



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RENATA GARCIA DUTRA DE OLIVEIRA

ENERGIA COMO FUNÇÃO DE ESTADO NO CONTEXTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Campina Grande, Paraíba

Fevereiro de 2015

RENATA GARCIA DUTRA DE OLIVEIRA

ENERGIA COMO FUNÇÃO DE ESTADO NO CONTEXTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Unidade Acadêmica de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Energia

Orientador:

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2015

RENATA GARCIA DUTRA DE OLIVEIRA

ENERGIA COMO FUNÇÃO DE ESTADO NO CONTEXTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Unidade Acadêmica de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

À minha mãe, Lucicleide, a quem dedico todo meu amor e eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me fornecer saúde, determinação e força para enfrentar esta jornada repleta de surpresas e desafios que foram vencidos.

À minha mãe, Lucicleide, que é a minha inspiração. Pelos ensinamentos, pela confiança, pelo incentivo, pela paciência, pelo amor, enfim, por estar presente em todos os instantes da minha vida. Sem a dedicação e o apoio dado por ela, eu não chegaria até aqui.

À minha irmã, Renally, pelo amor, pela amizade, por todos os momentos felizes que me proporciona, dando um sentido ainda maior para minha vida.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram, incentivaram e entenderam os momentos de ausência. Em especial a minha avó, Bárbara, por todo carinho e orações.

Ao professor Benedito Antonio Luciano pela orientação, apoio e empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de toda a Universidade Federal de Campina Grande pela dedicação.

Por fim, agradeço a todos os amigos que fui presenteada nesta caminhada, companheiros de curso e de vida, que contribuíram para construção de quem sou hoje.

RESUMO

Da pré-história aos dias atuais, o uso da energia está intimamente relacionado com o desenvolvimento das sociedades. Atualmente, não existe uma definição definitiva do que é energia. Porém, as leis físicas que envolvem a maioria dos processos de conversão energética são conhecidas. Particularmente, aquelas relacionadas com a conservação e a dissipação da energia, fundamentais para o uso eficiente e sustentável dos recursos disponíveis na natureza. Assim, neste trabalho, a energia é apresentada como função de estado no contexto da eficiência energética. A forma de abordagem é sistêmica, numa perspectiva multidisciplinar, por meio de estudos relativos aos conceitos e fundamentos do tema abordado. Finalizando, são apresentados exemplos de aplicações da equação de estado e suas variáveis em sistemas elétricos e termodinâmicos.

Palavras-chave: Energia, Eficiência Energética, Função de estado, Leis das conversões energéticas, Termodinâmica, Variáveis de estado.

ABSTRACT

From prehistory to the present day, the use of energy is closely related to the development of societies. Nowadays, there is no definitive definition what does energy means. However, the physical laws that involve most of the energy conversion processes are known. In particular, those related to the conservation and dissipation of energy, and it is essential to the sustainable and efficient use of available resources in nature. In this work, energy is presented as state function in the context of energy efficiency, based on a systemic approach, and a multidisciplinary perspective, through studies on the concepts and fundamentals of the subject under study. Finally, state equation and their state variables are presented in electrical and thermodynamic systems.

Keywords: Energy, energy efficiency, energy conversions laws, state function, state variables, thermodynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Energia química nas reações de combustão	6
Figura 2. Processo de desintegração nuclear.	8
Figura 3. Processo de fissão nuclear.....	8
Figura 4. Processos de conversão de energia.	12
Figura 5. Matriz energética brasileira: energia renovável e não renovável (%).	14
Figura 6. Composição da oferta interna de energia.	15
Figura 7. Exemplo de cadeia energética para o carvão mineral.	21
Figura 8. Representação esquemática dos fluxos de energia primária, secundária, final e útil. ...	22
Figura 9. Sistema energético generalizado.	24
Figura 10. Processo esquemático de conversão da energia.	25
Figura 11. Estado inicial (p_i, v_i, t_i) e estado final (p_f, v_f, t_f).....	41
Figura 14. Expansão ou compressão de um gás.	42
Figura 15. (a) Trabalho com sinal positivo quando há expansão. (b) Trabalho com sinal negativo quando há compressão.	43
Figura 13. Ciclo de carnot.	46
Figura 12. Esquema fundamental de uma máquina térmica.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Benefícios das práticas de efficientização no mundo.	29
Tabela 2. Processos que ocorrem nas máquinas térmicas em geral: características principais.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BNDES–Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FDTE–Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia

GLD – Gerenciamento pelo Lado da Demanda

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

IEA – *International Energy Agency*

IGCC - *Integrated Gasification Combined Cycle*

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LED - *Light Emitter Diode*

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME- Ministério de Minas e Energia

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PROESCO - Programa de apoio a Projetos de Eficiência Energética

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Energia	2
2.1	A História da Energia	2
2.2	Conceitos e Fundamentos	3
3	Formas de Energia	5
3.1	Energia Química	5
3.2	Energia Radiante.....	6
3.3	Energia Térmica	7
3.4	Energia Nuclear	7
3.5	Energia Mecânica	8
3.6	Energia Elétrica	11
4	Conversões Energéticas	12
4.1	Recursos Energéticos.....	13
4.1.1	Combustíveis Fósseis	15
4.1.1.1	Carvão	16
4.1.1.2	Petróleo	16
4.1.1.3	Gás Natural.....	17
4.1.2	Urânio.....	17
4.1.3	Hidráulica.....	18
4.1.4	Biomassa	18
4.1.5	Eólica	19
4.1.6	Solar	19
4.2	Energias Primárias, Secundárias, Finais e Úteis	20
4.3	As Leis das Conversões Energéticas.....	22
4.3.1	Lei da Conservação de Energia	23
4.3.2	Lei da Dissipação de Energia	24
4.4	Rendimento das Conversões Energéticas	25
4.5	Perdas e Desperdícios.....	26
5	Eficiência Energética	27
5.1	Os Programas de Eficiência Energética.....	30

5.2	A Eficiência Luminosa	32
6	Energia como Função de Estado	34
6.1	Indutor	35
6.1.1	Energia Magnética Armazenada	35
6.2	Capacitor.....	37
6.2.1	Energia Elétrica Armazenada.....	37
6.2.2	Coenergia Elétrica	38
6.3	Termodinâmica.....	39
6.3.1	Lei Geral dos Gases Perfeitos	40
6.3.2	Trabalho Realizado por um Gás	42
6.3.3	Transformações Isobáricas, Isotérmicas, Isocórica e Adiabáticas.....	43
6.3.4	Ciclo de Carnot	45
6.3.5	Máquinas Térmicas	47
7	Conclusão.....	49
	Referências	50

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) são apresentados estudos relativos aos conceitos de energia, incluindo as fundamentações teóricas das diversas formas de energia e seus processos de conversão, tendo como foco principal as suas aplicações, no contexto da eficiência energética além de apresentar exemplos do emprego da energia como uma função de estado.

Objetivando sistematizar o tema a ser abordado, o texto foi organizado em sete capítulos. No Capítulo 1 é apresentada esta Introdução. No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o tema energia, de forma geral, o contexto histórico, e a terminologia empregada para conceituação do tema estudado. No Capítulo 3 são apresentadas as diversas formas de energia e algumas das suas aplicações. No Capítulo 4 são apresentados os processos de conversão energética, expondo os principais recursos energéticos empregados, levando em consideração a matriz energética brasileira. Além disso, são expostas as definições referentes aos diferentes tipos de energia, resultantes de processos de conversão. Ainda no Capítulo 4, são explicados os processos de conversão utilizando os princípios da conservação e da dissipação de energia. No Capítulo 5 são apresentados conceitos fundamentais referentes à eficiência energética, programas de efficientização implementados e eficiência luminosa. No Capítulo 6 é apresentada a energia como função de estado em dispositivos de armazenamento e transferência de energia, como indutores e capacitores. Adicionalmente, é apresentado um estudo básico da termodinâmica, a partir de suas variáveis de estado. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas algumas conclusões obtidas a partir da realização deste TCC.

2 ENERGIA

A energia se faz presente de diversas maneiras, por tal diversidade, o campo dos estudos energéticos é vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até os aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, permitindo uma abordagem que considere temas de caráter técnico ou que envolva seus componentes socioeconômicos e ambientais, inclusive quanto à sua evolução histórica e suas perspectivas futuras (VIANA *et al*, 2012).

Neste Capítulo são apresentadas: uma revisão bibliográfica sobre o tema energia, de forma geral, as leis básicas e a terminologia empregada, com o objetivo de fundamentar as boas práticas que conduzem ao uso racional dos recursos energéticos.

2.1 A HISTÓRIA DA ENERGIA

A história da humanidade confunde-se com a história da energia. Da pré-história, aos dias atuais, ela está intimamente relacionada com o desenvolvimento das sociedades.

O uso da energia no mundo sempre esteve associado ao grau de desenvolvimento das civilizações. Os períodos paleolítico (3.500.000 a 10.000 a.C.) e neolítico (10.000 a 5.000 a.C.) foram marcados por descobertas importantes, como: o controle do fogo, a produção de ferramentas, e o desenvolvimento de formas de cultivo.

Com a descoberta do fogo, o homem passou a tirar proveito da energia térmica, melhorando seu modo de vida e conseguindo avanços técnicos como a fundição de metais, a preparação de cerâmicas e a criação de novos utensílios. Outro ponto marcante na história da energia refere-se ao instante no qual o homem começou a utilizar a energia dos animais que domesticavam, para realizar os trabalhos mais pesados, como arar a terra, girar moendas e os transportes de cargas.

A energia dos ventos teve papel importantíssimo para o desenvolvimento da humanidade, pois foi responsável pelas descobertas dos grandes navegadores, que se aventuravam em suas caravelas movidas pela força dos ventos para navegarem pelos mares, descobrindo e colonizando novos continentes.

Porém, o grande marco da utilização da energia pelo homem teve lugar durante o século XVIII, com a invenção da Máquina a Vapor, que deu início à era da Revolução Industrial na Europa, marcando definitivamente o uso e a importância da energia nos tempos modernos (STRAPASSON, 2004).

A descoberta de um vetor energético como a eletricidade e a invenção das máquinas elétricas no século XIX, juntamente com a introdução dos veículos automotores, lançaram as bases para a introdução da moderna sociedade de consumo, caracterizada por um uso intensivo dos recursos energéticos numa escala nunca vista na história da humanidade.

Dessa forma, foram necessários novos combustíveis de maior poder energético, sendo o petróleo, o “ouro negro”, o candidato que reuniu essas propriedades. Iniciou-se, assim, uma nova fase da utilização dos combustíveis para extração de energia, que pode ser chamada de “fase líquida”, que perdura até os dias atuais. Mais recentemente, após a Segunda Guerra Mundial, a energia nuclear parecia uma alternativa promissora para a geração de energia elétrica, mas sofreu um grande revés por conta do acidente nuclear em Chernobyl, em 1986, na Ucrânia (DA SILVA *et al.*, 2003).

Atualmente, e em virtude das mudanças operadas, o homem alcançou feitos imensuráveis e pode ambicionar alcançar muito mais.

2.2 CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Segundo Moreira (1998), se houvesse a necessidade de citar um único conceito físico como o mais importante para a Física, e para toda a ciência de um modo geral, esta seria, sem dúvida, o conceito de energia. No entanto, existem diferentes tentativas de vários autores em busca de um conceito sobre o que seria energia. Nenhum desses relatos é aceito como sendo um conceito definitivo. O que se sabe da energia são como ocorrem a maioria dos processos de conversões energéticas.

O estudo da energia remonta à Grécia Antiga. Desde o século IV a.C., Aristóteles já fazia referência a ela. Para ele, a energia era uma “realidade em movimento”. Na acepção moderna, energia corresponde ao conceito desenvolvido juntamente com a termodinâmica a partir de meados do século XIX e utilizado para descrever uma ampla variedade de fenômenos físicos (VIANA *et al.*, 2012).

Em sua definição mais corriqueira, a energia foi descrita como a capacidade de se produzir trabalho. Entretanto, a utilização desse conceito é bastante variada e algumas vezes equivocada, dependendo do objetivo que se tem em conta (GOMES, 2006).

Em 1872, Maxwell (James Clerk Maxwell, 1831-1879) propôs uma definição que pode ser considerada mais correta do que a anterior: “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste à esta mudança”. Esta definição refere-se a mudanças de condições, a alterações do estado de um sistema e inclui duas ideias importantes: as modificações de estado implicam em vencer resistências e é justamente a energia que permite obter estas modificações de estado. Ou seja, em um sistema conservativo, pode-se afirmar que energia é uma função de estado (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Contudo, a concepção física do conceito de energia não é muito clara, ela está associada a um modelo conceitual compartilhado pela comunidade científica e este modelo não é imutável, estático, ele evolui, passa por reelaborações (BUCUSSI, 2006).

