{ J/mol.K}) \approx 10^{21} \text{ J/K}$. Finalmente, vamos concluir para o cálculo da variação de temperatura: $\Delta T = Q / C_{\text{atm.}} \approx (10^{18} / 10^{21}) \approx 10^{-3} \text{ K}$, isto é, um milésimo de Kelvins por ano de elevação da temperatura (que também corresponde a um milésimo de grau Celsius por ano) somente com consumo de petróleo. Queremos observar que o cálculo efetuado só é válido se considerarmos a atmosfera como um sistema isolado. Na verdade, o calor adicional gerado pela queima de combustíveis na atmosfera deve estar sendo irradiado em parte para o espaço exterior, o que reduziria ainda mais a taxa anual de elevação da temperatura obtida.

Da pequena taxa de elevação da temperatura anual do planeta causada pela queima direta de petróleo, não podemos concluir ser este resultado pouco expressivo ou mesmo já ser significativo, no sentido de criar ou não criar algum impacto ambiental, ou de interpretar que não estamos descarregando pouco ou muito gases poluentes. Por outro lado, existe muito mais combustível queimando na atmosfera que não entrou nesta estimativa. Fisicamente tratando, a questão é uma pequena variação que em curto prazo pode não caracterizar uma situação alarmante, afinal de contas, o mundo não pára de consumir e aumentar este consumo, sem ocorrer no todo do planeta até o presente momento nenhuma situação alarmante com conseqüências globais para as condições de

vida. Na verdade o problema maior que temos com a descarga destes gases na atmosfera é a geração de efeito estufa adicional, que se encontra elevando a temperatura média da atmosfera em valores bem mais significativos que o cálculo aqui efetuado (do início da revolução industrial até este momento, em torno de 250 anos, se estima que tenha havido, por efeito estufa adicional, uma elevação de temperatura: $\Delta T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Ainda bioquimicamente vamos encontrar outras questões com respeito ao meio ambiente local (em grandes pólos industriais, no trânsito de veículos das grandes cidades), onde as grandes concentrações desses gases têm causado problemas à saúde e à vida que também transcendem ao cálculo efetuado. De forma que a queima de combustíveis fósseis constitui-se num problema complexo, interdisciplinar, e de muitas variáveis à qualidade do meio ambiente atmosférico.

X.3 Uma alternativa a emissão de energia degradada

Uma alternativa promissora é a célula a combustível (fuel cell) ou pilha elétrica, ou ainda bateria elétrica, é uma tecnologia que vem sendo desenvolvida há algum tempo, e tem se mostrado como uma fonte limpa de energia elétrica que trará grandes benefícios em futuro próximo ao meio ambiente. É capaz de alimentar circuitos residenciais, acionar motores elétricos em automóveis, podendo substituir os motores a explosão, entre outras importantes finalidades. As CaCs, como são denominadas as células combustíveis, são uma tecnologia que utiliza em seu processo químico a combinação de dois gases, o hidrogênio e o oxigênio, para gerar eletricidade com uma eficiência que, a depender da célula, vem situar-se entre 40 a 85 % na transformação da energia química em energia elétrica. No entanto, esta transformação, tem exigido internamente condições de operação a uma temperatura muito acima da temperatura ambiente, entre 200 a 1.000 K e a uma pressão igual ou superior 3,5 atm. Existem para isto várias tecnologias sendo utilizadas para combinar o hidrogênio com o oxigênio e gerar energia elétrica nos eletrodos, produzir água e liberar calor.

Existem também várias fontes de hidrogênio para as células combustíveis, extraído de combustíveis como a gasolina, óleo diesel, álcool, lixo, da própria água, entre outras substâncias. Observe que os combustíveis aqui são utilizados como fonte de produção de hidrogênio e não como fonte de calor que a partir da combustão vai gerar a energia mecânica para acionar motores e turbinas, que apresentam na conversão uma eficiência em torno de 60 %. A adequação do hidrogênio gasoso para gerar energia elétrica com alta eficiência sem poluição ocorre a partir da reação de oxidação com o par eletrodo-eletrólito. O hidrogênio chega a um dos eletrodos porosos, que representa o anodo, com ambos os eletrodos revestidos de platina ou níquel para funcionar como catalisador para acelerar a reação com o oxigênio; o eletrólito pode ser uma substância sólida ou líquida para conduzir os íons entre o catodo e o anodo e estabelecer entre estes dois eletrodos uma diferença de potencial em torno de 1,4 V por elemento da célula (composta de uma associação de elementos, a depender da tensão e da potência de saída). Os problemas principais das células a combustível atuais (das CaCs, como são denominadas) são: durabilidade, condições de operar em menores temperaturas, e alto custo de fabricação.

XI. Energia e vida

XI.1 Fontes naturais de energia em nosso planeta.

Na superfície do nosso planeta estamos sujeitos a três fontes principais vitais de energia: a vinda do Sol (que, como veremos, é fundamental para a existência da vida e para originar a maior parte das fontes de energia utilizadas pelo homem); a vinda do interior da Terra, oriunda de desintegração nuclear na região do núcleo terrestre (responsável pelas erupções vulcânicas, vapor d'água das estações termais, ocasionadas pelo calor transmitido do núcleo a uma temperatura estimada em 1.000°C , para a superfície do nosso planeta, que apresenta uma temperatura média atmosférica local em torno de 20°C); e, por último, a vinda da interação gravitacional entre a Terra e a Lua (que ocasiona o fenômeno das marés).

A fonte da energia geotérmica é a radioatividade natural da fissão de urânio existente no núcleo terrestre (**figura 9**). Existe ainda uma energia térmica residual que teve origem no período de formação da Terra, quando a energia potencial gravitacional se transformou em calor durante a integração (compactação) da matéria terrestre. Em seu núcleo as massas magmáticas quentes chegam a atingir uma temperatura entre 1.000 a 1.200°C . A transmissão de calor do núcleo para a crosta ocorre principalmente por irradiação. Os efeitos da energia geotérmica são observados nas erupções vulcânicas (**figura 10**) e nos sistemas de vapor dominante (existentes no manto terrestre entre 1.000 a 2.500 m de profundidade,

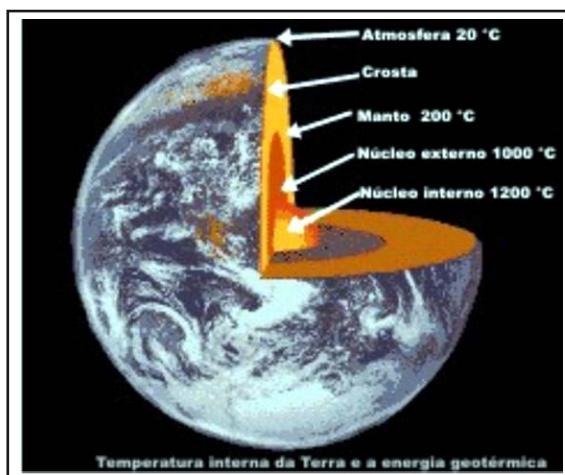


Fig. 9 - Energia geotérmica: o aquecimento transmitido do núcleo para superfície terrestre.



Fig. 10- A energia geotérmica transmitida por convecção pela erupção

a uma temperatura da ordem de 200 °C, a uma pressão entre 4 a 10 atm). Existem ainda os sistemas de água-dominante a temperaturas inferiores a dos sistemas de vapor, sendo mais freqüentes uma vez que submetidos a uma pressão maior que a pressão atmosférica conseguem chegar à superfície da Terra para formar as fontes de água termais, muito requisitadas pelo homem por seus efeitos benéficos à saúde.

