

## METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

### Mesa Redonda: Simpósio 1: Análise de Sistemas Energéticos

#### **José Antônio Perrella Balestieri**

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Energia - Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333. 12500-000, Guaratinguetá, SP, Brasil. E-mail: perrella@feg.unesp.br

#### **Luiz Augusto Horta Nogueira**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá / Agência Nacional do Petróleo, Rua Senador Dantas, 105, 13° andar. 20031-201, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: horta@anp.gov.br

#### **Silvia Azucena Nebra**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia. Cx. Ps. 6122. 13083-970- Campinas, SP, Brasil. E-mail: sanebra@fem.Unicamp.br

#### **Silvio de Oliveira Júnior**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) - Agrupamento de Engenharia Térmica - Av. Prof. Almeida Prado, 532. 05508-901 - São Paulo, SP, Brasil. E-mail: olivsilj@ipt.br

#### **Waldyr Luiz Ribeiro Gallo**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia / Agência Nacional do Petróleo, Rua Senador Dantas, 105, 10° andar. 20031-201, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: wgallo@anp.gov.br

***Resumo.** Este trabalho apresenta uma revisão do estado da arte no Brasil e no mundo de aspectos referentes à análise de sistemas energéticos. São abordados os temas de metodologias de análise, incluindo a análise exérgica, termoeconômica e otimização de sistemas. São comentados os softwares comerciais disponíveis para a aplicação das metodologias. São mencionados os trabalhos realizados na área em diversas instituições no Brasil. São apresentadas algumas reflexões acerca do ensino e aplicação dos conceitos de exergia e termoeconomia em cursos de graduação, pós-graduação e de educação continuada, como ferramenta de análise e otimização de processos de conversão de energia.*

***Palavras-chave:** Sistemas energéticos, Exergia, Termoeconomia, Otimização.*

## 1 MODELOS PARA ANÁLISE DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

As metodologias para a análise de sistemas energéticos contemplam, de modo geral, as ferramentas analíticas baseadas em trabalhos de simulação a partir de equações pautadas em leis físicas relativas ao campo de abrangência do fenômeno em estudo, assim como modelos de otimização baseados ou não em fundamentos da 2ª Lei da Termodinâmica. Cabe ressaltar que quaisquer que sejam as metodologias empregadas, isto é, a simulação ou a otimização, as equações governantes apresentam idêntica estrutura, mudando apenas os meios pelos quais uma solução pode ser encontrada.

As análises puramente exergéticas têm cedido espaço para os modelos termoeconômicos; de acordo com Tuna (1999), as primeiras propostas de análise de sistemas energéticos baseadas em modelos exergéticos remontam à década de 1920, com o trabalho de Goodenough intitulado *Lost Kilowatts*, apesar de o trabalho de Keenan, de 1932, que adotava o conceito de exergia (disponibilidade) para análise de custos, ter contado com maior aceitação e praticamente resgatar o trabalho anterior. O termo exergia foi introduzido por Rant em 1956, na Alemanha (Tsatsaronis, 1993), sendo que Evans e seguidores utilizaram o termo essergia num contraponto ao termo alemão (Evans, 1980; Frangopoulos, 1987).

A associação dos fundamentos de 2ª Lei com elementos de análise econômica deu origem à análise termoeconômica, também chamada exergoeconômica, de forma indistinta, pela maior parte dos autores. Esta abordagem pode estar ou não associada ao emprego de modelos de otimização, caso no qual pode ter por objetivo minimizar os custos operacionais, a emissão de poluentes ou as irreversibilidades do sistema como um todo, assim como pode primar pela maximização do benefício líquido do projeto ou sua confiabilidade.

Parece haver consenso entre os principais pesquisadores que trabalham com modelos de otimização termoeconômica quanto à necessidade de uma distinção entre sua aplicação no projeto e na operação; Bejan *et al.*, 1996, por exemplo, identificam duas vertentes para os modelos de otimização, aqui considerados de forma geral:

- **otimização estrutural ou de projeto:** a relação dos equipamentos selecionados na fase de síntese e/ou suas interconexões são alterados de modo a se obter um projeto superior;
- **otimização de parâmetros:** as variáveis de interesse na análise, assim como as variáveis de decisão de vários pontos do sistema são determinadas, ao menos aproximadamente, com a intenção de se satisfazer certos objetivos.

Os modelos de otimização conduzem a solução do problema a resultados ótimos; que no entanto dependerão da função objetivo definida, assim como das restrições estipuladas. A complexidade da solução será maior se múltiplos objetivos, conflitantes, são definidos. A escolha do modelo mais adequado para cada problema depende de suas características, e dos objetivos perseguidos.

