

O PARADIGMA DO ENSINO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Rubens Alves Dias

UNESP Campus de Guaratinguetá – Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá, SP – 12516-410
GSI – Engenharia e Consultoria Ltda.
Rua Mato Grosso, 120 – Taubaté, SP – 12062-120
rubdias@zipmail.com.br

Cristiano Rodrigues de Mattos

UNESP Campus de Guaratinguetá – Departamento de Física e Química
crmattos@feg.unesp.br

José Antônio Perrella Balestieri

UNESP Campus de Guaratinguetá – Departamento de Energia
perrella@feg.unesp.br

Resumo. Atualmente, em vários trabalhos publicados, tanto na área térmica quanto em segmentos correlatos, estão cada vez mais presentes os termos irreversibilidade, exergia, análise exergoeconômica e entropia. Entretanto, a disseminação de tais conceitos encontra-se restrito aos cursos de pós-graduação que já possuem alguma tradição na área. Por outro lado, as ferramentas analíticas fornecidas no ensino clássico da Termodinâmica, nos cursos de graduação em engenharia, teriam a sua abrangência ampliada mediante o desenvolvimento dos conteúdos pertinentes aos conceitos de entropia, disponibilidade e irreversibilidade, os quais pertencem ao domínio da Segunda Lei da Termodinâmica. Na presença de conceitos qualitativos de análise e no aprimoramento dos elementos analíticos, encontram-se alguns docentes que se sentem pouco à vontade em desenvolver a Segunda Lei, provavelmente por motivos inerentes às suas formações e/ou momento histórico, ou seja, ainda não estavam bem claros os conceitos e/ou replicam a “não compreensão” de outros mestres. O primeiro passo a ser dado no ensino da Segunda Lei consiste na superação do desconforto ocasionado pelas desigualdades entre as grandezas, pois nada é mais natural que algo que não possua relação direta com outros elementos presentes no meio. O presente trabalho visa apresentar, tanto do ponto de vista conceitual quanto didático, elementos que incentivem o docente a abordar os conceitos pertinentes à Segunda Lei da Termodinâmica com a mesma naturalidade dos demais conteúdos do ensino clássico.

Palavras chave: Termodinâmica, entropia, exergia, irreversibilidade, ensino superior.

1. Introdução

A Termodinâmica é uma das três disciplinas fundamentais da área térmica, ao lado da Mecânica dos Fluidos e da Transmissão de Calor; muito embora existam pontos de tangência entre as mesmas, cada uma delas apresenta arcabouço conceitual distinto e complementar para a adequada compreensão dos fenômenos térmicos.

Do ponto de vista formal, a Termodinâmica Clássica pauta-se pela aplicação das suas Leis, sendo que a Primeira Lei apresenta o aspecto quantitativo da energia ao passo em que a Segunda Lei diz respeito aos aspectos qualitativos das transformações energéticas.

As metodologias para a análise de sistemas energéticos são baseados em modelos analíticos baseados em estruturas de simulação que se pautam em leis físicas relativas ao fenômeno em estudo, podendo também fazer uso de modelos de otimização baseados ou não em fundamentos da 2ª Lei da Termodinâmica, nos quais as equações governantes em geral apresentam estrutura muito próxima, mudando apenas os meios pelos quais uma solução pode ser encontrada.

Como em qualquer curso técnico, na estrutura do curso de Termodinâmica o conteúdo de cada tópico deveria ser explorado num nível de profundidade adequado à formação dos participantes, possibilitando com isso lhes garantir a devida compreensão dos conceitos ali existentes e posteriormente exercitá-la com base em potenciais aplicações dos mesmos à vida quotidiana ou à prática de sua profissão. No entanto, observa-se em diversas situações que alguns tópicos são relegados a segundo plano ou seu conteúdo é explorado de forma superficial pela dificuldade dos instrutores em estabelecer seu significado – e não poucas vezes essa limitação é replicada, seja na vida profissional, seja no processo educacional.