A energia ocasionada pela fusão nuclear produzida no Sol é transmitida para todo o espaço, e uma pequena parcela chega à pequena calota terrestre, que se encontra a 150 milhões de quilômetros. Estima-se que o Sol irradia a Terra transmitindo calor há bilhões de anos, no entanto costumamos afirmar que a energia térmica como um todo em nosso planeta não se encontra aumentando, o que significa dizer que em condições ambientais normais nos manteríamos em equilíbrio térmico a uma temperatura média sempre constante. O aparente contra-senso, de o Sol nos injetar calor e não aumentar a energia total do planeta só será resolvido se aceitarmos que irradiamos para fora da Terra a mesma quantidade de calor recebido. Então, para que receber energia se temos que também liberar energia para manter o equilíbrio térmico? A resposta a esta questão é de natureza qualitativa, uma vez que recebemos predominantemente um espectro de luz visível, qualificada para exercer nossas funções vitais (trabalho mecânico para deslocar, ou termodinâmico para expandir e gerar transformações), e liberamos “luz” infravermelha (radiação exclusivamente de natureza térmica) com pouca qualificação para exercer as funções vitais. O Sol é quase sozinho o responsável pelo balanço energético da Terra. Da luz solar que nos chega, estima-se que 30 a 35 % são refletidos pela atmosfera e mandada de volta para o espaço, e o restante tem funções definidas. Aproximadamente 47 % desta energia é absorvida: pela atmosfera, pela superfície terrestre e pelos oceanos, sendo transformada em calor e determinando a temperatura ambiente; e aproximadamente 23 % são utilizados na evaporação, circulação superficial da água, convecção, precipitação, vindo a constituir o ciclo hídrico. O pouco restante, 0,2 %, provoca a circulação do ar atmosférico e apenas 0,02 % é

utilizado para provocar a nossa principal função vital, a fotossíntese, a base energética do mundo vivo (**figura 11**).

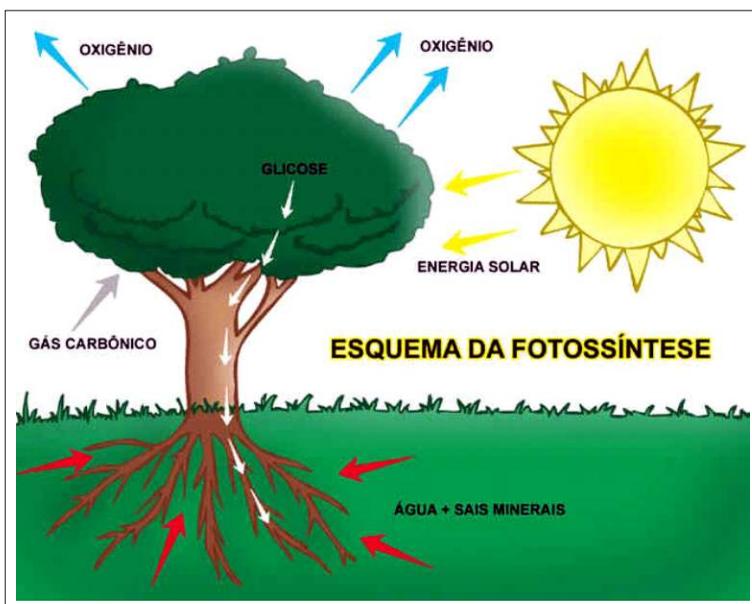


Fig. 11- O fenômeno da fotossíntese.

As principais funções da energia solar são provocar o aquecimento de nossa atmosfera produzindo a circulação entre camadas do ar atmosférico (a energia eólica ou dos ventos); provocar o ciclo hidrológico ou da água (evaporação, formação de nuvens e chuva), que viabiliza os recursos energéticos hídricos dos rios; provocar as correntes marinhas; e ainda, provocar o aquecimento diferenciado causado pela inclinação do eixo de rotação da Terra, ocasionando o clima entre os dois hemisférios. Apesar de todos os fenômenos apresentados influenciarem em nossas condições de vida, a principal função da energia solar para a existência da vida é a produção do fenômeno da fotossíntese, uma reação química endotérmica que produz compostos orgânicos, ocasionados pela transformação de energia solar em energia química. Significa dizer, produzir a partir da energia contida nos fótons de luz ($E = h.f$). A absorção de luz pelos vegetais e por alguns microorganismos fotossintetizadores produz primariamente os compostos orgânicos e vai formando biomassa. A matéria orgânica que armazena a energia solar sintetizada, à espera de ser consumida secundariamente pelo metabolismo de um animal ou vegetal, vai produzir atividades orgânicas, como a realização de trabalho, calor, eletricidade, entre outras coisas da vida. Estima-se que a vida tenha surgido na Terra há 3,5 bilhões de anos, e de lá para cá os seres vivos vêm se diversificando e se adaptando às mudanças ocorridas no meio ambiente.

XI.2 A energia solar na biosfera e o ciclo alimentar na Terra

Na biosfera os seres vivos coexistem em comunidades, em dezenas ou centenas de populações de diferentes espécies dentro de um certo ecossistema (influenciados por fatores químicos, físicos e biótipos, entre si). A existência da vida exige um permanente processo de transformações energéticas no ecossistema. Ocorre devido à busca de alimento que todo ser vivo necessita para manutenção da vida. No meio ambiente terrestre a principal fonte de energia primária para a alimentação é a irradiação solar. Os seres autotróficos como as plantas, se alimentam de substâncias inorgânicas. A presença de clorofila nas folhas e de gás carbônico (CO_2) retirado da atmosfera combinado com a absorção dos fótons de luz (energia solar), vai estabelecer uma transformação da energia química (**figura 12**), através da síntese de moléculas orgânicas que fixam o carbono (C) e liberam o oxigênio para a atmosfera, que na seqüência vai participar da respiração. Nas plantas, o processo respiratório consiste em absorver de volta o oxigênio liberado para uma reação de combustão com a glicose (produzida na fotossíntese), seguido agora da liberação de gás carbônico (CO_2) para a atmosfera (energia térmica degradada, calor contido nas moléculas do gás carbônico).



Fig. 12- Excitação energética da clorofila na reação de fotossíntese

Podemos agrupar os seres vivos em um ecossistema em termos de um nível trófico (um nível de ascensão da cadeia alimentar). Do primeiro nível fazem parte os seres fotossintetizadores (plantas e algumas bactérias). Do segundo nível fazem parte os herbívoros (consumidores primários). Do terceiro nível fazem parte os carnívoros que se alimentam dos herbívoros (consumidores secundários). Do quarto nível trófico fazem parte os animais carnívoros que se alimentam de carnívoros (consumidores terciários). No entanto, muitas espécies como o ser humano pertencem a mais de um destes níveis. Na seqüência linear desta cadeia, de um nível para o outro vai existindo perda de energia e de matéria-prima (biomassa) para o meio ambiente. Isto ocorre por dois fatores: um pelo processo alimentar não ser cem por cento eficiente, existindo a excreção para o meio ambiente de matéria-prima e energia, que poderiam ter sido utilizadas; e o outro reside no fato da necessidade de manutenção das funções vitais que exige o processo respiratório, e que, por sua vez, necessita da combustão de alimentos.

No corpo humano, por exemplo, as reservas de energia se encontram acumuladas sob forma de gorduras e açúcares no organismo. Essas substâncias químicas, quando transformadas numa outra substância denominada de glicose (um tipo específico de açúcar), são oxidadas nas células musculares, por reação de combustão, com a função de liberar energia para ser utilizada pelas células musculares em diferentes fins, como no movimento do corpo humano, no funcionamento dos nossos órgãos em geral, sendo o restante que não realiza trabalho liberado sob forma de calor, e por esta razão transpiramos (nosso organismo funciona como uma máquina térmica de combustão).