Por ser um conceito tão fundamental, definir energia é sem dúvida mais difícil e menos importante do que sentir e perceber sua existência, como a causa e origem primeira de todas as mudanças. Em geral, as leis físicas que governam o mundo natural são no fundo variantes das leis básicas dos fluxos energéticos, as eternas e inescapáveis leis de conservação e dissipação, que estruturam todo o universo, desde o micro ao macrocosmo.

Adicionalmente, outro conceito frequentemente associado à energia é o da potência, que corresponde ao fluxo de energia no tempo, de enorme importância ao se tratar de processos humanos e econômicos, onde o tempo é essencial.

Em princípio, qualquer capacidade instalada poderia atender qualquer necessidade de energia, desde que lhe seja dado tempo suficiente, o que evidentemente não atende às necessidades impostas pela realidade. Por isso, pode-se afirmar que a sociedade moderna, que busca atender suas demandas energéticas de forma rápida, é tão ávida em potência quanto em energia (VIANA *et al.*, 2012).

3 FORMAS DE ENERGIA

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. E mais do que sobreviver, o homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e formas alternativas de adaptação ao ambiente em que vive e de atendimento às suas necessidades (ANEEL, 2002).

Existem três formas básicas de energia: a cinética, devido ao estado de movimento de um corpo; a potencial, devido ao efeito de forças exercidas sobre um corpo por outros corpos; e a energia de massa, a equação (3.1) proposta por Einstein,

$$E = m * c^2, \quad (3.1)$$

em que E é energia [J]; m corresponde a massa [kg] e c^2 é a velocidade da luz elevada ao quadrado, sendo a velocidade da luz igual a 300.000.000 m/s. Na expressão proposta por Einstein é estabelecida a equivalência entre massa e energia (MOREIRA, 1998).

Esta classificação é bastante geral e neste trabalho serão abordadas "outras formas" de energia: Energia Química, Energia Radiante, Energia Térmica, Energia Nuclear, Energia Mecânica e Energia Elétrica, mas, pode-se dizer que todas essas "outras formas" estão incluídas nas três formas básicas (STANO JUNIOR; TIAGO FILHO, 2007).

3.1 ENERGIA QUÍMICA

A energia química trata-se da energia potencial que as substâncias possuem devido às atrações e repulsões entre suas partículas subatômicas. Tais conteúdos energéticos podem ser alterados por meio de reações químicas. Quando as substâncias reagem, ocorrem mudanças na natureza das atrações (ligações químicas) entre seus átomos, portanto há mudanças na energia química (energia potencial) que se observa sob a forma de energia liberada ou absorvida no curso da reação (OLIVEIRA; SANTOS, 1998).

É importante salientar que, nas reações químicas, as ligações químicas existentes nas moléculas dos reagentes, contêm mais energia do que as ligações observadas nas moléculas dos produtos.

Uma aplicação típica associa-se aos processos de combustão em motores, fornos e caldeiras, onde, a energia química de combustíveis como gasolina, álcool e lenha é convertida em energia térmica, na forma de gases, sob altas temperaturas.

Figura 1. Energia química nas reações de combustão



Fonte: Viana (2012).

3.2 ENERGIA RADIANTE

Segundo Ortega (2013), denomina-se radiação, ou energia radiante, à energia que se propaga sem necessidade da presença de um meio material. O termo radiação é igualmente aplicado para designar o próprio processo de transferência desse tipo de energia.

Os átomos podem absorver energia de uma fonte externa e posteriormente liberar (ou emitir) essa energia na forma de radiação eletromagnética. Esta radiação aparece na forma de ondas com diversas frequências (STANO JUNIOR; TIAGO FILHO, 2007).

Muitas fontes de energia emitem energia radiante. O Sol e outras estrelas, por exemplo, são astros luminosos que produzem energia radiante por meio de reações nucleares.

3.3 ENERGIA TÉRMICA

As moléculas constituintes da matéria estão em contínuo movimento, denominado agitação térmica. A energia cinética associada a esse movimento é chamada energia térmica. Deve-se salientar que temperatura é uma medida do estado de agitação das partículas do corpo, isto é, a temperatura não mede a quantidade de energia térmica do corpo. Sendo assim, o fato de um corpo estar a uma temperatura superior a outro, não significa que ele possua maior quantidade de energia térmica, mas sim que seu estado de agitação térmica está em um nível mais elevado que do outro corpo.

Energia térmica não é o mesmo que calor. Calor é energia térmica transferida entre substâncias ou sistemas devido a uma diferença de temperatura entre eles. Desta forma é correto dizer que um sistema possui energia térmica, mas não é correto dizer que ele contém calor, já que para isso é necessário ocorrer transferência de energia de um sistema para outro.

A quantidade de calor transferida por uma substância depende da velocidade e do número de átomos ou moléculas em movimento. Quanto mais rápido os átomos ou as moléculas se movem, maior a temperatura, e quanto maior o número de átomos ou moléculas em movimento, maior a quantidade de calor transferida (STANO JUNIOR; TIAGO FILHO, 2007).

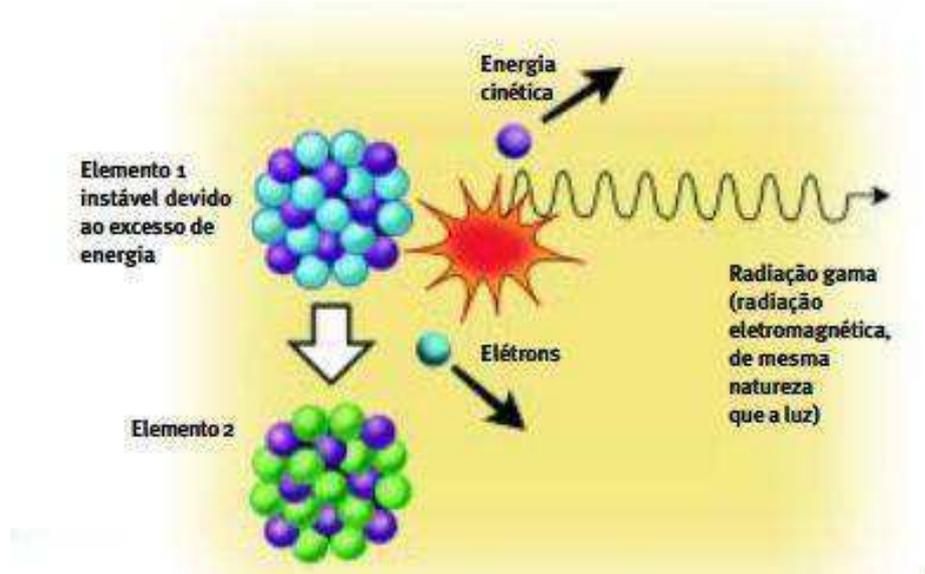
3.4 ENERGIA NUCLEAR

A energia nuclear se realiza quando o núcleo dos átomos muda. A liberação de energia do núcleo se dá mediante dois processos principais: decaimento radioativo (também chamado desintegração) e fissão.

No decaimento radioativo, o núcleo do elemento emite radiação e transforma-se em um núcleo diferente, como ilustrado na Figura 2. Na fissão nuclear, a energia é liberada pela divisão do núcleo normalmente em dois pedaços menores e de massas comparáveis.

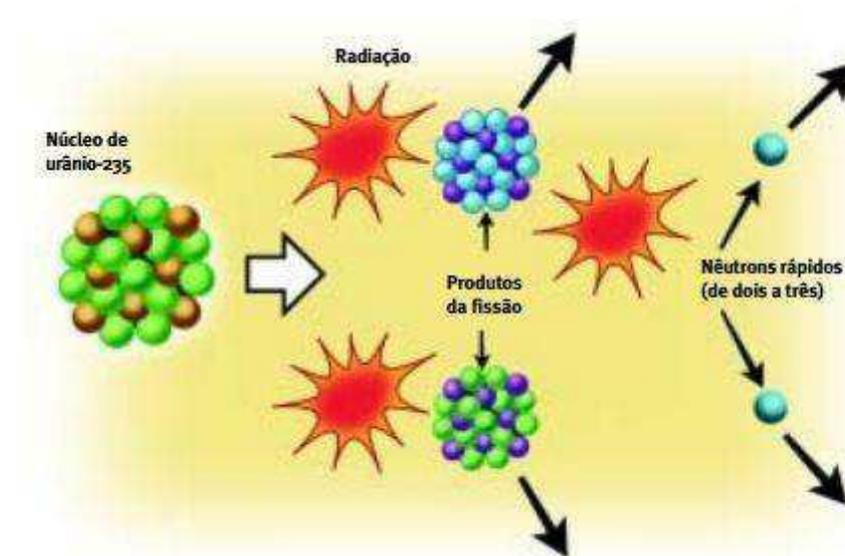
Na fissão nuclear, a energia é liberada pela divisão do núcleo normalmente em dois pedaços menores e de massas comparáveis, como ilustrado na Figura 3. A soma das energias dos novos núcleos mais a energia liberada para o ambiente em forma de energia cinética dos produtos de fissão e dos nêutrons liberados deve ser igual à energia total do núcleo original (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005).

Figura 2. Processo de desintegração nuclear.



Fonte: Gonçalves; Almeida (2005).

Figura 3. Processo de fissão nuclear.



Fonte: Gonçalves; Almeida (2005).

3.5 ENERGIA MECÂNICA

A energia mecânica pode ser potencial ou cinética. Isto é, um sistema mecânico pode ter energia sob a forma de movimento (energia cinética - E_C) ou sob a forma de forças de

interação (energia potencial - E_p). A energia mecânica - E_M é a soma destas duas formas de energia:

$$E_M = E_C + E_P. \quad (3.2)$$

A energia cinética é associada ao estado de movimento de um corpo. Quanto mais depressa um corpo se move, maior é a energia cinética. Quando o corpo está em repouso, a energia cinética é nula.

Para um corpo de massa m [kg] cuja velocidade v [m/s] é muito menor que a velocidade da luz,

$$E_C = \frac{1}{2}mv. \quad (3.3)$$

A energia mecânica potencial associa-se diretamente a uma força estática e pode ser potencial elástica, tal como se acumula em molas ou em gases comprimidos, ou gravitacional, dependendo da posição de uma massa em um campo gravitacional.

A expressão que reflete a variação da energia potencial associada à mudança de configuração é dada por (HALLIDAY; RESNICK, 2008):

$$\Delta E_P = - \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx, \quad (3.4)$$

- Energia potencial gravitacional - E_{Pg} : Para determinação da expressão referente à E_{Pg} , integra-se ao longo do eixo y em vez do eixo x , pois a força gravitacional (F_g) age no eixo vertical, e em seguida substitui-se a força F por $-mg$, já que a F_g tem módulo mg e está orientada no sentido negativo do eixo y , tem-se:

$$\Delta E_{Pg} = - \int_{y_i}^{y_f} (-mg) dy = mg \int_{y_i}^{y_f} dy = mg[y]_{y_i}^{y_f},$$

e, portanto,

$$\Delta E_{Pg} = mg(y_f - y_i) = mg\Delta y. \quad (3.5)$$

Em geral, considera-se $E_{Pg_i} = 0$ e $y_i = 0$, logo a expressão (3.5) se torna:

$$E_{Pg}(y) = mgy, \quad (3.6)$$

onde, E_{Pg} é energia potencial gravitacional [J]; m é a massa [kg]; g e a gravidade [m/s^2] e y é a posição no eixo vertical [m].

- Energia potencial elástica - E_{Pe} : Considera-se a seguir o sistema massa-mola, para determinar a variação correspondente da E_{Pe} do sistema, substitui-se $F(x)$ por $-kx$ na expressão (3.4), tem-se:

$$\Delta E_{Pe} = - \int_{x_i}^{x_f} (-kx) dx = k \int_{x_i}^{x_f} x dx = \frac{1}{2} k[x^2]_{x_i}^{x_f},$$

e, portanto,

$$\Delta E_{Pe} = \frac{1}{2} k(x_f)^2 - \frac{1}{2} k(x_i)^2. \quad (3.7)$$

Em geral, considera-se $E_{Pe_i} = 0$ e $x_i = 0$, logo a expressão (3.7) se torna:

$$E_{Pe}(x) = \frac{1}{2} kx^2, \quad (3.8)$$

na qual, E_{Pe} é energia potencial gravitacional [J]; k é a constante elástica da mola [N/m] x é a posição no eixo horizontal [m].