A 2ª Lei da Termodinâmica é um desses conteúdos que apresentam dificuldades de compreensão e cujo emprego tem sido aquém de sua potencialidade. Em face às atuais condições de suprimento energético e restrições ambientais, o emprego de métodos de análise baseados na 2ª Lei permitem identificar as melhores condições operacionais de instalações térmicas de geração; auxiliam na partição de custos dos diversos fluxos energéticos envolvidos, contribuindo para uma adequada remuneração decorrente de sua entrega aos pontos consumidores; permitem estabelecer as bases para uma adequada avaliação dos fluxos térmicos lançados à atmosfera, e sua eventual cobrança na

forma de custos ambientais (ou externalidades), contribuindo dessa forma para melhorar as condições do meio ambiente.

Este trabalho tem por objetivo apresentar aspectos conceituais e didáticos da questão a partir de elementos que incentivem o docente a abordar os conceitos pertinentes à Segunda Lei da Termodinâmica com a mesma naturalidade dos demais conteúdos do ensino clássico.

2. Segunda Lei da Termodinâmica: conceitos e aplicações

Os esforços para o emprego da Segunda Lei em nível de graduação foram discutidos em Balestieri et al. (1999); os autores assim se expressaram: “*Tradicionalmente a dedicação dada nos cursos de graduação de termodinâmica à conceituação e aplicação da propriedade entropia e aos balanços entrópicos é menor que aquela dada aos balanços de energia. Este fato, aliado à dificuldade inerente à compreensão e operacionalização do conceito de entropia podem explicar porque, ainda hoje passados cerca de cem anos da formulação do teorema de Gouy-Stodola, a utilidade da Segunda Lei da Termodinâmica continua sendo um ponto obscuro para a grande maioria dos engenheiros*”.

Neste item são apresentados, de forma bastante sucinta, o desenvolvimento histórico da Segunda Lei, as bases conceituais do emprego da análise exérgica e uma situação sugerida a título de ilustração do potencial de emprego dessa ferramenta.

2.1. Da contribuição de Carnot à desigualdade de Clausius

Muito já foi dito sobre a contribuição de Sadi Carnot para a Termodinâmica a partir de seu trabalho “*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propes à développer cette puissance*”, publicado em 1824, bem como acerca dos fatos que permitem inferir que a Segunda Lei surgiu antes da Primeira Lei (Passos, 2004); tampouco deve deixar de ser mencionado o fato de que sua formulação cientificamente aceita surgiu após o trabalho de Clausius, por volta de 1860.

Mas não apenas esses dois vultos das Ciências Térmicas deixaram sua contribuição: nomes como Savery, Newcomen e Watt, dentre outros, tiveram sua participação na construção dessa ciência. Um interessante trabalho de resgate histórico da Termodinâmica no bojo da Revolução Industrial – calcado nas dificuldades para a obtenção do carvão face ao seu crescente uso, o desenvolvimento e o emprego da máquina a vapor, as necessidades acessórias que levaram ao desenvolvimento de válvulas e controladores e que alcança o início da década de 1960, quando a última máquina a vapor da indústria têxtil inglesa é levada para um museu – pode ser contemplado no interessante livro de Hills (1993).

Se Carnot formulou as bases que deram origem à Segunda Lei, Clausius introduziu o conceito de entropia como forma de superação das dificuldades de formulação da questão. O não aproveitamento integral do calor em trabalho relaciona-se com o conceito de entropia e sua geração, os quais estão apoiados em um corolário da Segunda Lei da Termodinâmica conhecido como a *desigualdade de Clausius*, expressa pela Eq. (1):

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b \leq 0 \tag{1}$$

sendo:

δQ : calor transferido em uma parte da superfície de controle;

T: temperatura absoluta da superfície

b (*boundary*): serve para indicar que a integração ocorre no contorno de um sistema que executa um ciclo.

A *igualdade* aplica-se na *ausência de irreversibilidades* quando um sistema realiza um ciclo, e a *desigualdade* surge na *presença de irreversibilidades*.

Estendendo-se a desigualdade de Clausius para a definição de variação de entropia, normalmente recorre-se à Fig. (1), a qual é comum nos livros de termodinâmica, porém pouco compreendida. Entretanto, buscar-se-á o seu entendimento através das etapas propostas por Moran e Shapiro (1995).