Pelo que foi dito anteriormente, é na energia solar captada pelas plantas que se encontra a base da cadeia alimentar que vai contribuir para o desenvolvimento de biomassa (**figura 13**). Ocorre que, enquanto a energia é repostada continuamente, fluindo unidirecionalmente para provocar fotossíntese, a matéria necessita ser constantemente reciclada, reutilizada para a continuidade da vida. No processo cíclico vital, alimentação-respiração, vamos ter que uma parte do carbono contido nas moléculas orgânicas fica retidas, não entrando no ciclo, e se constitui em biomassa. Com a morte, a biomassa que não for atacada por organismos decompositores vai se transformando no subsolo, ao longo do tempo, em combustíveis fósseis. Um processo que vem criando reservas desde o início da existência de vida na Terra: estamos extraindo do solo tão rapidamente, a ponto de nos últimos cem anos já termos aumentado em cerca de 0,04 % a concentração de CO₂ na atmosfera. Toda a matéria orgânica com vida (de microorganismos a grandes animais e também vegetais) que existiu na Terra foi ficando soterrada, e formando imensos depósitos de compostos orgânicos, dando origem às reservas de petróleo, de gás natural e de carvão vegetal (fóssil de grandes vegetais), que poderíamos chamar de biomassa fóssil, e não somente fóssil. Para efeito de consumo, a energia fóssil, como a energia extraída do petróleo, pelo longo período de tempo que leva sua formação é considerada como uma energia não-renovável, enquanto que a biomassa, como a cana-de-açúcar, é uma matéria orgânica destinada a produzir energia que é renovada em pequeno intervalo de tempo dentro de um período anual.

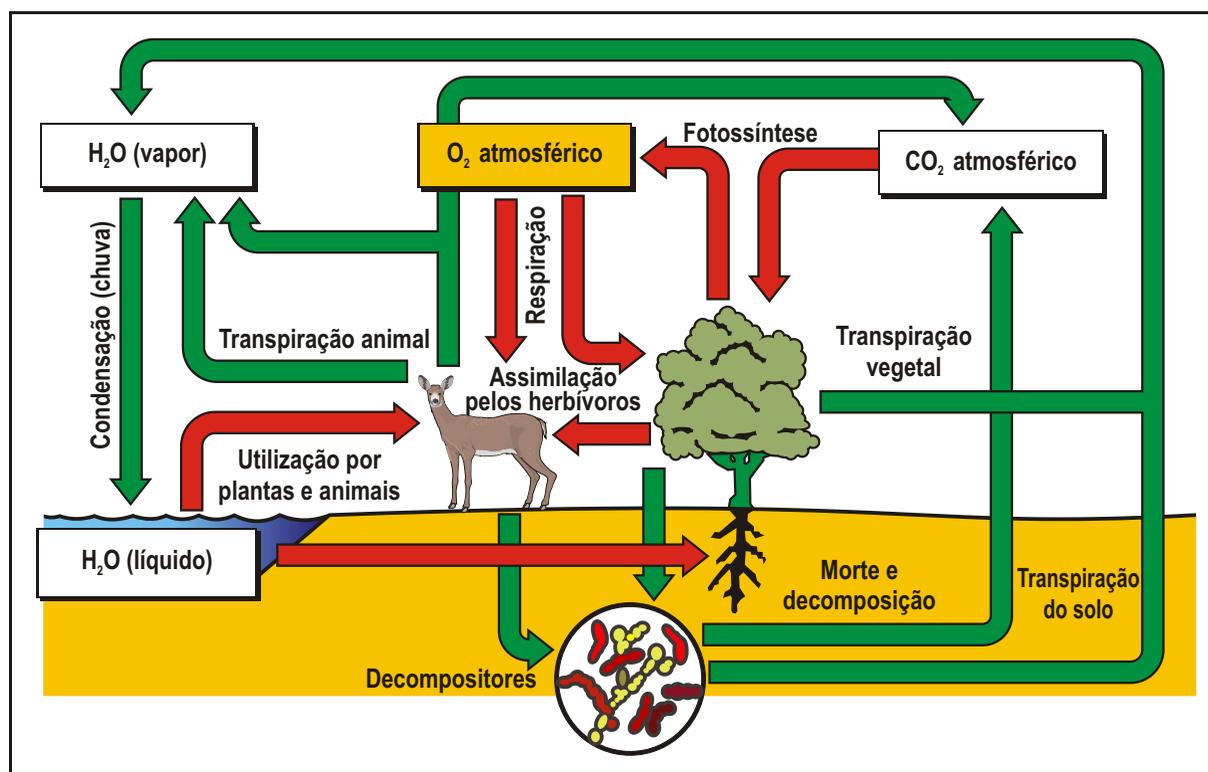


Fig. 13 - Diagrama do ciclo energético vital

Muitas reações biológicas são acompanhadas por diminuição da entropia para organizar funções vitais. A vida para ser organizada exige que a natureza trabalhe espontaneamente para isto. Nossa fonte de energia primária é o Sol que atende à organização de nossas funções vitais pela cadeia alimentar através das substâncias químicas que ingerimos em nossa alimentação, trazidas da fotossíntese. O processo bioquímico alimentar é um processo espontâneo que gera aumento de entropia, trazendo energia suficiente para conduzir a ocorrência das reações vitais em sentido contrário (não-espontâneas). É o caso de quando é formada uma molécula de proteína ou mesmo na construção de uma molécula de DNA. Assim, a manutenção da vida exige um processo bioquímico espontâneo seguido de um não-espontâneo de forma acoplada. Trata-se fisicamente de uma situação análoga a descermos espontaneamente montanha abaixo, perdendo energia potencial para ganhar impulsão (energia cinética), para subir não espontaneamente uma outra montanha acima acoplada à anterior.

Manter a vida é como manter um peso maior acoplado por uma polia a um peso menor, interligados por uma corda. O peso menor não poderia subir por conta própria, no entanto, no sistema acoplado isto se torna possível. Na bioquímica, a hidrólise do ATP (transferência do grupo fosfato diretamente para a água) é a chave da reação metabólica pela qual a energia livre é armazenada para ser usada nas reações metabólicas dos sistemas vivos. Tem como reação espontânea mais comum nos organismos vivos a conversão (por hidrólise) de ATP (trifosfato de adenosina) em ADP (difosfato de adenosina) + P (grupo fosfato), que posteriormente é forçado a ser reacoplado por reação não-espontânea para

formar de novo ATP. A energia livre armazenada nos organismos biológicos para hidrólise do ATP é de cerca de, $\Delta G = -30 \text{ kJ/mol}$, o que significa dizer que, no sentido inverso não-espontâneo da reação, para levar ADP de volta a ATP, por um ciclo reversível, exigiria a mesma energia livre com sinal positivo ($\Delta G = +30 \text{ kJ/mol}$), de forma que a variação total da energia livre seria nula. Porém este ciclo é irreversível, necessitando na hidrólise de ATP uma energia livre, $\Delta G < -30 \text{ kJ/mol}$.