3.6 ENERGIA ELÉTRICA

Há presença de energia elétrica nas cargas estacionárias, como se observa nas nuvens eletricamente carregadas, na iminência de uma descarga atmosférica ou ainda nos capacitores elétricos. Porém, a energia elétrica é mais frequentemente associada à circulação de cargas elétricas causada por um campo elétrico, sendo definida pelo produto entre a potência elétrica e o tempo durante o qual esta potência se desenvolve. Por sua vez, a potência elétrica é dada como o produto entre a corrente e a tensão medida entre os dois pontos onde circula tal corrente. Os dois tipos básicos de corrente elétrica são a corrente contínua, quando seu valor é constante com o tempo, e a corrente alternada, cuja amplitude varia com o tempo.

Em termos de suprimento energético, a eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões (ANEEL, 2002).

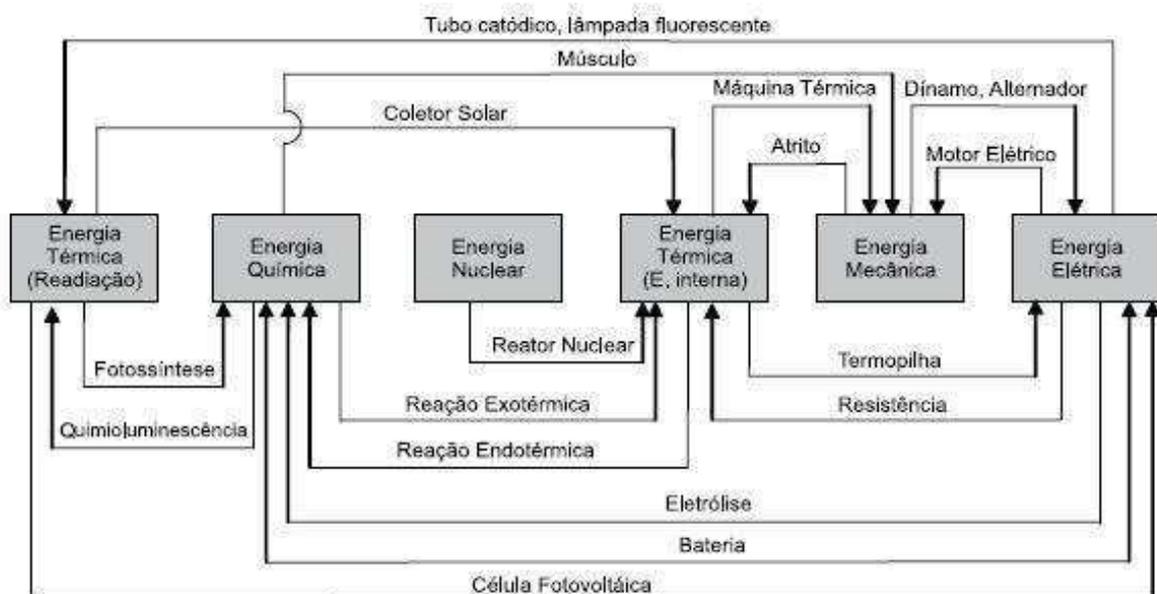
No limiar do terceiro milênio, os avanços tecnológicos em geração, transmissão e uso final de energia elétrica permitem que ela chegue aos mais recônditos lugares do planeta, transformando regiões desocupadas ou pouco desenvolvidas em pólos industriais e grandes centros urbanos. Os impactos dessas transformações socioeconômicas são facilmente observados em nosso cotidiano.

4 CONVERSÕES ENERGÉTICAS

Uma característica essencial das formas energéticas é a possibilidade de interconversão. Isto é, uma forma energética eventualmente pode ser convertida em outra, de modo espontâneo ou intencional, permitindo neste último caso adequar-se a alguma utilização desejada. Frequentemente se empregam as expressões “processos de geração de energia” ou “sistemas de consumo de energia”, quando o mais correto, a rigor, seria falar em “processos de conversão de energia” (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2006).

Na Figura 4 são apresentadas algumas das formas de conversão entre seis formas básicas de energia, pode-se observar que, enquanto alguns processos foram desenvolvidos e aperfeiçoados pelo homem, outros só são possíveis mediante processos naturais, como a conversão energética muscular e a fotossíntese. Além disso, também é possível notar que são bastante variados os processos que resultam em energia térmica e, a energia mecânica está envolvida em diversos processos tecnológicos.

Figura 4. Processos de conversão de energia.



Fonte: Marques; Haddad; Martins(2006).

4.1 RECURSOS ENERGÉTICOS

Denominam-se recursos energéticos as reservas ou fluxos de energia disponíveis na natureza e que podem ser usados para atender às necessidades humanas. Em resumo, os recursos energéticos podem ser utilizados diretamente ou após conversão, fornecendo à humanidade luz, calor, força motriz etc.

Podem ser classificados essencialmente como recursos não renováveis ou como renováveis. No primeiro caso, referem-se aos estoques de materiais que armazenam energia química, acumulada primariamente a partir da radiação solar em épocas geológicas, como é o caso do petróleo, carvão mineral, turfa, gás natural, xisto betuminoso. Da mesma forma, alguns elementos químicos que sempre estiveram presentes na crosta terrestre podem gerar energia através da fissão de seus núcleos: é o caso do urânio. Esses elementos são as fontes primárias de energia nuclear.

Como a reposição das fontes de energia fóssil e nuclear requer um horizonte de tempo geológico, essas são consideradas não renováveis. Já as fontes renováveis de energia são repostas imediatamente pela natureza, é o caso dos potenciais hidráulicos (quedas d'água), eólicos (ventos), a energia das marés e das ondas, a radiação solar e o calor do fundo da Terra (geotermal). A biomassa também é uma fonte renovável de energia e engloba diversas subcategorias, desde as mais tradicionais (como a lenha e os resíduos animais e vegetais) até as mais modernas (como o etanol para automóveis, biodiesel, bagaço de cana para cogeração energética e gás de aterros sanitários utilizados para a geração de eletricidade) (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

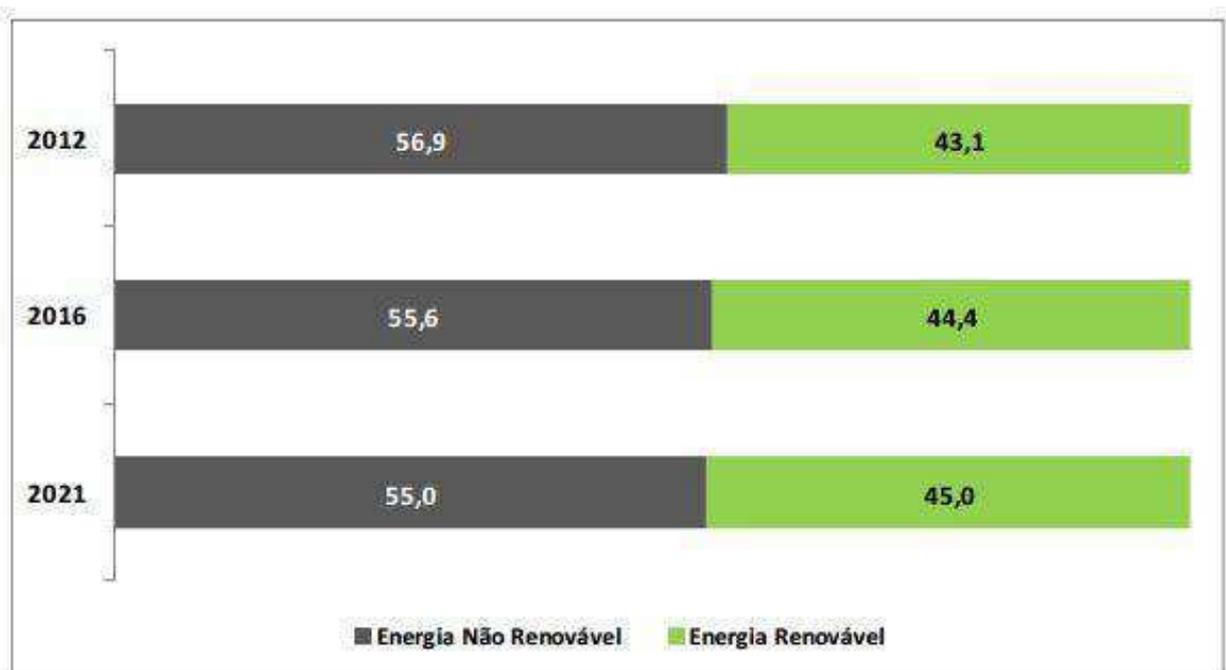
Os meios de comunicação tentam passar um mito de que as fontes de energia renováveis são limpas e as não renováveis, por sua vez, são consideradas como sendo sujas, devido, entre outros fatores, a emissão de gases poluentes durante a queima dos combustíveis fósseis. Porém, não existem formas limpas de conversão energética. O que existe, de fato, são formas que impactam mais e outras que impactam menos. Na realidade, cada forma de converter um recurso energético em energia elétrica tem vantagens e desvantagens, envolvendo questões de ordem técnica, política e socioeconômica, as quais devem ser tratadas sem manipulações ideológicas ou posturas preconceituosas em nome da sustentabilidade (LUCIANO, 2014).

Por razões estratégicas, cada país usa os recursos energéticos mais acessíveis ou mais abundantes em seu território. Tecnicamente, a esse conjunto de recursos energéticos dá-se o nome de matriz energética.

De acordo com os resultados do Balanço Energético Nacional (2014), a participação dos recursos renováveis na matriz energética brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo. Enquanto a maior parte do mundo obtém sua energia a partir de combustíveis fósseis, altamente poluentes e de valor econômico variável conforme a economia global, o Brasil possui uma matriz energética baseada em recursos renováveis e existentes em seu território. Atualmente, a média mundial é de apenas 13% de energia proveniente de fontes renováveis. No Brasil, essa taxa é de aproximadamente 43%, e a comparação se torna mais desigual se apenas considerar a produção de energia elétrica, em que a média mundial é de 13% e a do Brasil alcança 87% de energia elétrica renovável.

No ano de 2012, por exemplo, a matriz energética nacional era caracterizada pela oferta de fontes não renováveis e renováveis de energia, respectivamente 56,9 % e 43,1% como ilustrado na Figura 5. Também é possível observar a perspectiva de aumento do percentual de energias renováveis na matriz energética brasileira, alcançando 45% em 2021.

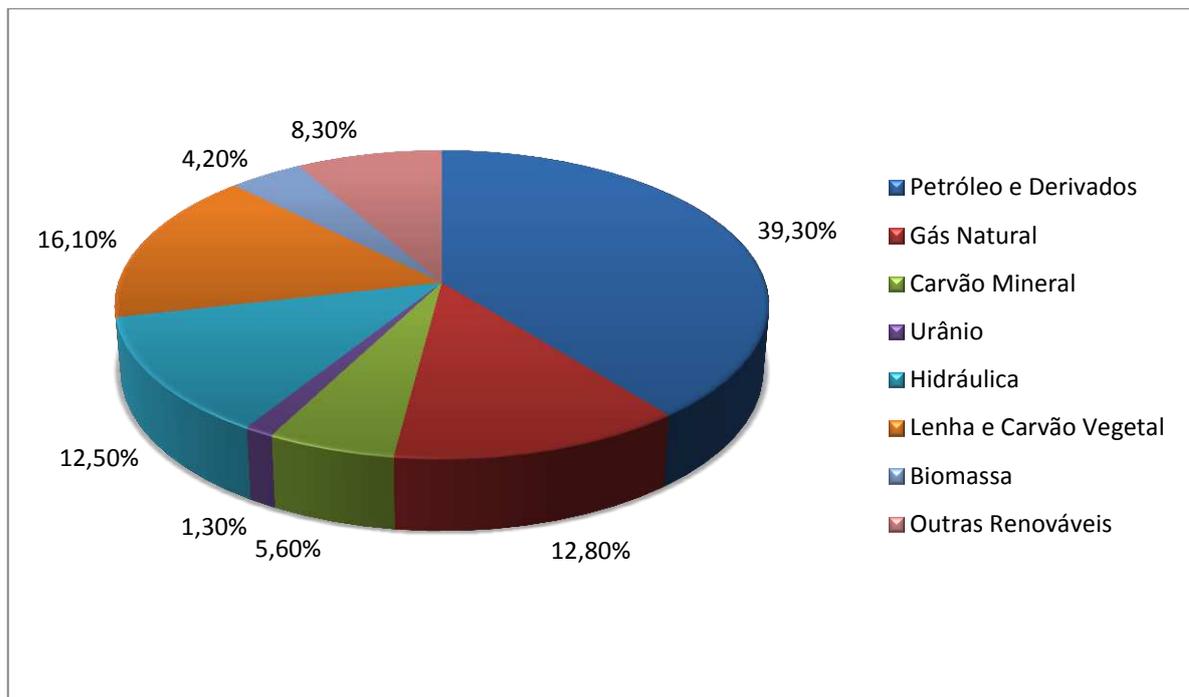
Figura 5. Matriz energética brasileira: energia renovável e não renovável (%).