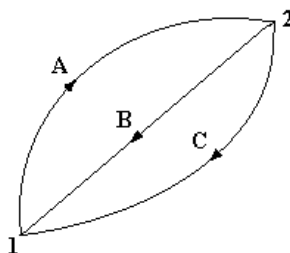


Figura 1. Representação de um processo submetido a dois ciclos.

A Figura 1 mostra um ciclo no qual tem-se um processo 1-2 pelo caminho reversível A, e um retorno por 2-1 pelo caminho reversível B. Aplicando-se a Eq. (1), tem-se a Eq. (2),

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right) = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = 0 \quad (2)$$

realizando-se o mesmo ciclo, mas retornando-se por 2-1 pelo caminho irreversível C, da Eq. (2) obtém-se a Eq. (3),

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right) = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C < 0 \quad (3)$$

subtraindo-se a Eq. (3) da Eq. (2), chega-se a Eq. (4):

$$\int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C - \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B < 0, \quad \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B > \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C \quad (4)$$

considerando-se para o caminho reversível B, define-se a *entropia* (S) como mostrado na Eq. (5):

$$\int_2^1 dS_B = \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = \int_2^1 dS_C \quad (5)$$

substituindo-se a Eq. (5) na Eq. (4), resulta em $dS > \frac{\delta Q}{T}$, mas tal relação é usualmente escrita sob a forma da Eq. (6):

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (6)$$

sendo a *igualdade* válida para os *processos reversíveis* e a *desigualdade* para os *processos irreversíveis*.

Ao analisar a Eq. (6), deve-se perceber que nos processos de transformação energética, que ocorrem na natureza, a variação da entropia dS entre dois estados (representados pelos pontos 1 e 2 na Fig. 1) será sempre maior que a troca de calor a uma determinada temperatura. Portanto, a variação de entropia leva em consideração um valor adicional $\delta Q/T$ que supera a condição reversível, o qual sinaliza a necessidade de acrescentar uma certa quantidade de energia num dado processo, a fim de suprir as perdas inerentes à transformação, definidas como irreversibilidades.

Uma vez entendido que na natureza não existem processos reversíveis e que em todas transformações energéticas as quantidades de energia são maiores na entrada do que na saída, pode-se eliminar a desigualdade da Eq. (6) acrescentando-se a variável σ_{ciclo} no lado direito da equação, resultando na Eq. (7). O termo σ_{ciclo} refere-se à entropia produzida pelas irreversibilidades internas.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \sigma_{\text{ciclo}} \quad (7)$$

As relações apresentadas constituem toda a fundamentação para o desenvolvimento da análise exérgica, a qual leva em consideração a “essência” da energia, ou seja, o máximo trabalho que pode ser obtido de um sistema em relação a um determinado estado de equilíbrio (referência), como as condições normais de temperatura e pressão.

2.2. Análise exérgica

Moran e Shapiro (1995) combinam os balanços de energia e entropia para sistemas fechados, levando-se em conta dois estados distintos, a fim de obter o balanço de exergia, ou disponibilidade, aplicado em um volume de controle, no qual estão presentes transferências de calor e trabalho, bem como fluxos de massa através da superfície de controle, conforme mostrado na Eq. (8).

$$\frac{dA_{VC}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{VC} - P_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right) + \sum_e \dot{m}_e a_e - \sum_s \dot{m}_s a_s - \dot{I}_{VC} \quad (8)$$

com:

$$a = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz$$

Sendo:

A	: exergia;	s	: entropia específica;
T	: temperatura em escala absoluta;	v	: velocidade do escoamento;
\dot{Q}	: calor recebido ou rejeitado;	g	: aceleração da gravidade;
\dot{W}	: trabalho;	z	: altura;
p	: pressão;	\dot{I}	: irreversibilidade;
V	: volume;	VC	: volume de controle;
\dot{m}	: fluxo de massa;	j	: j = 1,2,3,...
a	: exergia específica;	0	: condição de referência;
h	: entalpia específica;	e	: entrada;

Ao interpretar do balanço exergético aplicado num volume de controle, o termo à esquerda da igualdade representa a taxa de variação de exergia, enquanto os primeiros quatro termos à direita representam as transferências de exergia associadas ao calor, ao trabalho e aos fluxos de massa nas entradas e saídas da superfície de controle. O último termo contabiliza a destruição de exergia dentro do volume de controle, ou seja, as irreversibilidades presentes no processo sob estudo. Na exergia associada à transferência de calor é necessário conhecer a que temperatura estará ocorrendo a mesma (Dias, 1999).