Este adicional na variação da energia na parte espontânea do ciclo é uma das razões que justificam a necessidade que os seres vivos têm de comer para compensar o que se perde neste ciclo vital bioquímico irreversível. A hidrólise é a chave para manutenção do metabolismo dos organismos vivos. É um processo vital irreversível que ocorre em seu todo, sempre com o aumento da entropia ($\Delta S > 0$). A glicose contida nos alimentos se constitui no combustível sofisticado, uma vez que traz a energia que necessitamos levar para as células (mini-usinas de energia) de forma controlada para ativar as moléculas de ATP em seu processo espontâneo de combustão que irá conseqüentemente movimentar o metabolismo dos seres vivos.

Existe assim uma estreita ligação ecológica entre os seres vivos e o meio ambiente (sol, solo, água, atmosfera), que ocorre por uma cadeia cíclica natural. Neste contexto, o homem contemporâneo, além de fazer parte desta cadeia em crescente aumento populacional, vem interferindo e criando um forte impacto por sua crescente busca por ciência e tecnologia para atender a uma necessidade de alto padrão na aquisição e reposição de bens de consumo, além de investir nas facilidades propiciadas pelos meios de locomoção e nos prazeres do aquecimento e do conforto ambiental, o que vem exigindo um a estimativa de gasto de energia por pessoa da ordem de dez vezes maior que o consumo do homem primitivo, que apresentava em sua época a vantagem para o planeta de ter uma população bastante inferior à atual.

XII. O Consumo de energia

XII.1 A organização entrópica da vida e a degradação da energia

Pelo segundo princípio da termodinâmica, o aumento de entropia verificado nas transformações energéticas responsáveis pela organização do Universo apresenta uma tendência para o decréscimo de disponibilidade de energia útil para desenvolver trabalho mecânico (como já comentamos na absorção de luz solar para exercer nossas funções vitais e na emissão de infravermelho para o espaço). Em nossa vida diária, existe um fluxo espontâneo na natureza deste consumo: de um estado de maior organização energética (menor entropia) para um estado de menor organização energética (maior entropia). Nos processos de industrialização, na agropecuária, nos meios de transportes, existe uma constante transformação de energia disponível para trabalho em energia degradada (calor).

Como já nos referimos anteriormente, toda a transformação que resulte em vida da mais simples como um vegetal ao ser humano surge com uma parte de iniciativas não espontâneas. O fato é que a vida necessita organizar ingredientes existentes na natureza que estavam inicialmente em estado de menor ordem. O organismo vivo é um processo de organização entrópica que custa ao meio ambiente a realização de trabalho, cujo saldo final de um balanço energético da natureza é o aumento de energia degradada. O organismo vivo necessita lutar contra a degradação entrópica para manter seu próprio equilíbrio, o que exige consumo energético, ao extrair entropia baixa do ambiente e devolver entropia alta ($\Delta S > 0$). É importante observar, no entanto, que as plantas verdes, por armazenarem parte da radiação solar que utilizam para fotossíntese em seu ciclo de CO_2 , retardam a degradação energética da luz solar que seria transformada em calor.

XII.2 A crescente busca pelo homem de energia não renováveis para viver

A evolução do consumo de energia pelo homem mostra que no passado, há mais de dez mil anos atrás, o homem primitivo, do mesmo modo que os animais silvestres, retirava energia do meio ambiente em torno de 2 Kcal apenas. Era o suficiente para manter suas necessidades orgânicas, de alimentação, respiração, excreção, entre outras funções, utilizando raízes, folhas, sementes e frutos dos vegetais e a carne obtida pela caça e pela pesca animal. Quando o homem aprende a utilizar o fogo como uma fonte de energia para o cozimento alimentar, ele facilita seu processo digestivo e ganha mais tempo para realizar seus afazeres diários. Isto requisitou um maior consumo de energia da natureza, uma vez que a madeira como combustível, por quilograma de queima libera 3.100 kcal de calor para

o meio ambiente. Assim, o homem como o animal de maior inteligência prosperou, se multiplicou, apresentando altas taxas de crescimento populacional e foi se diferenciando cada vez mais da forma ecológica de vida dos outros animais. Buscou um maior conforto ambiental, uma melhor qualidade de vida, e se distanciou cada vez mais de sua forma de ser primitivo. Este procedimento tem exigido um crescente consumo (degradação) de energias disponíveis ao trabalho, que muitas vezes levaram bilhões de anos para serem depositadas no interior do nosso planeta.

Na sociedade atual, a maior parte da energia consumida pelo homem é de origem fóssil. Para cada quilograma de petróleo retirado do subsolo para combustão são liberados aproximadamente 10.000 kcal de energia térmica para o ambiente atmosférico, um poder calorífico superior ao da madeira (1 tonelada de lenha é igual a 0,310 toneladas equivalentes de petróleo). Para viver atualmente, o homem se utiliza da queima diária de óleo diesel, querosene, gasolina, gás natural, carvão, que são utilizados principalmente nos meios de transportes, na eletrificação residencial e nos meios de produção em geral. Numa sociedade atual, principalmente de primeiro mundo, quase tudo que o homem utiliza é industrializado, da água que bebe ao alimento que come, à climatização ambiental de onde vive, se movimenta e trabalha. A energia como um parâmetro de análise e controle do custo deste consumo desempenha uma função primordial para a economia, para a ecologia, para a saúde, no controle de nossa forma de viver, de se alimentar, de cuidar de nosso corpo, e de avaliar os impactos ambientais causados pela aglomeração do homem, que optou por viver em grandes sociedades (grandes cidades).

O Brasil, apesar de caminhar em direção à tendência de consumo mundial da utilização de energia não-renovável (energia fóssil), na geração termoeétrica, optou no passado pelos recursos hídricos disponíveis em seu território para construção de hidroelétricas, conforme ilustrado graficamente na (figura 14) e pela utilização mais recente de biomassa (utilizando principalmente a cana-de-açúcar), quando da geração por termoeletricas, conforme mostrado em gráfico anexo (figura 15).

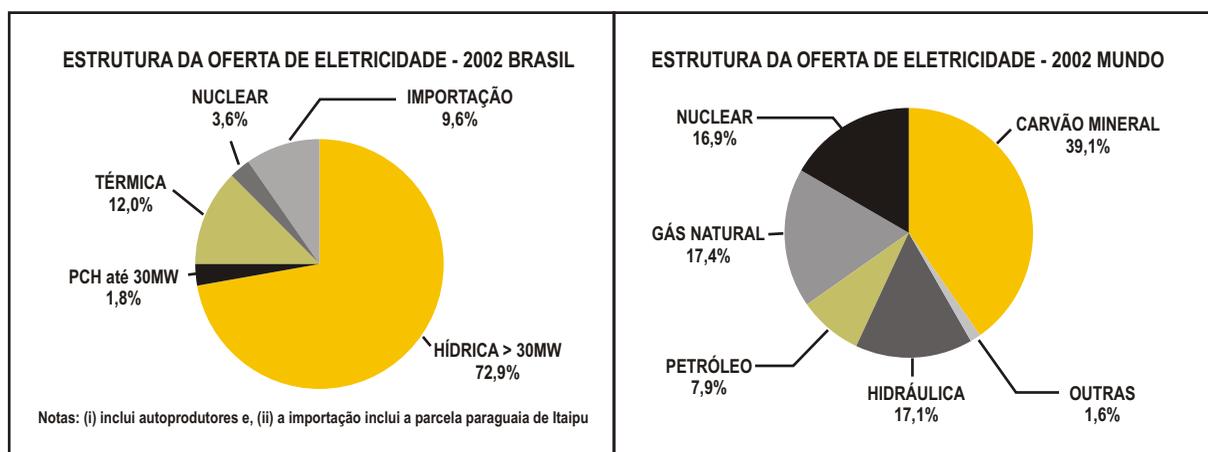
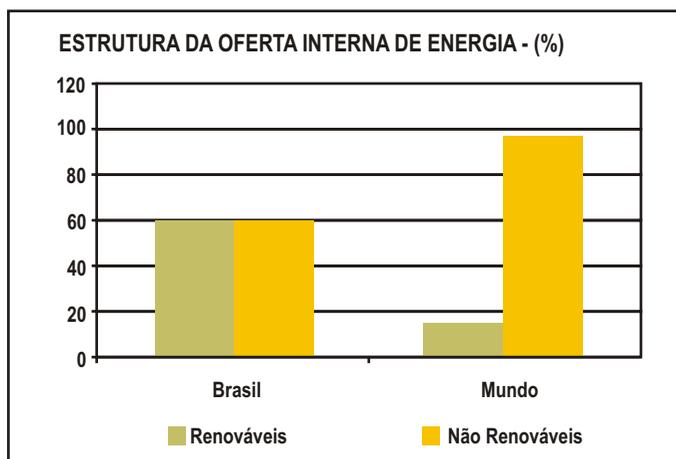