Fonte: MME (2014).

Conforme se pode observar, a matriz energética brasileira é composta basicamente pelos seguintes recursos renováveis: Hidráulica, Biomassa da Cana-de-Açúcar, Lenha e Carvão Vegetal e outras renováveis; e dos seguintes recursos não renováveis: Petróleo e Derivados, Gás Natural, Carvão Mineral e Urânio. A Figura 6 apresenta um gráfico que contém a repartição da oferta interna de energia (MME, 2014).

Figura 6. Composição da oferta interna de energia.



Fonte: Adaptada pelo autor.

4.1.1 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

A energia fóssil é produzida a partir de petróleo, gás natural e carvão. Esses resíduos são o resultado da decomposição de organismos vivos durante eras geológicas e os efeitos da temperatura, pressão e certas bactérias. Ao contrário das fontes de energia renováveis, as fontes de energia fósseis desaparecerão quando as reservas planetárias estiverem esgotadas (PIVA, 2010).

A expectativa é que os combustíveis fósseis continuaram a ser a fonte de energia dominante em um futuro previsível, mas a atual situação geopolítica e ambiental exige uma nova abordagem ao consumo de energia. É importante ter em conta que os impactos ambientais têm um grande custo socioeconômico para a sociedade.

Uma parcela das alterações climáticas na terra, como o aumento da temperatura média, é atribuída ao aumento da concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera e, os combustíveis fósseis são os maiores responsáveis por esta ocorrência.

A queima de petróleo, gás natural e carvão para geração de energia elétrica suscita uma forte emissão de gases poluidores. O derretimento de geleiras e, conseqüentemente, o aumento do nível do mar e alagamento de áreas costeiras insulares, atingindo grandes contingentes de pessoas e animais silvestres alterando a biodiversidade dessas regiões são conseqüências possíveis do aquecimento global (MARQUES, 2007).

4.1.1.1 CARVÃO

De acordo com Vichi e Mansor (2009), o carvão mineral foi o primeiro combustível fóssil a ser usado em larga escala e ainda ocupa uma posição de destaque no cenário mundial. Na verdade, trata-se da fonte de energia com maior crescimento nos últimos anos. A exploração de jazidas de carvão é feita em mais de 50 países, o que demonstra a sua abundância. Nesses países, o carvão é utilizado na obtenção de eletricidade, em processos industriais e em nível doméstico.

Embora seja tradicionalmente considerado um “combustível sujo”, devido às emissões de gases, novas técnicas de utilização “limpa” do carvão vêm fazendo com que esta fonte seja considerada uma matriz energética mais limpa: entre estas técnicas, podemos citar a conversão de carvão em combustíveis líquidos, o uso de ciclos integrados de gaseificação combinada (IGCC) e a recuperação e utilização de metano das minas de carvão, além das técnicas de captura e armazenamento de carbono.

4.1.1.2 PETRÓLEO

O petróleo é um óleo mineral, de cor escura e cheiro forte, constituído basicamente por hidrocarbonetos. A refinação do petróleo bruto consiste na sua separação em diversos componentes e permite obter os mais variados combustíveis e matérias-primas.

O principal produto derivado de petróleo consumido no país é o óleo diesel, fruto da estrutura de transporte de cargas, fortemente dependente do setor rodoviário.

Um ponto importante que deve ser destacado é que a necessidade de substituição do petróleo como fonte de energia não é apenas desejável sob o ponto de vista ambiental. Com

citado anteriormente, além da geração de energia, existem frações do petróleo que são de extrema importância como matéria-prima para a indústria química. Ao contrário do setor energético, ainda não há alternativas economicamente viáveis para a substituição do petróleo como insumo industrial. A “transformação” do petróleo em plásticos, para citar apenas um exemplo, não acarreta emissão de grandes quantidades de CO₂, uma vez que o carbono permanece fixo no produto final. O petróleo é um produto valioso demais para continuar sendo queimado em motores (VICHI; MANSOR, 2009).

4.1.1.3 GÁS NATURAL

O gás natural é o mais “limpo” dos combustíveis fósseis. Ele possui características que favorecem uma maior durabilidade aos equipamentos que o utilizam e reduzem os impactos ambientais. (GOMES NETO, 2005).

Segundo o CEDIGAZ (2014), Centro Internacional de Informações da Indústria do Gás, as reservas atuais de gás natural são suficientes para 130 anos, se o consumo for mantido nos níveis atuais.

4.1.2 URÂNIO

O urânio é o elemento químico mais utilizado nas usinas nucleares. Ele é encontrado sobre toda a crosta terrestre como constituinte da maioria das rochas. Segundo Gomes Neto (2005), as maiores reservas de urânio estão nos seguintes países: Cazaquistão, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América, Canadá e Brasil.

A utilização de energia nuclear na matriz energética é fonte de grandes controvérsias entre os especialistas. Enquanto alguns defendem a erradicação das usinas nucleares, outros, antes defensores desta tese, passaram a apontar a energia nuclear como a única fonte de energia capaz de evitar as mudanças climáticas catastróficas que se anunciam, como resultado do aquecimento global provocado pela emissão de gases causadores do efeito estufa (VICHI; MANSOR, 2009).

Uma das vantagens do urânio é o seu poder de concentração. A energia contida em 1kg de urânio natural equivale a 20 mil vezes mais energia do que a mesma quantidade de carvão. Pode-se afirmar que o urânio tem um poder calorífico muito superior a qualquer fonte fóssil.

Entretanto, há de se levar em conta que apesar de as reservas de urânio serem suficientes para mais de 100 anos, também é um combustível finito, não sendo renovável (GOMES NETO, 2005).

4.1.3 HIDRÁULICA

A energia hidráulica, ou hidrelétrica, é uma das maiores das fontes renováveis de energia. A energia hidráulica é explorada em mais de 160 países, mas somente cinco (Brasil, Canadá, China, Rússia e Estados Unidos) são responsáveis por mais da metade da produção mundial (VICHI; MANSOR, 2009).

Em termos econômicos, a energia hidráulica apresenta vantagens importantes: os custos operacionais são baixíssimos em comparação com o investimento inicial, com um tempo médio de vida que pode chegar a 100 anos, os empreendimentos hidrelétricos são investimentos de longo prazo, capazes de beneficiar várias gerações (ELETROBRÁS, 2015).

Como desvantagens, pode-se citar o custo elevado de implementação das usinas, se comparado a outras fontes, o tempo relativamente longo entre a concessão e a entrada em operação e a dependência de um regime regular de chuvas, além do forte impacto socioambiental causado pela inundação de grandes áreas, com o consequente deslocamento de comunidades inteiras e a destruição do habitat natural de espécies nativas e endêmicas.

Os maiores desafios no setor hidráulico são a modernização das instalações existentes e, principalmente, o desenvolvimento de um modelo de financiamento para o setor.

A produção de energia elétrica a partir da energia hidráulica resulta da utilização da queda de água para movimentar turbinas, gerando energia mecânica, e posteriormente eletricidade, utilizando-se geradores elétricos. Isto é, há o processo de conversão de energia potencial (armazenada nas barragens) em energia cinética (do movimento correspondente à queda de água), e esta última em energia elétrica.

4.1.4 BIOMASSA

Pode ser considerado biomassa todo recurso renovável que provém de matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, tais como: álcool, óleos vegetais, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas e florestais, lixo urbano, tendo por objetivo principal a produção de energia.

Atualmente, a biomassa vem sendo bastante utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no fornecimento de energia elétrica para demandas isoladas da rede elétrica.

Existem diversas rotas para converter a biomassa em recurso energético. Em termos práticos, existe uma variedade de fontes, que vão desde os resíduos agrícolas, industriais e urbanos até as culturas plantadas exclusivamente para a obtenção de biomassa. As tecnologias para os processos de conversão são as mais diversas possíveis e incluem desde a simples combustão ou queima para a obtenção da energia térmica até processos físico-químicos e bioquímicos complexos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos (MMA, 2015).

4.1.5 EÓLICA

O potencial eólico do planeta é enorme. Se 1% da área terrestre fosse utilizada na geração de energia eólica, a capacidade mundial de geração seria equivalente ao total gerado através de todas as outras fontes (VICHÍ; MANSOR, 2009).

O vento ou energia eólica originada do deslocamento de massas de ar resultantes das diferenças de pressão e temperatura atmosférica entre duas regiões distintas.

A energia dos ventos pode ser transformada em energia mecânica, mediante o emprego de aeromotores ou os tradicionais moinhos de vento; ou ainda em energia elétrica, por meio de turbinas eólicas ou aerogeradores (GOMES NETO, 2005).

4.1.6 SOLAR

O Sol é a fonte de energia primária mais abundante para nosso planeta. Num sentido bastante amplo, pode-se dizer que, com exceção da energia nuclear, todas as outras fontes, renováveis ou não, são apenas diferentes formas de energia solar.

De acordo com Vichi e Mansor (2009), se apenas 0,1% da energia solar pudesse ser convertida com uma eficiência de 10%, ainda assim a energia gerada seria quatro vezes maior que a capacidade mundial total de geração de energia, que é de 3000 GW. A radiação solar que atinge anualmente a superfície da Terra é de $3,4 \times 10^6$ EJ, uma ordem de grandeza maior que a soma de todas as fontes não renováveis (provadas e estimadas), incluindo os combustíveis fósseis e nucleares.

Além da utilização no aquecimento de água através de coletores solares, a energia solar pode ser usada para a geração de eletricidade mediante o uso de painéis fotovoltaicos, que convertem diretamente a energia solar em energia elétrica (energia solar fotovoltaica), ou pelo aquecimento de fluidos, cujos vapores são usados para movimentar turbinas geradoras de eletricidade (energia solar térmica).

4.2 ENERGIAS PRIMÁRIAS, SECUNDÁRIAS, FINAIS E ÚTEIS

Para atender às discussões relativas ao uso antrópico da energia, no âmbito da matriz energética ela pode ser classificada em basicamente quatro tipos: energia primária, secundária, final e útil. No Balanço Energético Nacional (MME, 2014) a energia primária é classificada como “produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta”, tais como: petróleo, gás natural, carvão vapor e metalúrgico, urânio (U_3O_8), energia hidráulica, eólica, solar, e produtos da cana.

No mesmo balanço, a energia secundária é definida como “produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação, que têm como destino os diversos setores de consumo ou ainda um outro centro de transformação”. São exemplos de energia secundária: eletricidade, óleo diesel e combustível, gasolina, GLP, NAFTA, querosene, coque de carvão mineral, álcool etílico e carvão vegetal.

A energia final apenas representa a forma em que a energia é comercializada. Nos setores de consumo ainda é necessário converter a energia final para o atendimento das necessidades de iluminação, força motriz, calor de processo etc. A energia na forma em que é demandada pelos consumidores, por meio de equipamentos específicos de uso final, recebe o nome de energia útil (EPE, 2005). Na Figura 7 são apresentados os conceitos relativos um processo de geração de energia elétrica a partir da queima de carvão mineral e posterior utilização final sob a forma de iluminação.

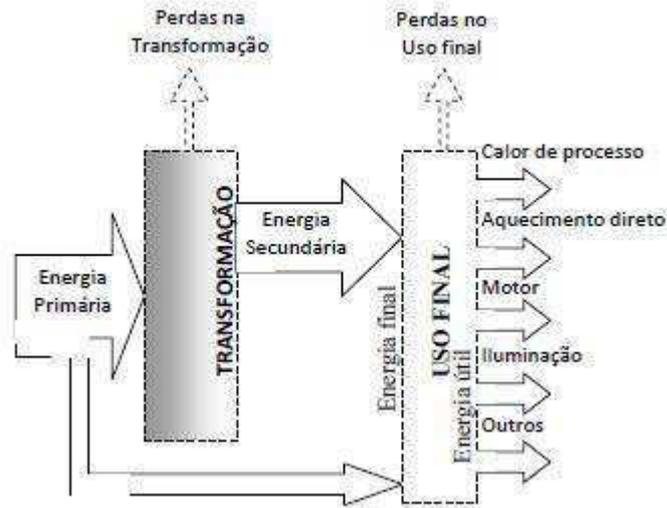
Figura 7. Exemplo de cadeia energética para o carvão mineral.



Fonte: O autor.