Para ilustrar a discussão precedente, aplicando-se o balanço exergético num compressor frigorífico operando em regime permanente, conforme a Fig. (2), verifica-se que o trabalho aplicado no eixo sustenta as transferências de exergia mais as irreversibilidades dentro do volume de controle. A Eq. (9) possibilita o cálculo do trabalho aplicado no compressor, cuja eficiência de exergética (ϵ) pode ser avaliada a partir da Eq. (10).

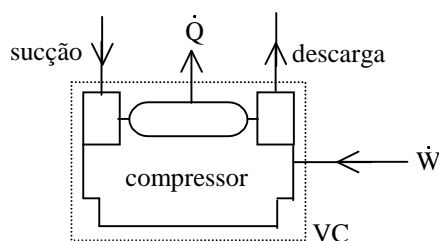


Figura 2. Desenho esquemático de um compressor.

$$\dot{W} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\dot{Q} + \dot{m}[(h_{\text{descarga}} - h_{\text{sucção}}) - T_0(s_{\text{descarga}} - s_{\text{sucção}})] + \dot{I}_{\text{VC}} \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\dot{Q} + \dot{m}[(h_{\text{descarga}} - h_{\text{sucção}}) - T_0(s_{\text{descarga}} - s_{\text{sucção}})]}{\dot{W}} \quad (10)$$

Cabe ressaltar que Burghardt e Harbach (1993) discutem a aplicação da análise exergética em sistemas em que ocorrem reações químicas, uma vez que a variação da exergia é igual à variação da energia livre de Gibbs (G), para um sistema com temperatura e pressão constantes, indicada pela Eq. (11). Todavia, tal abordagem não será desenvolvida em virtude do próprio trabalho estar direcionado para a análise das máquinas térmicas.

$$dA = (dG)_{T,p} \quad (11)$$

2.3. Ferramentas analíticas decorrentes da análise exergética

A partir da Segunda Lei da Termodinâmica foram estabelecidas metodologias para a avaliação de instalações térmicas. A Termoeconomia (ou Exergoeconomia, como preferem alguns por dizer respeito à Segunda Lei) é uma vertente que tem a análise exergética como sua ferramenta básica, também utiliza os princípios de análise econômica e os fundamentos de otimização matemática, quase sempre apresentada sob a ótica da programação não-linear, uma característica dos problemas físicos reais (Balestieri, 2001). Como permite uma análise global do sistema e pode ser empregada para a síntese de componentes ou para a avaliação operacional dos mesmos e do sistema como um todo através da otimização matemática, levando em conta os custos de investimento, de operação e manutenção e mesmo os custos ambientais decorrentes da emissão de gases na atmosfera, os modelos termoeconômicos têm sido amplamente empregados na literatura técnica.

A análise exérgica tem sido proposta como uma ferramenta adequada para a identificação das perdas ou irreversibilidades presentes nas instalações térmicas, o que potencializa a comparação entre diferentes alternativas não apenas tendo por base sua eficiência tomada em base quantitativa, que seria o rendimento térmico de Primeira Lei.

O estudo de caso mostrado a seguir, exemplifica como a análise de Segunda Lei auxilia na escolha de uma caldeira, destinada à produção de 8500 kg/h de vapor saturado a uma pressão absoluta de 1,3 MPa. Para tanto, assumir-se-á a existência de duas propostas técnico-comercial, identificadas pelos fabricantes A e B. Na Tab. (1) encontram-se apresentados os dados operacionais da caldeira para essa análise.

Tabela 1 – Dados operacionais da caldeira.