Fig. 14 – A opção brasileira pelas hidroelétricas foi diferente da opção mundial

Por estes fatos, apresenta uma taxa de emissão adicional de CO_2 responsável pelo incremento de efeito estufa na atmosfera, que é em torno de 30 % menor que a taxa de emissão mundial.

Fig. 15- Energia renovável versus energia não-renovável no Brasil e no mundo.



XII.3 O combustível para a máquina térmica corpo humano

Nossa alimentação atual é tratada como fonte de energia através das calorias utilizadas para expressar o valor energético dos alimentos (utilizando normalmente a kilocaloria, kcal). Uma caloria, uma unidade de energia definida a partir da quantidade de calor necessária para aumentar em um grama de água a temperatura de um grau Celsius, ou kcal, quando se referir ao calor para aumentar a temperatura de um quilograma de água. A quantidade de calorias que aparece nos rótulos dos alimentos industrializados é medida pela bomba calorimétrica, onde o alimento é queimado e o calor liberado na combustão é absorvido pela água que circula no sistema. Por exemplo, nos alimentos, a queima de um grama de carboidratos libera 4,1 kcal; um grama de proteínas produz 5,6 kcal; e um grama de gordura libera 9,5 kcal.

Numa dieta alimentar para as pessoas controlarem o “peso”, isto é, sua massa, costuma-se efetuar um balanceamento energético (um equilíbrio que envolve a conservação da energia) entre a quantidade de energia que precisa queimar para manter seu metabolismo orgânico em funcionamento em suas atividades normais diárias e a quantidade de calorias que precisa ingerir em sua alimentação normal diária. Nosso corpo, uma máquina térmica de combustão, necessita de combustível (as calorias dos alimentos) para manter seu funcionamento e atender à lei de conservação da energia e a lei da irreversibilidade do processo (que trata da eficiência das máquinas térmicas). Só que, se ingeridos a mais do que nossa máquina necessita, uma boa parte deste excesso, que não é liberado por nosso aparelho excretor, vai se acumulando em forma de gordura (e o acúmulo de combustível em nosso organismo vai gerar aumento de “peso”), em níveis que vai depender do processo digestivo de cada um. O corpo humano consome energia a uma potência de 100W para funcionar o seu metabolismo basal (uma taxa mínima necessária para atender em média às funções vitais de um adulto em repouso total). Esta energia, como já nos referimos, é extraída dos alimentos e se modifica quimicamente no processo digestivo, para daí ser levada pela corrente sanguínea a diferentes regiões do nosso

organismo, e através de reação de oxi-redução, se combinar com o oxigênio contido nas células locais. É daí então que vai se produzir o ATP (a fonte de energia que coloca em funcionamento todo o nosso corpo).

XII.4 Uma unidade de referência para o mercado de consumo de energia

Existem na atualidade alguns padrões estabelecidos para tratar do consumo de energia no mundo através dos meios de produção e de transporte. A oferta interna de energia (OIE) é um destes padrões e representa a energia disponível para ser transformada na refinaria, na hidroelétrica, na termoelétrica, na carvoaria etc., para daí ser distribuída e consumida pelo usuário e pelos meios de produção. No consumo de eletricidade a unidade usual padrão é o kilowatt-hora ($1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$). Para as fontes primárias de combustíveis, como o carvão e o petróleo, se utiliza como padrão o poder calorífico inferior (PCI), que para o petróleo de referência é utilizado por aproximação o valor de 10.000 kcal/kg (o que significa dizer que a quantidade de 1 kg de petróleo quando em combustão completa libera dez mil kilocalorias de calor). Para análise do consumo, são usados na comparação entre diferentes fontes de energia em mesma quantidade, fatores de conversão para coeficientes de equivalência relativos ao petróleo. Por exemplo, o poder calorífico da lenha (PCI) é de 3.100 kcal/kg , correspondendo a um coeficiente de equivalência de $(3100/10000) = 0,310$, o que significa dizer que 1 t de lenha equivale à energia correspondente a $0,310 \text{ tep}$ (toneladas equivalentes de petróleo). Nos balanços sobre o consumo de energia em diferentes países e em organizações internacionais, passou-se a usar a tonelada equivalente de petróleo (tep) como uma unidade básica de referência, utilizada para agregar a energia de diferentes fontes a um único parâmetro comparativo.

XII.5 Fontes primárias e fontes secundárias

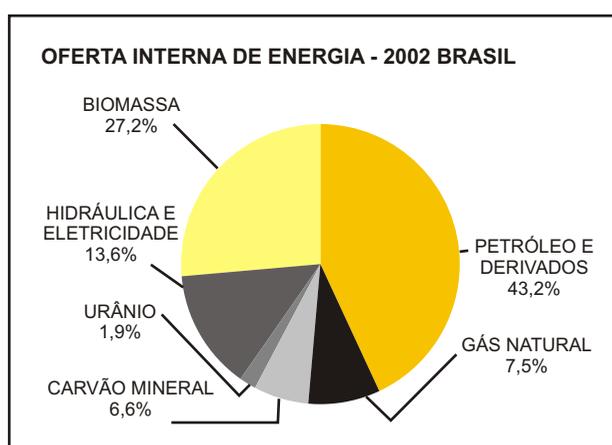
Para se efetuar um balanço do consumo de energia em um dado setor, é necessário se percorrer diversas etapas. Inicia com a energia de consumo primária, indo para seu processo de transformação (métodos e técnicas), para daí se obter a energia de consumo secundária tratada como o produto de consumo final. A natureza provê diretamente as fontes de energia primária para consumo, como o petróleo, o carvão mineral, o urânio, a energia hidráulica, a biomassa (a cana-de-açúcar, os resíduos vegetais, a madeira). Porém, indústrias que em sua produção geram vapor ou calor, como as de açúcar e álcool, podem ser consideradas como fontes primárias para os geradores termoelétricos.

Já a energia secundária é um produto do processo de transformação na forma e com as características que o consumo de energia requer. São fontes secundárias os derivados do petróleo como a gasolina, como o óleo combustível, como o óleo diesel, como o querosene, e ainda, o urânio enriquecido, o carvão vegetal, o álcool, o bagaço etc. Os

setores de transformação são as refinarias, as destilarias, plantas de gás natural, centrais elétricas, carvoarias, etc. O consumo final da energia movimenta indústrias, transportes, o comércio e demais setores econômicos, a administração pública e as necessidades residenciais. Para chegar ao local do consumo final a energia é transportada: por canalização, por linhas de transmissão, pelos meios de transportes, o que normalmente envolve perdas. É também importante se ter claro que as pessoas, para viver, consomem energia direta e indiretamente. O consumo direto é aquele controlado pelo usuário final, que liga e desliga seus aparelhos, que controla e planeja com uma melhor eficiência o consumo de combustíveis e eletricidade. Já o indireto é o que vem embutido na industrialização da produção de consumo, e o que é utilizado nos serviços públicos (escola, iluminação pública, hospital etc.).