Na Figura 8 é apresentado um esquema sobre os processos de conversão de energia. Pode-se notar que a energia final inclui a energia primária de uso direto. Além de indicar as perdas existentes nos centros de transformação e no uso final. Em um esquema mais completo devem-se considerar ainda outros tipos de perdas, exportações e importações nas diversas etapas, bem como ajustes metodológicos ou de dados.

Figura 8. Representação esquemática dos fluxos de energia primária, secundária, final e útil.



Fonte: Abreu, Oliveira; Guerra (2010).

São exemplos de centros de transformação: as refinarias de petróleo, centrais elétricas e as destilarias de álcool. No Balanço de Energia Útil (FDTE, 2005) são classificados os usos finais em: calor de processo, aquecimento direto, força motriz, iluminação, eletroquímico e outros. Para cada uso final existem equipamentos específicos que transformam a energia primária ou secundária em energia útil, tais como: motores, fornos, caldeiras, lâmpadas, refrigeradores e muitos outros.

As transformações de energia primária para secundária e desta para útil, sempre implicam em perdas. Essas perdas podem ser calculadas por meio dos rendimentos das centrais de transformação e dos equipamentos de usos finais.

A seguir são apresentados os aspectos conceituais básicos das leis de conservação e dissipação, que estruturam todo o universo, desde o micro ao macrocosmo.

4.3 AS LEIS DAS CONVERSÕES ENERGÉTICAS

Quaisquer que sejam os sistemas considerados e as formas de energia envolvidas, todos os processos de conversão energética são regidos por duas leis físicas fundamentais, que constituem o arcabouço essencial da ciência energética (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2006).

Na História da Ciência frequentemente há destaques relativos ao caráter revolucionário destas formulações e à dificuldade de sua assimilação pelos estudiosos ao longo do tempo, como decorrência do impacto de seus conceitos. Estas relações físicas de enorme importância, que se sustentam apenas pela observação de processos reais desde o micro ao macrocosmo, são apresentadas a seguir.

O planejamento energético precisa atentar para esses conceitos, de forma sistêmica e integrada, para que possa tomar decisões técnicas adequadas para o desenvolvimento de programas de uso racional da energia (STRAPASSON, 2004).

4.3.1 LEI DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A primeira lei básica das conversões energéticas é a Lei da Conservação da Energia, que também conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica, segundo a qual energia não se cria nem se destrói, salvo nos casos em que ocorrem reações atômicas ou nucleares e então podem se observar transformações de massa em energia. Como na grande maioria das situações, tal dualidade massa-energia não precisa ser considerada, é suficiente afirmar que, em um dado período de tempo, a somatória dos fluxos e estoques energéticos em um processo ou sistema é constante, como se apresenta na expressão (4.1) (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2006).

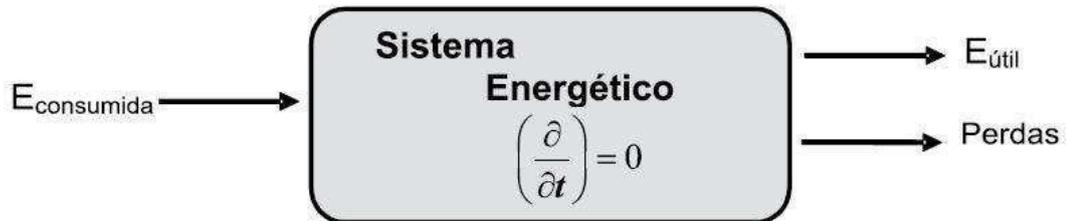
$$\Delta E_{entra} = \Delta E_{sai} + \Delta E_{sistemas}. \quad (4.1)$$

Por meio da expressão (4.1), pode-se afirmar que a energia total, que inclui todas as formas de energia, de um sistema isolado permanece constante, ou seja, a energia se conserva (BUCUSSI, 2006).

O conceito da Lei da Conservação de Energia permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas, quantificar enfim, fluxos energéticos. Baseia-se também nesta lei, o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema energético, $\eta_{energia}$, relacionando o efeito energético útil com o consumo energético no sistema, como se explicita na Figura 9 e na expressão (4.2), válida para um sistema em regime permanente, isto é, quando não há variação da energia no sistema (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010).

É importante salientar que, como energia nunca desaparece, mas apenas muda de forma, a palavra “consumo” refere-se efetivamente ao aporte de energia, isto é, trata-se da energia final, cuja definição é apresentada na seção 4.2 deste trabalho.

Figura 9. Sistema energético generalizado.



Fonte: Marques; Haddad; Martins (2006).

$$\eta_{energia} = \frac{E_{útil}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{consumida}}. \quad (4.2)$$

4.3.2 LEI DA DISSIPACÃO DE ENERGIA

Segundo Marques, Haddad e Martins (2006) a outra lei física básica dos processos energéticos é a Lei da Dissipação da Energia, também conhecida como sendo a Segunda Lei da Termodinâmica, segundo a qual, em todos os processos reais de conversão energética, sempre deve existir uma parcela de energia térmica como produto. Por exemplo, se o objetivo do processo é transformar energia mecânica em calor, tal conversão pode ser total, como ocorre nos freios; mas, se o propósito for o inverso, a conversão de energia térmica em energia mecânica será sempre parcial, pois uma parcela dos resultados deverá sempre ser calor.

Existem inevitáveis perdas térmicas nos processos de conversão energética, que se somam às outras perdas inevitáveis decorrentes das limitações tecnológicas e econômicas dos sistemas reais, tais como isolamento térmico imperfeito, atrito, perdas de carga e inércias, entre outras.

É interessante observar que uma importante consequência do Princípio da Conservação da Energia é que o fornecimento de calor ou a realização de trabalho modificam

de forma equivalente, em termos quantitativos, a energia de um sistema. Assim, o Primeiro Princípio não fornece uma distinção qualitativa entre calor e trabalho, ou entre outras formas de energia.

Contudo, de acordo com o Princípio da Dissipação de Energia, verifica-se que a energia perde a sua “qualidade” ao longo da cadeia energética, sendo esta “qualidade” explicitada pela capacidade de realizar trabalho. Desta forma, a quantidade total da energia em um sistema isolado permanece sempre constante, de acordo com o Princípio da Conservação, entretanto a quantidade de energia disponível pode diminuir (EPE, 2005).

4.4 RENDIMENTO DAS CONVERSÕES ENERGÉTICAS

A partir do estudo dos princípios de conservação e dissipação de energia é possível compreender que ao longo das possíveis conversões da energia, objetivando tanto o transporte quanto a utilização pelos usuários finais, parte da energia inicialmente disponível pode não ser mais aproveitada, sendo considerada como sendo perdas, conforme ilustrado na Figura 10.

O conceito de rendimento energético busca mensurar o quanto da energia ainda pode ser aproveitada após um processo de conversão e qual a parcela que se transforma em outra forma com menor possibilidade de utilização como, por exemplo, calor. Quanto maior o rendimento da conversão, menores as perdas existentes, sendo estas entendidas como refletindo a impossibilidade de utilização de uma parcela da energia inicial na entrada do processo de conversão (EPE, 2005).

Figura 10. Processo esquemático de conversão da energia.



Fonte: EPE (2005).

O rendimento de um processo de conversão de energia sempre será inferior ou, no máximo, igual a um. Quanto menos eficiente for o processo de conversão, menor será o rendimento e, conseqüentemente, menor será a parcela da energia que poderá ser aproveitada.

4.5 PERDAS E DESPÉRDÍCIOS

Perda é a parcela de energia que não tem como ser recuperada. Já o desperdício é a parcela possível de ser recuperada no sistema. As perdas podem ser reduzidas mediante o emprego de materiais e tecnologias que resultem no uso eficiente da energia. Os desperdícios estão relacionados às práticas perdulárias do uso dos recursos energéticos. Nas boas práticas da engenharia, as perdas podem ser reduzidas e os desperdícios devem ser eliminados.

O conceito de “uso eficiente da energia” engloba uma série de práticas e conhecimentos que visam minimizar as perdas na conversão e no uso da energia. Implica na busca dos mesmos padrões de conforto, da mesma quantidade de bens produzidos e da mesma qualidade nos serviços prestados, mas com um menor consumo de energia, via redução das perdas e eliminação dos desperdícios.

5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em uma visão física, o conceito de “eficiência energética” estaria limitado aos processos em que há conversão de energia e em que as formas inicial e final são visíveis ou perceptíveis nas suas diferentes formas.

A efficientização, em geral, consiste em: “redução de perdas e eliminação de desperdícios”. Para isso, devem ser empregadas práticas que otimizem o processo, produto ou ação. Dessa forma, consegue-se diminuir ao máximo suas perdas (ESTEVES; MOURA, 2010).

Segundo Martins (1999), pelo princípio da conservação de energia, a eficiência é a razão entre a energia que sai do processo e a energia que entra nele. Já pelo princípio da dissipação de energia o quadro é diferente e a eficiência pode ser definida como a razão entre a energia mínima teoricamente necessária para a realização de um processo e a energia efetivamente usada no processo.

No conceito utilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (2010), a eficiência energética é apresentada como uma relação direta entre a quantidade de energia final utilizada e de um bem produzido ou serviço realizado. Dentro dessa conceituação, eficiência está associada à quantidade efetiva de energia utilizada e não à quantidade mínima teoricamente necessária para realizar um serviço. Além disso, observe-se que este conceito pode ser aplicado tanto à manufatura, em que há um bem físico cujo conteúdo energético pode ser delimitado, quanto para serviços, em que o conteúdo energético não é por vezes tão claramente definido, embora, neste caso, seja mais pertinente considerar a energia requerida para prestação do serviço.

É importante salientar que expressões como “conservação de energia” e “energia conservada”, utilizadas amplamente por alguns autores, em geral, para indicar o processo (conservação) ou resultados de redução no consumo final de energia, são expressões tautológicas e, por isso, devem ser evitadas.

Ações de efficientização energética tomaram foco no Mundo, no Brasil e em todos os seus estados. No Brasil, a otimização dos recursos energéticos apresenta-se como uma alternativa com potencial de promover crescimento econômico, o aumento da produtividade, a

redução dos elevados investimentos na infraestrutura, e ainda a diminuição dos impactos ambientais associados ao crescimento, sendo, portanto, parte essencial no processo de desenvolvimento sustentável (EPE, 2005).

A eficiência no uso da energia entrou na agenda mundial a partir dos choques no preço do petróleo ocorridos em 1973 e 1976, quando ficou claro que o uso das reservas de recursos fósseis teria custos crescentes, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista ambiental. Logo se reconheceu que um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia e, conseqüentemente com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais. Equipamentos e hábitos de consumo passaram a ser analisados em termos da conservação da energia tendo sido demonstrado que, de fato, muitas iniciativas que resultam em maior eficiência energética são economicamente viáveis, ou seja, o custo de sua implantação é menor do que o custo de produzir ou adquirir a energia cujo consumo é evitado (EPE, 2014).

Mais recentemente, por razões econômicas e ambientais, a busca pela eficiência energética ganhou nova motivação. Em adição à perspectiva de custos mais elevados da energia de origem fóssil, a preocupação com a questão das mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global do planeta, aquecimento este atribuído, em grande medida, à produção e ao consumo de energia, trouxe argumentos novos e definitivos que justificam destacar a eficiência energética quando se analisa em perspectiva a oferta e o consumo de energia. Essa preocupação se justifica mesmo em um país como o Brasil, que apresenta uma matriz energética em que quase metade está associada a energias renováveis. Cabe destacar que, em estudo recente publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2013), estima-se que a eficiência energética pode contribuir com quase 50% da mitigação de emissão de gases de efeito estufa. Os benefícios que geralmente são percebidos com a prática de efficientização estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Benefícios das práticas de eficiência no mundo.

Local	Resultados
Na Sociedade	<ul style="list-style-type: none"> • Mais benefícios para a população, pois haverá maior disponibilidade de energia; • O Estado evitará o desperdício de energia e, dessa forma, obterá mais recursos para investir em outras áreas.
No Meio Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos impactos ambientais, entre os quais: queima de combustíveis fósseis, emissão de CO₂ (dióxido de carbônico), compostos nitrogenados e enxofre, chuvas ácidas, efeito estufa, alagamentos, desmatamentos, radiação nuclear.
Nas Empresas Estatais e Privadas	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento no suprimento de energia para atender necessidades futuras das empresas, sejam elas particulares ou estatais; • Impactos de marketing junto ao mercado e aos clientes, decorrentes da melhoria da imagem; • Redução das despesas diretas referentes ao consumo ineficiente de energia; • Incremento da motivação e participação dos colaboradores devido à melhoria do ambiente, com adequação de instalações e equipamentos aos novos processos de trabalho.
No Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Menos investimentos em usinas hidrelétricas e termelétricas, contribuindo para o menor endividamento e ganho de competitividade; • Atração de novos investimentos e geração de emprego e renda; • Garantia do suprimento de energia elétrica.