	Grandeza	Unidade	Valor
	$\dot{m}_{\text{água}}$	kg/s	1,056
	$\dot{m}_{\text{óleo}}^*$	kg/s	0,08132
Entrada	T_e	°C	20,0
	h_e	kJ/kg	83,94
	s_e	kJ/kg.K	0,2966
Saída	T_s	°C	191,6
	p_s	MPa	1,30
	h_s	kJ/kg	2787,60
	s_s	kJ/kg.K	6,4953

* Óleo combustível 1A – PCI 40337kJ/kg

De acordo com os fabricantes, as caldeiras apresentam a mesma eficiência de Primeira Lei (η), cujo valor é de 87%. Nesse contexto, uma análise de Segunda Lei permite verificar, em termos qualitativos, aspectos que possam diferenciá-las. Para tanto, a Fig. (3) serve tanto para a determinação do volume de controle (VC) quanto para a definição das condições de contorno.

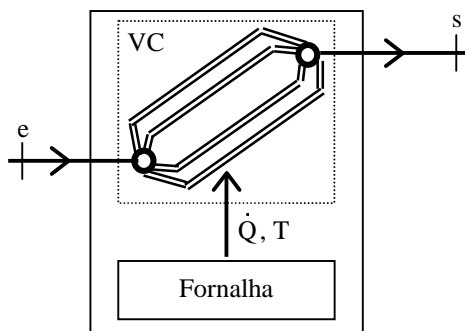


Figura 3. Esquematização de uma caldeira para a análise de Segunda Lei

A partir do VC da Fig. (3), estabelece-se a entrada (e) e a saída (s) do fluido de trabalho, bem como o fluxo de calor que entra no evaporador (\dot{Q}) pelo lado da fornalha, cuja parede encontra-se a uma temperatura T. Nessa análise assumir-se-á que não existe perda de calor do casco para o meio que envolve a caldeira e que a operação está em regime permanente. Contempladas essas considerações, a Eq. (8) assume a forma da Eq. (12), na qual o termo \dot{I}_{VC} é substituído pelo termo $\dot{A}_{caldeira}$ (exergia contida no interior do VC), pois não havendo realização de trabalho ($\dot{W}_{VC} = 0$) numa caldeira, a irreversibilidade constitui a própria exergia.

$$0 = \underbrace{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\dot{Q} + \dot{m}_{\text{água}} [(h_e - h_0) - T_0(s_e - s_0)]}_{\text{Exergia que entra no VC}} - \underbrace{\dot{m}_{\text{água}} [(h_s - h_0) - T_0(s_s - s_0)] - \dot{A}_{caldeira}}_{\text{Exergia que sai do VC}} \quad (12)$$

Diante do exposto, pode-se definir a eficiência exérgica (ϵ) como a relação entre a exergia no interior do VC, responsável pela mudança de estado do fluido de trabalho, e a exergia que entra no VC, conforme apresentada na Eq. (13).

$$\varepsilon = \frac{\dot{A}_{\text{caldeira}}}{(1 - \frac{T_0}{T})\dot{Q} + \dot{m}_{\text{água}}[(h_e - h_0) - T_0(s_e - s_0)]} \quad (13)$$

A próxima etapa da análise depende do fornecimento da temperatura na parede do evaporador, por parte dos fabricantes A e B (normalmente os fabricantes dispõem de tal informação). Na Tab. (2) estão presentes os valores correspondentes à avaliação das duas caldeiras.

Tabela 2 – Resultados referentes à análise de Segunda Lei.

Grandezas	Unidades	Fabricante A	Fabricante B
$T_{\text{parede da fornalha}}$	K	533	500
$\dot{A}_{\text{caldeira}}$	kW	353,8	248,5
$\dot{A}_{\text{total na entrada}}$	kW	1258,0	1152,7
ε	%	28,1	21,6

Apesar das duas caldeiras apresentarem uma mesma eficiência de Primeira Lei, ao realizar-se a análise de Segunda Lei, a caldeira do Fabricante A mostrou-se mais interessante que a do Fabricante B.