Conforme mostrado em anexo (figura 16) o gráfico de demanda de energia no Brasil, coloca as diferentes fontes mostrando que o petróleo e derivados somados ao gás natural, atende a aproximadamente a 50 % da nossa oferta interna total de energia.

Fig. 16- Consumo geral de energia no Brasil



XII.6 O incremento do consumo no Mundo

Na organização social atual, um indivíduo de um país de primeiro mundo (de clima muito frio no inverno) utiliza para viver, de energia por ano, a quantidade de 10 tep (toneladas equivalentes de petróleo), o que corresponderia a descarregar por combustão na atmosfera 10^7 kcal por indivíduo. Em países em desenvolvimento no terceiro mundo este consumo não chega em média a 2 tep por pessoa; é em torno de 5 vezes menor, mas corresponderia a uma descarga de calor anual para a atmosfera da ordem de 10^6 kcal. Conforme ilustração gráfica (figura 17), o consumo de energia em todo o mundo cresceu acentuadamente a partir do ano de 1940.

Isto vem ocorrendo não somente em razão do crescimento populacional, uma vez que, apesar do efeito devastador da segunda grande guerra mundial, a mesma trouxe grande progresso para ciência e para a tecnologia que culminou na década de 1950 onde se inicia uma outra grande revolução industrial, onde a produção em série de bens e a automação no setor industrial foi determinante para o incremento do consumo energético.

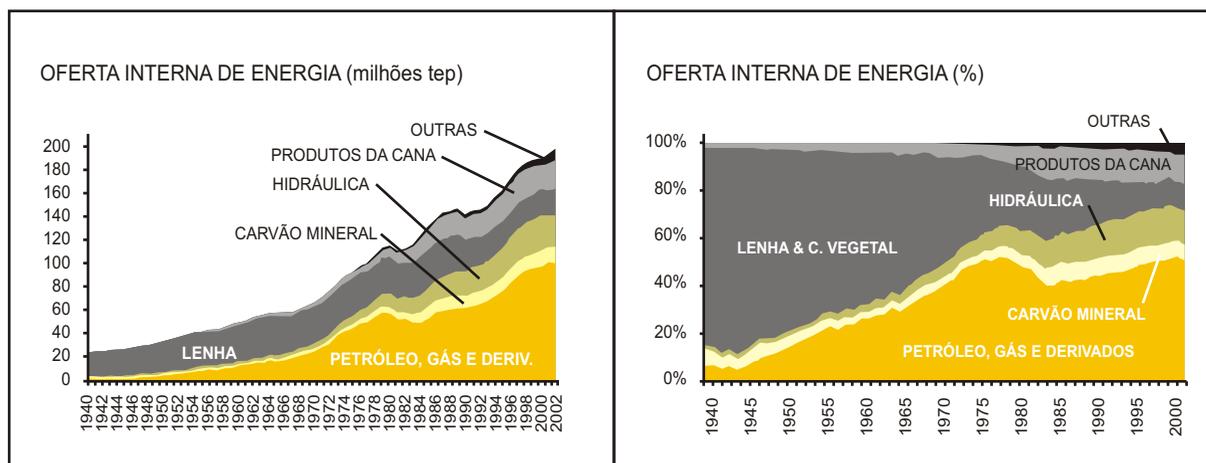


Fig. 17 - Oferta de energia no mundo nos últimos 60 anos por diferentes fontes.

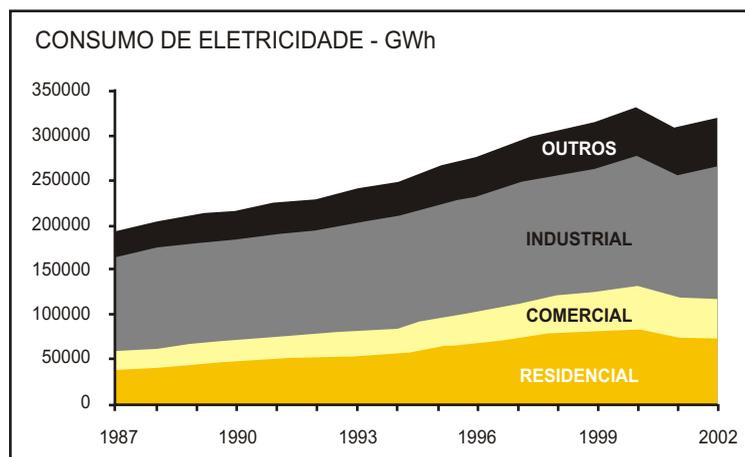
XII.7 O consumo de energia elétrica em Alagoas e no Brasil

O Brasil, na atualidade, consome uma quantidade 200 % superior à que consumia de energia em 1970. De lá para cá a população, hoje estimada em 180 milhões de habitantes, apenas duplicou, enquanto o consumo de energia triplicou. Uma maior facilidade e disponibilidade de bens de consumo e uma maior produção agropecuária e industrial fazem com que, atualmente, tenhamos no Brasil um consumo total de cerca de 200 milhões de tep, o que corresponde a um consumo por pessoa de 1,11 tep, bem abaixo da média mundial por pessoa de 1,65 tep. No entanto, o consumo energético brasileiro pode ser considerado alto, uma vez que corresponde a 2 % do mundial. A razão disto não se encontra em possuímos uma grande população, a quinta maior do mundo, e sim em produzirmos muita energia para atender à produção agrícola e industrial para fins de exportação e de consumo interno (**figura 18**). Vejamos isto: pelo nosso consumo direto de eletricidade residencial, levando em conta que todos tenham acesso à moradia eletrificada, utilizamos 73.000 GWh, o que corresponde a $6,28 \times 10^6$ tep, ou seja, a 405 kWh/ano em média por brasileiro (resultado que pode ser convertido em toneladas equivalente de petróleo para mostrar que se encontra muito abaixo dos 1,11 tep *per capita*, quando o cálculo incluía a energia diferentes fins). Isto corresponde a um consumo diário de aproximadamente 1.100 Wh (o que equivale a deixar todo dia ligado por um período de 1 h um aparelho eletrodoméstico de 1.100 W de potência, ou ainda, o equivalente a tomar um banho quente com o chuveiro elétrico de 2.200W todo dia durante meia hora).

Existe uma diferenciação no consumo de energia, que transcende a questão do consumo em países ricos e países pobres. Esta se encontra associada à capacidade do poder aquisitivo de cada indivíduo, tanto no pagamento da prestação de serviço no fornecimento de energia, quanto na aquisição de bens de consumo eletrodomésticos. Por outro lado, este consumo é também influenciado por aspectos culturais, como uma educação à

sensibilização para economizar energia, uma maior eficiência (uma menor perda de energia) nos motores e utensílios eletrodomésticos, e ainda nos meios de produção em geral.

Fig. 18- O consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos anos.