Fonte: Soares (2011).

A vantagem mais convincente da eficiência energética é a de que ela é quase sempre mais barata que a produção de energia, ou seja, em muitas aplicações, o custo da eficiência energética corresponde a apenas uma pequena parcela dos custos da produção de energia (MARTINS, 1999).

Apesar de os grandes benefícios que as medidas de eficiência energética podem trazer à sociedade como um todo, muitas barreiras impedem a sua disseminação: dificuldades para financiamento, percepção dos riscos envolvidos, falta de informação, conscientização, treinamento, conhecimento das regras de um contrato de performance, acesso às tecnologias e equipamentos de uso eficiente da energia, altos custos de transação, falta de confiança no resultado das medidas, entre outras (MME, 2007).

Essas barreiras sugerem a necessidade da existência de políticas de governo capazes de regulamentar o mercado de eficiência energética; induzir o desenvolvimento tecnológico; efetuar demonstrações da tecnologia de eficiência energética e suas aplicações; induzir a transformação do mercado de produtos eletroeletrônicos; adotar padrões de eficiência energética para produtos eletroeletrônicos e instalações elétricas em construções civis e unidades fabris; estimular a implantação de programas de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD); formar uma cultura nacional de eficiência energética; implementar programas educativos de eficiência energética; divulgar os resultados obtidos com ações de eficiência energética.

5.1 OS PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

No Brasil, diversas iniciativas sistematizadas vêm sendo empreendidas há mais de 20 anos. Dentre elas, destacam-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), cuja coordenação executiva está a cargo da ELETROBRAS (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.), e o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), cuja coordenação executiva é de responsabilidade da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), o Programa de apoio a Projetos de Eficiência Energética (PROESCO), cuja coordenação executiva pertence ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). O

PBE é vinculado ao ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior (MDIC). O PROCEL e o CONPET são vinculados ao Ministério de Minas e Energia (MME).

O foco inicial do PROCEL estava voltado ao combate ao desperdício de eletricidade, tanto na produção, quanto no uso da energia elétrica. Na década de 90 o PROCEL teve o seu escopo ampliado, tornando-se um programa de governo e não mais setorial. O financiamento dos projetos também conta com recursos do BNDES e da própria Eletrobrás (PROCEL, 2014). As principais linhas de ação do programa são (ANEEL e ANP, 1999):

- Eliminação de desperdícios, através de orientação, assistência técnica, conscientização e orientação em curto prazo;
- Aumento da eficiência energética de equipamentos, sistemas e processos produtivos, com impactos em curto, médio e longo prazos, por meio de desenvolvimento tecnológico, certificação de qualidade e normalização;
- Cultura de racionalização energética em longo prazo, através de programas de educação, política de preços, financiamento e legislação.

Conforme o Decreto Presidencial de 16 de julho de 1991, que institui o CONPET, o programa tem por finalidade desenvolver e integrar as ações que visem a racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural, em consonância com as diretrizes do Programa Nacional de Racionalização da Produção e do Uso da Energia, instituído pelo Decreto nº 99.250, de 11 de maio de 1990 (CONPET, 2014). O programa possui quatro diretrizes básicas (ANEEL e ANP, 1999):

- Promoção e difusão: realização de campanhas, eventos, premiações, difusão de tecnologias e métodos, elaboração de relatórios;
- Racionalização energética: revisão de normas técnicas para equipamentos, sistemas e métodos; difusão de conceitos de conservação; treinamento de pessoal; estratégias para investimentos; adequação de legislações setoriais; aumentar a sintonia entre o programa e as políticas industrial, educacional, tecnológica, de transporte e meio ambiente, desenvolvimento de mecanismos que desestimulem ações contrárias às do programa;
- Aumento da eficiência energética em equipamentos e sistemas: articulação com outros programas de eficiência energética; fomento à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico; padronização, certificação e normalização; apoio às outras ações de racionalização energética; proposição de mecanismos

voltados à comercialização de bens e serviços que contribuam à conservação da energia; e

- Regionalização: apoio aos projetos e soluções regionais, bem como, à elaboração de estudos voltados ao aproveitamento de insumos energéticos locais.

Além destes, a Lei nº 10.295/2001 determina a instituição de “níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados e comercializados no país” e o Decreto nº 4.059/2001 regulamenta a mesma. Neste âmbito, mais recentemente, foi instituída a política de banimento gradativo das lâmpadas incandescentes por faixa de potência através da Portaria Interministerial MME/MCTI e MDIC, nº 1.007/2010. Além dessas ações citadas, em nível federal outras ações com impacto direto ou indireto sobre a eficiência energética podem ser elencadas. Cabe destacar também a existência de programas locais e iniciativas voluntárias de agentes de mercado, igualmente importantes para a apropriação de ganhos de eficiência energética na economia.

5.2 A EFICIÊNCIA LUMINOSA

Os sistemas de iluminação por representarem parcela significativa nos custos com energia elétrica em diversos segmentos da economia, especialmente os setores comercial, residencial e órgãos públicos, devem ser foco de atenção nas análises relativas à otimização no uso da energia (ARAÚJO *et al.*, 2013).

A eficiência luminosa, unidade lúmen por watt (lm/W), é a relação entre o fluxo luminoso emitido e a energia elétrica consumida (potência). A eficiência luminosa é útil para averiguar se um determinado tipo de lâmpada é mais ou menos eficiente do que outro (SOUSA, 2011). Pois, quanto mais lúmens produzidos para cada watt consumido, mais eficiente é a lâmpada.

A iluminação é uma das principais áreas onde se deve buscar a diminuição do consumo de energia, principalmente nas aplicações residenciais e comerciais. Desta forma o emprego das lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*) pode contribuir significativamente para a eficiência energética (BLEY, 2012). A sigla LED, em português, significa Diodo Emissor de

Luz. Os diodos emissores de luz são componentes eletrônicos que, por meio da eletroluminescência, transformam energia elétrica em radiação visível (luz).

Presente há mais de dez anos no mercado consumidor, os LEDs tem, a cada dia, conquistado seu espaço. Com a missão de iluminar com eficiência, economia e sustentabilidade, e a cada ano vem reduzindo seus custos e proporcionando iluminação de qualidade. Esse dispositivo, quando comparado aos sistemas de iluminação convencionais, possui ainda um alto custo para aquisição. Porém, dependendo do projeto onde o mesmo será empregado ou substituído, as lâmpadas LED oferecem iluminação de melhor qualidade, com um reduzido consumo de energia, maior vida útil e um retorno garantido no investimento inicial, visto que, além de outras vantagens, necessita de baixa manutenção(Wanderley, 2014).

Em um estudo comparativo dos LEDs em relação às lâmpadas convencionais (incandescentes, halógenas e fluorescentes etc) realizado por Bley (2012), ficou comprovado que o investimento feito na aquisição de lâmpadas de LED é viável em aplicações onde o uso da iluminação é intenso, como em ambientes comerciais. Isto se deve à eficiência energética e durabilidade dos LEDs. Desta forma é possível ter o retorno do investimento em curto prazo, sobretudo nos dias atuais, quando o preço da energia elétrica está em alta.

6 ENERGIA COMO FUNÇÃO DE ESTADO

As equações de estado descrevem uma relação de dependência entre o menor conjunto de variáveis de estado que são necessárias para descrever todo o comportamento de um sistema dinâmico. Se pelo menos n variáveis x_1, x_2, \dots, x_n são necessárias para determinar o estado de um sistema dinâmico, então essas n variáveis formam um conjunto de variáveis de estado (OGATA, 2003).

Supondo um sistema dinâmico contendo r entradas u_1, u_2, \dots, u_r . Este sistema pode ser descrito pelas equações de estado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\
 \dot{x}_2(t) &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

a equação (6.1) torna-se:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t). \tag{6.2}$$

Para sistemas lineares, invariantes com o tempo, as equações de estado são apresentadas como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \tag{6.3}$$

em que \mathbf{A} é a chamada matriz de estado, \mathbf{x} , vetor das variáveis de estado, \mathbf{B} , matriz de entrada, e \mathbf{u} é o vetor das variáveis de entrada.

6.1 INDUTOR

O estado de excitação em que se encontra o indutor é determinado pelas variáveis de estado e o conjunto das variáveis de estado ou coordenadas do sistema especificam completamente o estado do sistema. De um modo geral, a cada estado do dispositivo corresponde um único valor de suas variáveis de estado, não importando a maneira como o sistema atingiu aquele ponto. Inversamente, a cada conjunto de valores de suas variáveis de estado corresponde um único estado.

O estado de excitação magnética do núcleo de um determinado indutor é caracterizado pelo fluxo ϕ , o qual é, pois uma variável de estado, porém não é acessível aos terminais do indutor. Portanto, utiliza-se o fluxo concatenado $\lambda = n \cdot \phi$ como variável de estado.

Uma corrente elétrica i ao circular pelo enrolamento de um indutor constituído de n espiras, estabelece um fluxo magnético λ concatenado ou fluxo de enlace. Logo, a corrente i é outra variável de estado. Denomina-se *característica do indutor* a relação funcional estabelecida entre as duas variáveis de estado λ e i . O fenômeno de histerese magnética implica em uma relação não-unívoca entre as variáveis de estado. Analiticamente a característica do indutor é (BOFFI; SOBRAL Jr.; DANGELO, 1977):

$$\lambda = \lambda(i); \quad (6.4)$$

$$i = i(\lambda). \quad (6.5)$$

6.1.1 ENERGIA MAGNÉTICA ARMAZENADA

Supondo que o indutor esteja em estado não-excitado, para o qual seja, por definição, $\lambda = 0$ e $i = 0$, para que ele seja levado a um novo estado (λ, i) é necessário que os seus terminais sejam submetidos a uma fonte de tensão v ou de corrente i .

Aplicando-se a Lei das malhas ao circuito constituído pelo enrolamento de resistência elétrica R , tem-se:

$$v(t) = Ri(t) + \frac{d\lambda(t)}{dt}. \quad (6.6)$$

Multiplicando-se a expressão (6.6) por idt tem-se como resultado:

$$vi \cdot dt = Ri^2 \cdot dt + id\lambda. \quad (6.7)$$

Na qual, $vi = p$ é a potência fornecida e $vidt$ é a energia entregue pela fonte ao circuito durante o intervalo dt . A parcela $Ri^2 \cdot dt$ representa a perda joule na bobina, isto é, perda irreversível de calor, e é sempre uma quantidade positiva. Pode-se, então, considerar que a energia líquida entregue pela fonte é dada por:

$$vi \cdot dt - Ri^2 = id\lambda. \quad (6.8)$$

Denomina-se essa energia entregue ao indutor dW_m como incremento de energia magnética:

$$dW_m = id\lambda. \quad (6.9)$$

Se o indutor evoluir de um estado 1 para um estado 2, segue-se que a energia entregue ao indutor será:

$$(\Delta W_m)_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 dW_m = \int_1^2 id\lambda. \quad (6.10)$$

Por meio do princípio de conservação de energia, pode-se dizer que $(\Delta W_m)_{1 \rightarrow 2}$ foi “armazenada” no indutor, pois pode ser extraída posteriormente, sem perdas.

Por convenção, admite-se que a energia armazenada no indutor, no estado não excitado, com $\lambda = i = 0$, é nula. Daí,

$$W_m = \int_1^2 i(\lambda') \cdot d\lambda' = W_m(\lambda). \quad (6.11)$$

Observa-se, portanto, que W_m é uma função do limite superior da integral em λ , e é, conseqüentemente, *função de estado* que, neste caso, é caracterizado por λ .

Nota-se a relação importante:

$$i(\lambda) = \frac{dW_m(\lambda)}{d\lambda}, \quad (6.12)$$

na qual, percebe-se que o conhecimento da energia magnética armazenada, como função de λ , permite determinar a característica do indutor $i = i(\lambda)$.

6.2 CAPACITOR

A carga elétrica q e a tensão nos terminais do capacitor v são as variáveis de estado que caracterizam a condição física em que se encontra esse dispositivo. A característica do capacitor é dada por (BOFFI; SOBRAL Jr.; DANGELO, 1977):

$$v = v(q); \quad (6.13)$$

$$q = q(v). \quad (6.14)$$

O capacitor caracteriza-se pela relação funcional ligando suas variáveis de estado q e v .