É oportuno salientar que a análise de Segunda Lei depende da localização do VC, ou seja, pode abranger toda a caldeira ou mesmo apenas a fornalha (avaliação do processo de combustão e a respectiva passagem dos gases oriundos da queima), ou ainda, certos pontos de interesse.

3. O ensino da Segunda Lei da Termodinâmica

No contexto então apresentado, fica patente que abordar a Segunda Lei da Termodinâmica em sala de aula não é uma tarefa simples, pois exige uma dedicação diferenciada por parte do docente em criar mecanismos didáticos que favoreçam as atividades de ensino-aprendizagem a respeito de um conteúdo que irá demandar um elevado grau de abstração por parte dos alunos.

Estratégias educacionais são, portanto, importantes para a plena consecução dessa atividade. Passos (2004) advoga que "*o ensino da Termodinâmica permeado de passagens e acontecimentos históricos, sobre o desenvolvimento das máquinas térmicas ou da própria história da ciência termodinâmica, pode contribuir para um melhor entendimento da disciplina*".

Viglietta (1990) enfatizou a importância da disseminação dos conceitos da análise exérgica, principalmente quando as preocupações dentro do setor energético, em relação à economia de recursos, têm ganho cada vez mais espaço. Nessa abordagem, discutem-se as limitações das avaliações de eficiência na forma convencional, a partir da Primeira Lei, e a contribuição que a eficiência de Segunda Lei, no que se refere ao potencial de localização dos pontos onde ocorrem as irreversibilidades dentro dos processos.

3.1. A responsabilidade do docente

Um dos principais desafios no processo educacional é a condução dos conteúdos das disciplinas de numa forma que faça sentido ao estudante. A escolha e definição dos conteúdos são, em última instância, tarefa do professor. É ele que tem pela frente determinados alunos, com suas características de origem social, vivendo num mundo cultural determinado, com certas disposições e preparo para enfrentar o estudo. O professor não pode esperar que os livros didáticos revelem os aspectos reais das coisas (Libâneo, 1992).

Todavia, a elaboração do plano de aula constitui num processo dinâmico, no qual os conceitos formais necessitam de constantes releituras a cada ciclo. Na interação do professor com o estudante deve-se criar condições para que haja o estudo ativo, e para tanto se sugerem as seguintes etapas (Libâneo, 1992):

- o incentivo propriamente dito;
- destaque da importância da matéria;
- estabelecimento de vínculos (estudo de casos);
- auxílio aos alunos;
- elogiar e corrigir (com sensibilidade e responsabilidade) resultados obtidos;
- evidenciar a exigência social (cidadania).

Normalmente no ensino de Ciências, entre ele as Ciências Térmicas, existe uma predisposição do professor de reproduzir os métodos utilizados por seus antigos professores. Em parte isso se deve a uma ausência de uma formação mais acentuada na área da educação. Nessas circunstâncias, as intervenções nos currículos ficam restritas às atualizações de conteúdos e modernização de instrumentos didáticos (informática e recursos audiovisuais). É pouco

freqüente o questionamento crítico a respeito dos pressupostos pedagógicos envolvidos e de suas conseqüências sobre a formação dos alunos (Llagostera, 1999).

3.2. Estratégias educacionais em sala de aula

Durante o processo educacional, o aluno de engenharia necessita ter de forma clara as inter-relações entre as disciplinas que compõem a sua formação. No caso das Ciências Térmicas, a Fig. (4) ilustra uma possível esquematização de como os diversos conceitos desse campo do saber podem ser encadeados numa aula inicial, estabelecendo-se uma linha de evolução conceitual dos conteúdos programáticos; a Fig. (5) identifica oportunidades de inserção dos conceitos de uso racional de energia nos conteúdos da disciplina Máquinas Térmicas, de vertente tecnológica, tal como é ministrada na UNESP–Campus de Guaratinguetá. O uso racional da energia, na qualidade de tema transversal, ilustraria as necessidades e estratégias dentro de um modelo de desenvolvimento sustentável, envolvendo os conceitos de Segunda Lei da Termodinâmica como instrumento de avaliação através da identificação das irreversibilidades, ou seja, avaliando-se as eficiências exergéticas (Dias, Mattos e Balestieri, 2002).