Quanto à questão energética no estado de Alagoas, é importante inicialmente caracterizar que o mesmo ocupa uma área de 0,33 % do território nacional e apresenta uma população de 2.900.000 habitantes, que corresponde a 1,6 % da população brasileira. A geração de energia elétrica no estado é em torno de 800 GWh/ano, pouco expressiva diante da produção nacional, hoje superior a 320.000 GWh/ano e insuficiente para atender a nossas necessidades. Nosso consumo residencial de eletricidade aqui no estado, por ano gira em torno de 600 GWh, que representa pouco, 0,82 % do consumo nacional. Isto representa um consumo residencial por pessoa, em média, de 207 kWh/ano (o que corresponde a dividir 600 GWh por 2,9 milhões de pessoas). Por dia, em média, cada pessoa em Alagoas consome de energia elétrica aproximadamente 570 Wh no uso residencial. O que é equivalente a deixar ligado o mesmo chuveiro elétrico, considerado antes na ilustração para a situação brasileira, por aproximadamente $\frac{1}{4}$ de hora ou 15 minutos, correspondendo a um consumo de metade da média de consumo do povo brasileiro (o que já podia ser visto quando explicitamos que tínhamos 1,6 % da população brasileira e 0,82 % do consumo residencial de energia nacional). Esta comparação no consumo residencial, diante de uma realidade de uma sociedade de padrões consumistas, serve para mostrar pela ótica da energia, o estado de maior pobreza e exclusão social do sofrido povo alagoano.

XII.8 Alguns aspectos da disponibilidade e do consumo energético em Alagoas, no Brasil e no Mundo

No que diz respeito à produção de petróleo, o estado de Alagoas participa com apenas 0,5 % da produção nacional, uma vez que extrai $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$, o que corresponde a $4,45 \times 10^5 \text{ tep/ano}$. Seguindo a mesma política internacional da alternativa de utilização dos combustíveis fósseis, tem aumentado significativamente sua produção de petróleo e gás natural nos últimos anos. Recentemente, no ano de 2004, foi encontrada uma reserva de petróleo no município de São Miguel dos Campos, com capacidade estimada total de

exploração de 15 milhões de barris, podendo aí serem extraídos até 6 mil barris por dia, o que levaria 2.500 dias de atividade produtiva, com duração de aproximadamente 6 anos e oito meses (é importante considerar neste contexto que as reservas de petróleo no estado até 2002 eram de 2,1 milhões de m³). Isso nos leva a pensar que, apesar da existência de muitas reservas ainda não exploradas, as reservas de petróleo, não só locais, mas em todo o mundo, um dia chegarão ao fim.

Na atualidade as reservas mundiais de petróleo alcançam 2,2 trilhões de barris, porém com uma estimativa de que a produção mundial possa atingir entre 2010 e 2020, um pico de 80 milhões de barris diários; acredita-se que se inicia diante de tal demanda um processo de redução das reservas e escassez do produto, aumentando os custos dos combustíveis fósseis. Não sabemos também se, até lá, toda esta energia petrolífera disponível para trabalho útil pode ser descarregada em nossa atmosfera em forma de calor (energia degradada), sem causar grandes impactos ambientais. Quanto à exploração de uma outra fonte não-renovável de energia, o gás natural em Alagoas, nossa participação é muito mais expressiva se considerarmos nossa pequena extensão territorial, uma vez que contribuimos com cerca de 5 % da produção nacional, por serem retirados um quantitativo em volume de 8×10^8 m³/ano, o equivalente em petróleo a $7,9 \times 10^5$ tep/ano. As reservas de gás no estado estão estimadas em $5,8 \times 10^9$ m³, o que significa dizer que mantida esta taxa de extração, teríamos, com as reservas atuais já descobertas, uma exploração que iria durar menos de oito anos (acaba em 2012). Desta forma, dentro em breve, todo gás natural consumido em Alagoas teria que vir de outras regiões, o que poderia no futuro elevar o custo atual do produto ao consumidor.

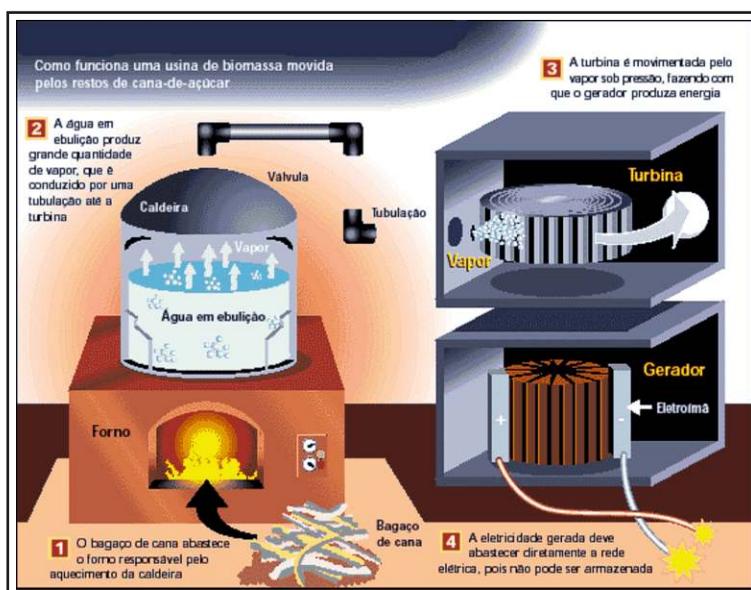
Com relação à produção de álcool em Alagoas, extraído da nossa principal atividade agrícola-industrial, como maior produtor da região Nordeste de cana-de-açúcar, com 53 milhões de toneladas/ano, produzimos cerca de 650×10^3 m³/ano, o equivale em petróleo a $3,7 \times 10^5$ tep/ano, que corresponde a 5 % da produção nacional. O álcool é visto como uma alternativa nacional econômica e ecológica para substituir os derivados do petróleo nos motores automotivos, e o bagaço de cana, resíduo orgânico comburente que sobra da moagem, como um combustível renovável, já é considerado uma grande alternativa na alimentação das usinas termoelétricas.

Uma tonelada de cana-de-açúcar, após a moagem para retirar o caldo, deixa de resíduo 240 kg de bagaço de cana, o que corresponde a uma disponibilidade de 12,72 milhões de toneladas de bagaço por ano em Alagoas, equivalente a 2,7 milhões de tep/ano. O poder calórico do bagaço é igual a 2.130 kcal/kg; se fôssemos empregar toda nossa produção atual na geração de eletricidade, estaríamos realizando trabalho útil de movimentar as turbinas das termoelétricas alagoanas, mas a um custo para o meio ambiente ao descarregar em nossa atmosfera 27 trilhões de kcal de CO₂. O problema é que existe no mundo uma política de se buscar a melhor oferta de produção de energia elétrica. A opção atual em todo o mundo, por apresentar maior viabilidade técnica e econômica, como já nos referimos anteriormente, é a de desenvolver usinas termoelétricas. Essas usinas, comparadas com as hidroelétricas, utilizam uma estrutura de montagem bem mais leve e dinâmica, o que representa economicamente um menor custo

tanto de instalação quanto de operação. Acompanhando essa tendência a que já nos referimos anteriormente, o Brasil, um país por tradição de hidroelétricas, tem procurado investir rumo às termoeletricas. Economicamente, a opção em nosso estado de autoprodutores, que tem disponível como matéria-prima o bagaço de cana, não poderia ser diferente, e se produz 0,8 MW (a cada segundo que passa se produz aqui no estado 0,8 milhões de Joules de energia elétrica pela iniciativa privada). As usinas de açúcar e álcool locais utilizam menos que 50% de sua energia termoeletrica produzida, tendo assim a capacidade de vender o excedente produzido à companhia de energia elétrica do setor público que abastece a região.