6.2.1 ENERGIA ELÉTRICA ARMAZENADA

Energia elétrica armazenada é a energia necessária para conduzir o capacitor desde um estado não excitado, para o qual $q = 0$, até um estado qualquer arbitrário definido por certo valor de q . Considerações sobre conservação de energia armazenada no campo elétrico é recuperada ao se trazer o capacitor para o estado primitivo de não excitação.

O incremento de energia elétrica para levar o capacitor a um estado excitado será:

$$dW_e = p \cdot dt = v \cdot i \cdot dt = v \cdot \frac{dq}{dt} \cdot dt = v(t) dq(t);$$

$$W_e = \int_0^{t_1} v(t) \cdot dq(t) = \int_0^q v(q') \cdot dq'$$

$$W_e = W_e(q) \tag{6.15}$$

e, portanto a energia elétrica armazenada é *função de estado* e para o cálculo é necessário conhecer $v = v(q)$. Ainda,

$$v = \frac{dW_e}{dq}. \tag{6.16}$$

6.2.2 COENERGIA ELÉTRICA

A coenergia é uma função de estado associada à energia elétrica armazenada. Essa função coenergia é conveniente sempre que o estado for caracterizado pela tensão v . Como:

$$dW_e = v dq = d(vq) - q dv,$$

a variação de coenergia elétrica dW_e' é definida como segue:

$$dW_e' = d(vq - W_e) = q dv,$$

e daí,

$$dW_e' = \int_0^v q(v') \cdot dv' = W_e'(v). \quad (6.17)$$

Além disso, segue-se que:

$$W_e + W_e' = qv, \quad (6.18)$$

e

$$q = \frac{dW_e'}{dv}. \quad (6.19)$$

Ainda aqui, a coenergia elétrica é *função de estado* e para o seu cálculo, deve-se conhecer $q = q(v)$.

6.3 TERMODINÂMICA

O estudo da Termodinâmica no contexto da engenharia elétrica é importante porque ele serve de base para a compreensão dos princípios das máquinas térmicas utilizadas em termelétricas ou em sistemas de cogeração, que é a produção combinada de calor e energia eletromecânica, associada a algum processo.

O Estado Termodinâmico é definido pelas variáveis de estado do sistema. Essas variáveis podem ser pressão (P), temperatura (T), volume (V) e diversas outras grandezas que são características do sistema estudado. As transformações Termodinâmicas levam o sistema de um estado termodinâmico a outro.

Não é necessário saber todas as variáveis de estado para definir o estado termodinâmico de um sistema. Por exemplo, comprova-se experimentalmente que o estado termodinâmico de um gás é definido, em muito boa aproximação, apenas por meio das variáveis de estado massa (m), volume (V) e pressão (P). Conforme afirmado, existem

relações de dependência entre as variáveis de estado. Para cada valor de m , V e P há somente um valor para cada uma das outras variáveis de estado.

Sabe-se que as relações matemáticas entre as variáveis de estado são chamadas de equações de estado. Em 1834, Émile Clapeyron (1799 – 1864), com base nas leis experimentais dos gases de Boyle, Charles e Guy Lussac, propôs um modelo teórico de gás ideal que obedece à equação de estado descrita pela expressão (6.20).

$$P.V = n.R.T, \quad (6.20)$$

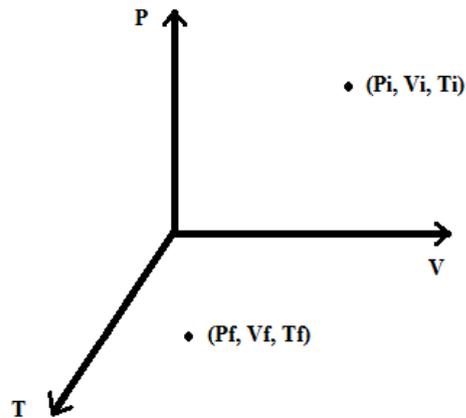
na qual n é o número de mols do gás (que é proporcional a sua massa) e R é a constante universal dos gases sendo igual a aproximadamente 8,31 J/mol.K.

É importante notar que os valores das variáveis de estado de um gás independem das transformações que o levaram aquele estado. Isto é, as variações de energia independem do caminho utilizado.

6.3.1 LEI GERAL DOS GASES PERFEITOS

Por meio da equação de estado proposta por Clapeyron (6.20) é possível obter uma lei que relaciona dois estados diferentes de uma transformação gasosa, desde que não haja variação na massa do gás. A transformação mais geral que uma amostra de gás ideal pode experimentar, sem variação na quantidade de substância, ou seja, com o número de mols constante, é aquela em que passa de um estado caracterizado por (P_i, V_i, T_i) para o estado caracterizado por (P_f, V_f, T_f) .

Figura 11. Estado inicial (p_i, v_i, t_i) e estado final (p_f, v_f, t_f).



Fonte: O autor

Substituindo as variáveis de estado das condições iniciais do sistema na equação (6.20), obtém-se:

$$P_i \cdot V_i = n \cdot R \cdot T_i,$$

$$\frac{P_i \cdot V_i}{T_i} = n \cdot R. \quad (6.21)$$

Substituindo as variáveis de estado das condições finais do sistema na equação (6.20), obtém-se:

$$P_f \cdot V_f = n \cdot R \cdot T_f,$$

$$\frac{P_f \cdot V_f}{T_f} = n \cdot R. \quad (6.22)$$

Considerando que não há variação de massa e conseqüentemente de mols, a equação de estado proposta por Clapeyron permite escrever a equação (6.23) que é chamada Lei Geral dos Gases Perfeitos.

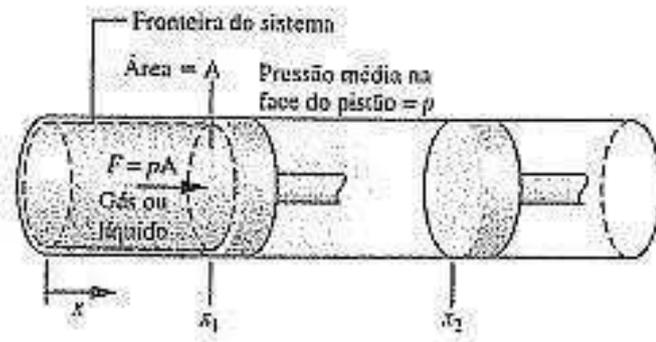
$$\frac{P_i \cdot V_i}{T_i} = \frac{P_f \cdot V_f}{T_f} \quad (6.23)$$

6.3.2 TRABALHO REALIZADO POR UM GÁS

Há várias maneiras pelas quais um trabalho pode ser realizado por ou sobre um sistema. Considerando como exemplo um importante caso de trabalho realizado quando ocorre a variação de volume de certa quantidade de um gás devido a uma expansão ou compressão.

A seguir, será abordada a avaliação do trabalho realizado pelo sistema fechado ilustrado na Figura 14, que consiste em um gás contido em um conjunto cilindro- pistão à medida que o gás se expande.

Figura 12. Expansão ou compressão de um gás.



Fonte: Moran; Shapiro(2002).

Durante o processo, a pressão do gás exerce uma força normal sobre o pistão. Considerando P a pressão atuando na interface entre o gás e o pistão. A força exercida pelo o gás sobre o pistão é simplesmente o produto $P.A$, onde A é a área da face do pistão. O trabalho realizado pelo sistema à medida que o pistão é deslocado de uma distância dx é:

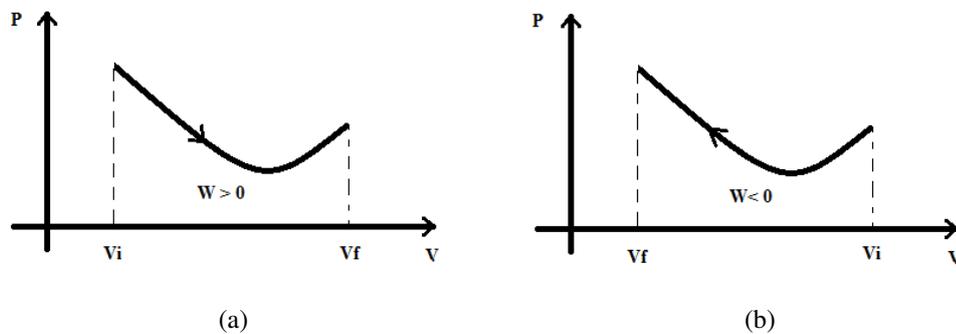
$$dW = P \cdot A \cdot dx. \quad (6.24)$$

O produto Adx na expressão (6.24) é igual à variação de volume do sistema dV . Assim, a expressão para o trabalho pode ser escrita como:

$$dW = P \cdot dV. \quad (6.25)$$

Como dV é positivo quando o volume aumenta, o trabalho na fronteira móvel é positivo quando o gás se expande. Para uma compressão dV é negativo, assim como o trabalho calculado pela equação (6.25). Isso pode ser observado nos gráficos da Figura 15.

Figura 13. (a) Trabalho com sinal positivo quando há expansão. (b) Trabalho com sinal negativo quando há compressão.



Fonte: O autor.

Para variação de volume V_i até V_f , o trabalho é obtido através da integração da equação (6.25).

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P \cdot dV. \quad (6.26)$$

6.3.3 TRANSFORMAÇÕES ISOBÁRICAS, ISOTÉRMICAS, ISOCÓRICA E ADIABÁTICAS

Sabe-se que o estado macroscópico de um sistema termodinâmico simples fechado pode ser definido pelas variáveis T , P e V . A cada duas destas variáveis geram uma função de estado deste sistema. Por exemplo, Poisson, estabeleceu uma relação entre P e V numa expansão adiabática de gases e Clapeyron determinou a variação de P e T durante uma

expansão isocórica. Do mesmo modo, outras propriedades do sistema podem ser determinadas definindo-se funções de estado passíveis de serem tratadas matematicamente (PÁDUA, 2008).

Durante uma transformação, o sistema pode trocar energia com o meio ambiente sob duas formas: calor (Q) e trabalho (W). Como resultado dessas trocas energéticas, a energia interna (ΔU) do gás pode aumentar, diminuir ou permanecer constante.

A primeira Lei da Termodinâmica vai relacionar as energias (calor $\Delta Q_{i \rightarrow f}$, trabalho $\Delta W_{i \rightarrow f}$, e energia interna $\Delta U_{i \rightarrow f}$) envolvidas na mudança do estado inicial i (cujas variáveis de estado são a pressão P_i , o volume V_i e a temperatura T_i) para o estado final f (cujas variáveis de estado são a pressão P_f , o volume V_f e a temperatura T_f) desse gás pela relação (6.27).

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = \Delta Q_{i \rightarrow f} - \Delta W_{i \rightarrow f}. \quad (6.27)$$

Um resumo dos vários tipos de processos entre os estados inicial e final do gás nas diferentes etapas do funcionamento dos motores estão indicado na Tabela 2.

Onde, C_V e C_P são as capacidades caloríficas a volume e pressão constante, respectivamente e γ é o coeficiente de Poisson.

Para explicar o funcionamento de uma máquina térmica, utiliza-se, como base, o ciclo termodinâmico de um gás ideal. No processo termodinâmico do gás ocorre uma série de processos nos quais o sistema é levado ao seu estado inicial, ou seja, um ciclo.

Tabela 2. Processos que ocorrem nas máquinas térmicas em geral: características principais.