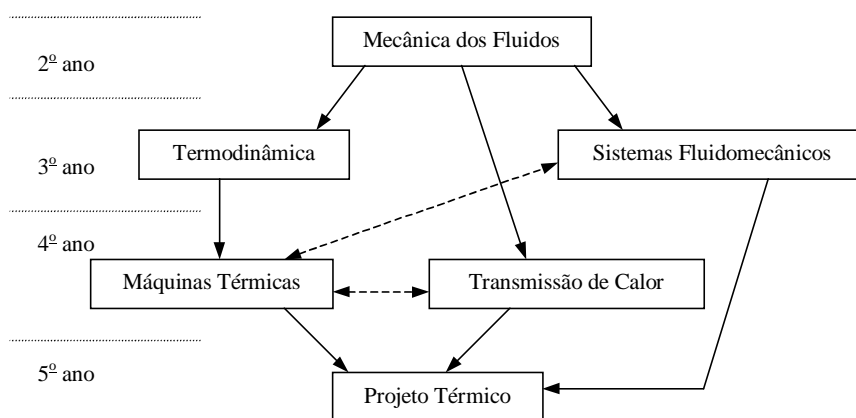


Figura 4. Ilustração de encadeamento entre disciplinas da área de Ciências Térmicas.

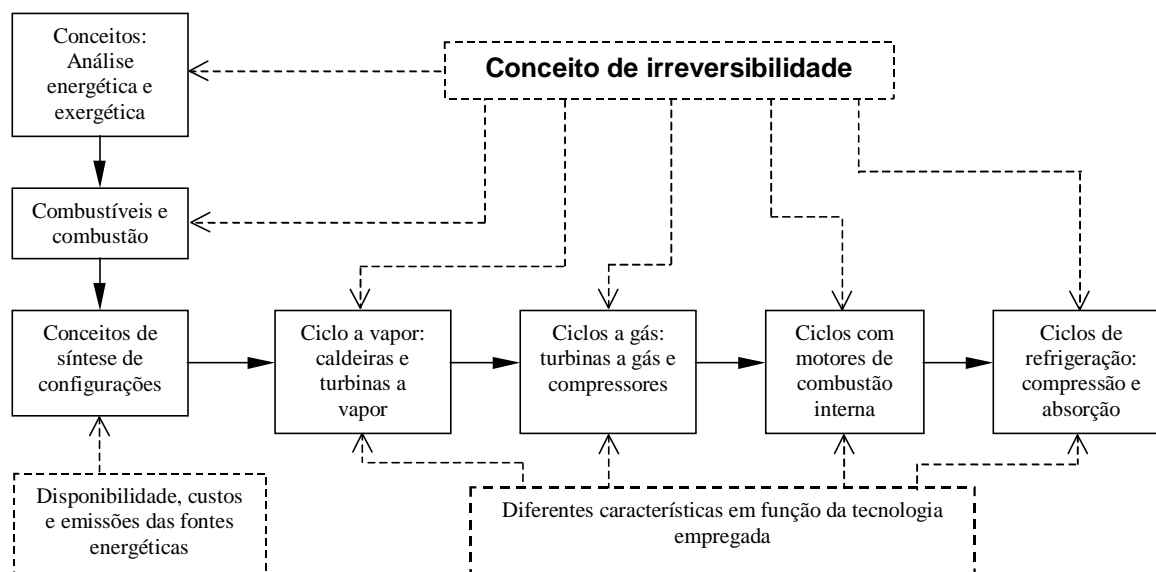


Figura 5. Esquematização da disciplina Máquinas Térmicas, contextualizada pelo tema Uso Racional de Energia.

4. Aspectos relevantes no domínio dos conceitos da Segunda Lei da Termodinâmica

O domínio conceitual defendido neste trabalho vem ao encontro das necessidades de desenvolvimento tecnológico das empresas que atuam direta, e indiretamente, com a energia em suas várias formas; todavia, as próprias organizações não se sentem familiarizadas sobre a forma de aplicação das análises exergéticas e seus desdobramentos.