O processo empregado na geração termoeletrica, atualmente, inicia-se com a combustão direta do bagaço na caldeira, produzindo vapor d'água a alta pressão, que em movimento (energia cinética) realiza o trabalho mecânico de mover as pás da turbina acoplada ao gerador. A **(figura 19 anexa)** mostra o esquema de uma termoeletrica. Porém, se tem procurado desenvolver tecnologia neste setor para melhorar significativamente a eficiência do processo, o que deve ocorrer a partir da gaseificação da biomassa (transformar o bagaço em gás comburente), tornando a produção termoeletrica a partir do bagaço bem mais viável economicamente em breve. Numa termoeletrica de médio porte atual, com 1 tonelada de bagaço, que corresponde a 2.300.000 kcal, operando com uma eficiência baixa em torno de 10 %, se produzem 230.000 kcal ou 267 kWh, o que já se torna economicamente viável se considerarmos que não há custo de energia primária, tendo-se o bagaço como sobra.

Fig. 19- Esquema de funcionamento de uma termoeletrica



O sistema energético montado pelo homem como principal elemento para viver em uma sociedade industrial é responsável pelos principais impactos causados ao meio ambiente. O diagrama do consumo de derivados de petróleo no mundo (**figura 20**) para atender as especificidades da produção industrial, consumo doméstico e os meios de transportes, acrescido da disponibilidade de outras crescentes fontes mundiais utilizadas para consumo de energia, já apresentadas, trazem gradativamente problemas incomensuráveis ao meio ambiente, como o do aquecimento global do planeta, causando prejuízos ecológicos cujo alcance ainda não se encontram bem definidos pela ciência. O

que se tem por certo é que, em suas diferentes etapas, a indústria energética, da produção ao consumo de combustíveis, agrotóxicos, adubos, entre outras matérias-primas para a

produção industrial, agride biofísico-quimicamente o meio ambiente, já que, causa mudanças na composição química dos solos, de nossos recursos hídricos em termos de escassez de água potável, o aquecimento da atmosfera e dos oceanos, provoca alteração na cobertura vegetal do planeta, altera as condições climáticas de regiões.

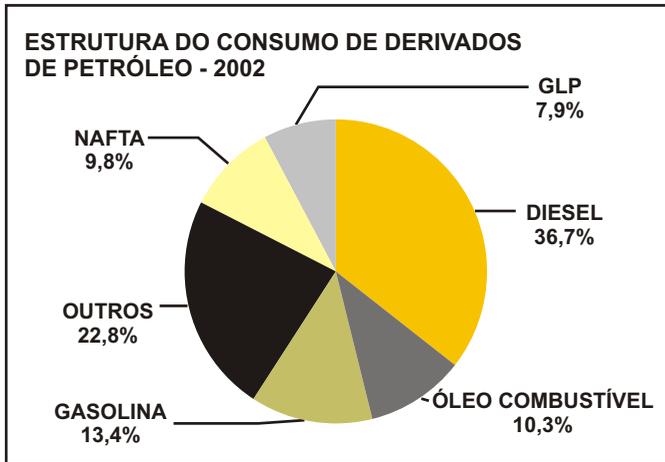


Fig. 20 - O Consumo de derivados de petróleo no mundo.

As alternativas buscadas de produção de energia para se viver comprometeram e continuam a comprometer a própria vida, uma vez que dificultam a sobrevivência da fauna e da flora e a saúde do próprio homem. Aqui concluímos esta importante passagem da história da ciência à luz da energia, associando a utilização e as conseqüências das principais fontes energéticas para a vida. Muito ainda temos que saber deste importante conceito físico, também de interesse e de domínio de outras ciências. A preocupação atual reside em saber se ainda dispomos de tempo hábil, antes de catástrofes maiores relativas a desequilíbrios ambientais, a fim de conseguir desenvolver tecnologia eficiente e adequada, para disponibilizar energia e atender a nossas necessidades, sem agredir as condições mais apropriadas que o meio ambiente disponibiliza para manter nossa qualidade de vida.

XIII. Referências Bibliográficas

ARISTÓTELES. (1964).Obras.Traducción del griego, estudio preliminar, preámbulos y notas por Francisco de P. Samaranch. Madrid: Aguilar.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BASSALO, J.M.F. ,(1999). Nascimento da Física - Revista Brasileira de Ensino de Física - :vol.21, n°2).

_____.(1997).Nascimento da Física.Revista Brasileira de Ensino de Física . vol.19, n°3.

_____. (1998).Nascimento da Física. Revista Brasileira de Ensino de Física : vol. 20 n°4.

_____.(1998) Nascimento da Física.Revista Brasileira de Ensino de Física : v.20,n.1

_____.(1996) Nascimento da Física. Revista Brasileira de Ensino de Física -: v.18,n.2

_____. (1997).Nascimento da Física. Revista Brasileira de Ensino de Física v.19,n.2

_____.(1995). Nascimento da Física. Revista Brasileira de Ensino de Física - v.17,n.4

_____. (1990).Crônicas da Física tomo 1 e 2; Ed. Univ. Fed. do Pará.

BOANOVA. A. C.(1985).Energia e classes sociais no Brasil; Ed. Loyola

BRADY, James E.RUSSEL. Joel W. ; HOLUM, John. (2002). Química: a matéria e suas transformações. Tradução de: J.A. Souza. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 474 p.

BRANCO, S. M. (2000) Energia e Meio Ambiente; p.70-80; O Desafio de Ensinar Ciência no Século XXI; Estação Ciência Usp; Ed. Edusp.

CRUZ, F. F. de Souza (1985). O Conceito de Força na Idade Média 2ª parte, p.64-73; Cad. Cat. Ens. Fis., v. 2, n. 2.

ELKANA, Y(1977). La Scoperta della conservazione dell'energia. Feltrinelli, Milão.

GOLDEMBERG, J.(1990). Energia Nuclear: vale a pena? São Paulo SP. Editora Scipione.

HEWITT, Paul G.(2002). Física conceitual. Tradução: Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina. 9.ed Porto Alegre: Bookman, 685 p.

KARLSON, Paul; Nós e a Natureza (O Romance da Física); 2ª ed., Ed. Globo

Ministério das Minas e Energia Brasil (2003). Balanço Energético Nacional(BEN-2003).

OLIVEIRA, A. de. Energia e sociedade, v. 5, n. 29, Ciência Hoje SBPC.

O UNIVERSO (1995) - Série Atlas Universais. Editora Ática.

OREAR, J.(1971). Física. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora.

QUEIROZ, Antonio Carlos M. de; www.coe.ufrj.br/~acmq/eletrostáticahtml

STARR, C. Energy and Power(1971).Scientific American, v.224, n. 3.

STUDART, N. (2000). A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.22, n. 4.

SNEDDEN, R.(1996). Energia. São Paulo-SP Editora Moderna. Coleção Polêmica.

TIPLER, P. A. (2000). Física Para Cientistas e Engenheiros. Vol.1,2 e 3. Livros Técnicos e Científicos Editora.

VOET, Donald; VOET, Judith G.: PRATT, Charlotte W. (2000). Fundamentos de bioquímica. Trad. Arthur Germano Fett Neto..[et al.]. Porto Alegre: Artmed. 931 p.

Sites de Figuras:

www.uco.es/~ca1lamag/Galerias/zeus-posidon.jpg

sprott.physics.wisc.edu/images/faraday.jpg

www.hengel.com.br/imagens/biomassa.gif

www.larramendi.es/img/aristoteles_berruguete.jpg

www.escolavesper.com.br/.../figuras/fotoss23.jpg

www.panoramaenergetico.com/GEOTERMICAF1.jpg