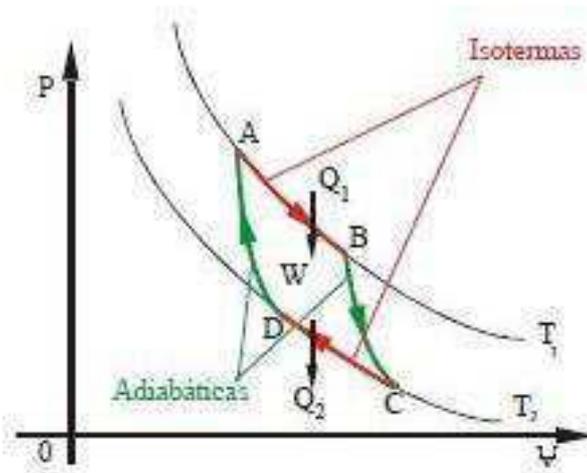
Processo Estado $i \rightarrow f$ Diagrama P-V	$\Delta W_{i \rightarrow f} = \int_{V_i}^{V_f} PdV$	$\Delta U_{i \rightarrow f}$	$\Delta Q_{i \rightarrow f}$ $\Delta Q_{i \rightarrow f} = \Delta W_{i \rightarrow f} + \Delta U_{i \rightarrow f}$ Lei da Termodinâmica	Equação de Estado e relações
<p>Isotérmico a temperatura $T_i = T_f$</p>	$n \cdot R \cdot T \cdot \ln \left[\frac{V_f}{V_i} \right]$	0	$n \cdot R \cdot T \cdot \ln \left[\frac{V_f}{V_i} \right]$	$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ $P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$ $\frac{P_i \cdot V_i}{T_i} = \frac{P_f \cdot V_f}{T_f}$
<p>Adiabático</p>	$\Delta W_{i \rightarrow f} = \frac{P_i \cdot V_i - P_f \cdot V_f}{1 - \gamma}$ Ou $\Delta W_{i \rightarrow f} = \frac{n \cdot R}{1 - \gamma} (T_f - T_i)$ ou $\Delta W_{i \rightarrow f} = C_v \cdot (T_i - T_f)$	$-\Delta W$ Ou $C_v \cdot (T_f - T_i)$	0	$P \cdot V^\gamma = k$ $T \cdot V^{\gamma-1} = k'$ ou $P_i \cdot V_i^\gamma = P_f \cdot V_f^\gamma$ $T_i \cdot V_i^{\gamma-1} = T_f \cdot V_f^{\gamma-1}$
<p>Isocórico ou isovolumétrico</p>	0	$C_v \cdot (T_f - T_i)$	$C_v \cdot (T_f - T_i)$	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ $C_p = C_v + n \cdot R$ $C_v = \frac{n \cdot R}{\gamma - 1}$ $C_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} n \cdot R$ $C_p = C_v + R$
<p>Isobárico</p>	$\Delta W_{i \rightarrow f} = P \cdot (V_f - V_i)$ ou $\Delta W_{i \rightarrow f} = n \cdot R \cdot (T_f - T_i)$	$C_v \cdot (T_f - T_i)$	$C_p \cdot (T_f - T_i)$	$C_p = \frac{C_v}{\gamma - 1} = \frac{R}{\gamma - 1}$ $C_p = \frac{C_v}{\gamma - 1} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R$ $R = 8,31 \frac{J}{mol \cdot K}$ $R = 0,082 \frac{atm \cdot l}{mol \cdot K}$ $1atm = 1,013 \cdot 10^5 Pa$ $1m^3 = 10^3 l$
1 → ... → l: (Ciclo)	A	0	A	limite: l = 101,3J

Fonte: Stofori; Faria (2010).

6.3.4 CICLO DE CARNOT

Carnot demonstrou que o maior rendimento possível para uma máquina térmica entre duas temperaturas T_1 (fonte quente) e T_2 (fonte fria) seria o de uma máquina que realizasse um ciclo teórico, constituído de duas transformações isotérmicas e duas transformações adiabáticas alternadas. Esse ciclo, conhecido como ciclo de Carnot, está esquematizado na Figura 13. AB é uma expansão isotérmica, BC é uma expansão adiabática, CD é uma compressão isotérmica e DA é uma compressão adiabática.

Figura 14. Ciclo de Carnot.



Fonte: O autor.

Baseados no Ciclo de Carnot, vários ciclos termodinâmicos foram desenvolvidos e, a partir deles, foram desenvolvidas várias máquinas térmicas. Segue-se, uma lista dos principais ciclos utilizados desde então:

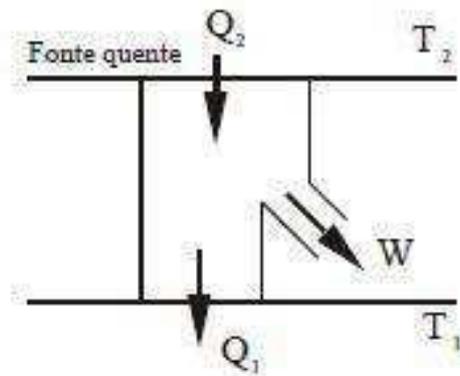
- Ciclo Otto (motor a gasolina);
- Ciclo Diesel (motor a diesel);
- Ciclo Stirling;
- Ciclo Brayton (motor de jatos);
- Ciclo Hampson-Linde
- Ciclo Bell Coleman;
- Ciclo Rankine;
- Ciclo Scuderi;
- Ciclo Stoddard;
- Ciclo Lenoir (jatos de pulso);
- Ciclo Ericsson;
- Ciclo Kalina;
- Ciclo Regenerativo;
- Ciclo Vuilleumier;
- Ciclo Atkinson;

- Ciclo Miller;
- Ciclo Combinado; e
- Ciclo Sabathé (ciclo misto).

6.3.5 MÁQUINAS TÉRMICAS

Uma máquina térmica é um dispositivo capaz de operar ciclicamente a fim de converter a maior quantidade possível do calor que recebe em trabalho. Assim, as máquinas térmicas contêm um fluido operante ou substância de trabalho, que pode ser vapor de água numa máquina a vapor ou a mistura de ar e vapor de gasolina num motor de combustão interna, por exemplo. Para que um motor realize trabalho de forma sustentada, este fluido operante deve trabalhar em um ciclo, passando por uma série fechada de processos termodinâmicos, chamados de tempos, onde irá absorver certa quantidade de calor (Q_1), realizar o trabalho (W) e ceder uma quantidade de calor (Q_2), voltando repetidamente ao seu estado inicial, reiniciando o ciclo.

Figura 15. Esquema fundamental de uma máquina térmica.



.Fonte: O autor.

A Figura 12 mostra o esquema fundamental de uma máquina térmica: um reservatório quente fornece calor à máquina (T_1) e o calor “rejeitado” pelo sistema é recebido por um reservatório frio (T_2) com a temperatura mais baixa que T_1 .

Cada processo pode envolver um fluxo de calor para o sistema, ou do sistema e o desempenho de trabalho sobre ele. Se $Q_1 > Q_2$ e se W é realizado pelo sistema, então o dispositivo mecânico que obriga o sistema a percorrer o ciclo denomina-se Máquina Térmica,

tendo como propósito fornecer trabalho continuamente ao meio exterior (realizando o ciclo repetidas vezes).

O trabalho líquido do ciclo é a potência efetiva e o calor absorvido pela substância de trabalho é a energia absorvida. A eficiência térmica ou rendimento térmico do motor é definido por:

$$\eta = \frac{|W|_{saída}}{|Q_2|_{entrada}} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (6.28)$$

7 CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, o maior desafio foi apresentar o tema Energia como função de estado no contexto da eficiência energética, de forma sistêmica, numa perspectiva multidisciplinar, pois nele estão envolvidos, dentre outros, aspectos matemáticos, físicos, químicos, tecnológicos.

Para tanto realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o tema energia, de uma forma geral, levando-se em consideração as suas diferentes formas, fontes, processos de conversão tendo como foco principal apontar a energia como sendo uma função de estado destacando a sua importância no contexto da eficiência energética.

Através dos exemplos de aplicações das equações de estado presentes neste trabalho, percebeu-se a importância da análise da energia como função de estado em dispositivos de armazenamento e transferência de energia, como indutores e capacitores, bem como em sistemas termodinâmicos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, S. M. *Energia Sociedade e Meio Ambiente*. Palmas, TO – Brasil, 2010.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica e ANP – Agência Nacional do Petróleo. *Eficiência Energética: Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios*. Brasília, DF - Brasil: ANEEL/ANP, 1999.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília, DF - Brasil: ANEEL, 2002.
- ARAUJO, R. M. et al. *Análise Comparativa de Sistemas de Iluminação – Viabilidade Econômica da Aplicação de LED*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33, Salvador, BA – Brasil, 2013.
- BLEY, F. B. *LEDs versus Lâmpadas Convencionais: Viabilizando a troca*. *Revista Especialize On-line IPOG*, Goiânia, GO – Brasil, maio de 2012.
- BOFFI, L. V., SOBRAL Jr., M. e DANGELO, J. C.. *Conversão eletromecânica de energia*. São Paulo: Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.
- BUCUSSI, A. A. *Introdução ao conceito de energia*. Porto Alegre, RS - Brasil: UFRGS; Instituto de Física; Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2007.
- CEDIGAZ Statistics. Disponível em: <www.cedigaz.org/> Acesso em Janeiro de 2015.
- CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural. Disponível em: <http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/pagina-inicial.shtml>. Petrobrás, 2015.
- DA SILVA, E. P. et al. *Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento*. [S.l.:s.n], 2003.
- ELETROBRÁS- Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMIS293E16C4PTBRIE.htm>> Acesso em Janeiro de 2015.

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Aspectos Fundamentais de Planejamento Energético*. Rio de Janeiro, RJ – Brasil: EPE, 2005.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Demanda de Energia 2050* Rio de Janeiro, RJ – Brasil: EPE, 2014.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Eficiência Energética na Indústria e nas Residências*. Rio de Janeiro, RJ – Brasil: EPE, 2010.
- ESTEVES, E. F.; MOURA, L. S. Avaliação de Desperdícios e Perdas de Matéria-Prima no Processo Produtivo de uma Fábrica de Bebidas. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. Resende, VII, n. 7, 2010.
- FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. *Balanco de Energia Útil 2005*. Brasília, DF – Brasil: MME, 2005.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas*. 6. ed. Porto Alegre, RS - Brasil: Bookman, 2006.
- GOLÇALVES, O. D.; ALMEIDA, I. P. S. Física: A Energia Nuclear. *Ciência Hoje*, Rio de Janeiro, RJ - Brasil, v. 37, n. 220, p. 36-44, 2005.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, São Paulo, SP - Brasil, n.72, p. 6-15, dezembro/fevereiro 2006-2007.
- GOMES NETO, E. H. *Hidrogênio, Evoluir sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustíveis*. Curitiba: BRASIL H2 FUEL CELL ENERGY, 2005.
- GOMES, A. C. O. *Estudo da Utilização do Gás Natural como Fonte Geradora de Energia no Brasil*. Monografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – Brasil, 2006.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de Física*. 8. ed., v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- IEA - International Energy Agency. *Energy Efficiency Market Report 2013: Market Trends and Medium-Term Prospects*. Paris. 2013.
- LUCIANO, B. A. *Energia e o Meio Ambiente*. Suas Notícias, Porto Velho – RO, 21 de dezembro de 2014.

- MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações*. Itajubá: FUPAI, 2006.
- MARQUES, S. *Energias Fósseis versus Energias Renováveis*. Dissertação (Mestrado). Universidade do Milho, Braga, RS – Brasil, 2007.
- MARTINS, M. P. S. *Inovação Tecnológica e Eficiência Energética*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 1999.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>> Acesso em Janeiro de 2015.
- MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013*. Rio de Janeiro: MME, 2014.
- MME - Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília, DF - Brasil: EPE: MME, 2007.
- MORAN, M. J. e SHAPIRO, H. N. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- MOREIRA, M. A. *Energia, entropia e irreversibilidade*. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS, 1998.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- OLIVEIRA, R. J.; SANTOS, J. M. *A Energia e a Química*. Conceitos Científicos em Destaque, n. 8, p. 19-22, 1998.
- ORTEGA, L. L. M. *Conversão Fotovoltaica: Comparação de Modelos de Desempenho*. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- PÁDUA, A. B. de et al. *Termodinâmica clássica ou termodinâmica do equilíbrio: aspectos conceituais básicos*. In anais: Seminário Ciências Exatas e da Terra, Londrina, PR, v. 29, n. 1, p. 57-84, 2008.
- PIVA, R. B. *Economia Ambiental Sustentável: Os Combustíveis Fósseis e as Alternativas Energéticas*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2010.

- PROCEL – Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/main.asp>> MME/Eletróbrás, 2015.
- SARTORI, C.; FARIA, I. C. Programa para Simulação e Análise de Ciclos Termodinâmico e Máquinas Térmicas. *Revista Complexus*, São Paulo, ano. 1, n.2, P.21-38, setembro de 2010.
- SOARES, C. H. G. *Eficientização Energética em Sistemas de Abastecimento de Água*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB – Brasil, 2011.
- SOUSA, R. M. A. *Estudo da Eficiência Energética e Gestão de Energia em Edifícios Escolares*. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto – Portugal, 2011).
- STANO JUNIOR, A.; TIAGO FILHO, G. L. *Energias Renováveis*. 1. ed. Itajubá, MS – Brasil: FAPEPE, 2007.
- STRAPASSON, A. B. *A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética - Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP - Brasil, 2004.
- VIANA, A. N. C. et al. *Eficiência Energética: Fundamentose Aplicações*. 1. ed. Campinas, SP - Brasil: Elektro; UNIFEI; Excen; Fupai, 2012.
- VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova*, [s.l.], v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009.
- WANDERLEY, T. C. A Evolução das Lâmpadas e a Grande Revolução dos LEDs. *Revista Especialize On-line IPOG*, Goiânia, GO – Brasil, 8. ed, n. 9, v.01/2014, dezembro de 2014.