Adotar os conteúdos pertinentes à análise de Segunda Lei nos planos de aula significa o aperfeiçoamento dos futuros engenheiros no que diz respeito à capacidade de entendimento dos fenômenos envolvidos nos processos de transformação energética. Dessa forma, estar-se-ia suprindo recursos humanos mais sensibilizados tanto pelas questões

do uso racional da energia quanto pelos desafios associados ao equilíbrio com o meio ambiente, que conseqüentemente implicaria em ações com considerável potencial de economia de recursos e capital.

5. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

6. Referências

- Balestieri, J.A.P., 2001, “Avaliação tecnológica e metodológica para o planejamento de centrais de cogeração”, UFSC/LABSOLAR – Relatório de Pós Doutorado, Florianópolis, Brasil, 154 p.
- Balestieri, J.A.P., Nogueira, L.A.H., Nebra, S.A., Oliveira Junior, S., Gallo, W.L.R., 1999, “Metodologias para análise de sistemas térmicos”, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, CD-ROM, Águas de Lindóia, Brasil.
- Dias, R.A., 1999, “Impactos da Substituição de Equipamentos na Conservação de Energia”, UNESP Campus de Guaratinguetá - Dissertação de Mestrado, Guaratinguetá, Brasil, pp.36-40.
- Dias, R. A., Mattos, C. R., Balestieri, J. A. P., 2002, “Desenvolvimento de temas transversais no ensino de ciências térmicas”, Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, CD-ROM, Caxambu, Brasil.
- Burghardt, M. D., Harbach, J. A., 1993, Engineering thermodynamics, HarperCollins College Publishers, New York, p.279.
- Hills, R. L., 1993, “Power from steam: a history of the stationary steam”, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 354 p.
- Libâneo, J. C., 1992, “Didática”, Ed. Cortez, S. Paulo, Brasil, 261 p.
- Llagostera, J, 1999, “Reflexão pedagógica no âmbito do ensino de engenharia”, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, CD-ROM, Águas de Lindóia, Brasil.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., 1995, “Fundamentals of engineering thermodynamics”, John Wiley & Sons, USA, pp.201-321.
- Passos, J.C., 2003, “Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica”, Revista de Ensino de Engenharia, Vol. 22, pp. 25–31.
- Viglieta, L., 1990, “‘Efficiency’ in the teaching of energy”, Physics Education, Vol.25, pp.317-321.

THE PARADIGM OF THERMODYNAMICS SECOND LAW TEACH

Rubens Alves Dias

FEG/UNESP Campus de Guaratinguetá – Electrical Engineering Department
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá, SP – 12516-410
GSI – Engenharia e Consultoria Ltda.
Rua Mato Grosso, 120 – Taubaté, SP – 12062-120
rubdias@zipmail.com.br

Cristiano Rodrigues de Mattos

FEG/UNESP Campus de Guaratinguetá – Physics and Chemistry Department
crmattos@feg.unesp.br

José Antônio Perrella Balestieri

FEG/UNESP Campus de Guaratinguetá – Energy Department
perrella@feg.unesp.br

Abstract

Nowadays, in many published papers, in thermal area and adjacent segments the terms irreversibility, exergy, exergoeconomic analysis and entropy are presents. However, the dissemination of such concepts is restricted to the post-graduation courses with tradition in this boarding. On the other hand, the analytics tools offered by Thermodynamic classic teach in engineering under-graduation courses, would be improved by means of development of pertinent contents related to entropy, availability and irreversibility, or better, Thermodynamics Second Law concepts. Considering analysis qualitative concepts and their applications, there are some professors that fell themselves little shy in working with Second Law, probability by inherent reasons to their formation and/or historic moment, or better, the involved concepts are not clear yet and/or they transfer the “not comprehension” of others masters. The first step in teaching Second Law consists in overcoming the discomfort caused by Inequality of Clausius and its unfolding. The present paper aim to show, in terms conceptual and didactic point of view, elements that stimulating the professor approaches the Thermodynamics Second law concepts with same simplicity of classic teach contents.

Keywords: Thermodynamics, entropy, exergy, irreversibility, under-graduate teach.