Aplicado aos sistemas energéticos de cogeração, quer seja no âmbito do projeto quanto da operação, verifica-se a existência de duas vertentes, sendo a dos modelos termoeconômicos aquela que maior destaque vem apresentando no meio acadêmico, talvez devido a sua maior difusão. Uma distinção deve, portanto, ser feita entre essas duas categorias de modelos de otimização, que classificam-se como de *otimização da estrutura do projeto* e de *otimização termoeconômica*.

Os *modelos de otimização da estrutura do projeto* são de conceito mais amplo e se prestam à solução de uma grande variedade de problemas, os quais devem ser equacionados de acordo com as restrições físicas e termodinâmicas, dentre outras, as quais podem interferir no comportamento do objeto de estudo. Aplicados ao projeto de sistemas de cogeração, os *modelos de otimização da estrutura do projeto* permitem buscar a configuração mais adequada para um certo problema, na fase de síntese do projeto, do ponto de vista de um conceito ótimo (definido por uma certa função objetivo) ou eficiente (se uma ou mais funções objetivo estiverem sendo consideradas), identificando soluções a serem consideradas num estudo mais aprofundado, com a necessária análise para adequação à realidade física (escolha de máquinas comerciais, custos de instalação ou operação mínimos, por exemplo), levando necessariamente em conta as condições operacionais do sistema.

No campo da *análise termoeconômica de sistemas energéticos*, as metodologias até então desenvolvidas podem ser classificadas em dois grupos, dependendo de seus objetivos (Valero *et al.*, 1994):

- a **otimização dos parâmetros de projeto**, que foi desenvolvida principalmente por Evans e seguidores, como Frangopoulos e von Spakovsky, destinadas a buscar a otimização de

variáveis importantes do projeto de sistemas de cogeração a partir de uma configuração (estrutura produtiva) previamente definida, com o propósito de encontrar os valores para as variáveis de projeto (temperaturas, pressões, composição química dos fluxos; tipo, forma e tamanho de equipamentos, materiais, etc.) que minimizem os custos dos produtos finais; e - a **alocação de custos** para fluxos internos e produtos, proposta por Lozano e Valero (1993) e Tsatsaronis (1993) com vistas a determinar a partição dos custos de produção das diversas formas de energia por critérios qualitativos, através da 2ª Lei da Termodinâmica. Esta abordagem também requer, explícita ou não, a definição de uma estrutura produtiva.

Encontram-se ainda nesse quadro autores como Agazzani e Massardo (1997), que trabalham com uma modelagem funcional termoeconômica muito próxima àquela apresentada por Frangopoulos em sua tese de doutorado (Frangopoulos, 1983), agregando no processo de otimização elementos outros que possibilitam a análise termoeconômica de sistemas térmicos a vapor, a gás e em ciclos combinados.

Alvarado e Gherardelli, 1994, em publicação no mesmo ano da edição especial do periódico dedicado aos modelos termoeconômicos (Energy, v. 19, n. 3, 1994), apresentam seu método fundamentado na definição de termos de elasticidade e de eficiência de 2ª Lei que lhes permitem obter resultados próximos dos obtidos pelos demais autores quando da comparação do problema CGAM. Num recente e interessante trabalho (Cerqueira, 1999), apresentam-se as particularidades dos principais modelos termoeconômicos aplicados ao problema CGAM tomados numa mesma base para comparação, fato que não ocorreu como era pretendido na publicação original supra citada.

Uma vertente ambiental do modelo funcional termoeconômico é apresentada por Agazzani et al. (1998), que relatam que a aproximação environômica é um modelo a ser seguido no intuito de se analisar e otimizar o projeto de ciclos combinados, em que são estudadas como alternativas a serem empregadas na redução das emissões de NO<sub>x</sub> a redução catalítica seletiva e a injeção de vapor, bem como discutem-se os efeitos causados pelas penalidades decorrentes da poluição e pelos limites impostos por regulamentações.

Cabem ainda algumas considerações com respeito à obtenção das soluções: as técnicas de pesquisa dos resultados ótimos tanto são baseadas em programação linear quanto em modelos não lineares, admitindo-se o emprego de recursos como as redes de grafos e as técnicas de linearização de funções convexas.

Novas estruturas têm sido pensadas para o emprego dos modelos de otimização; a título de exemplo, cita-se o trabalho de Sciubba (1998), que apresenta os aspectos conceituais de um modelo estruturado com base em formulação matricial a semelhança dos modelos termoeconômicos aqui citados, bem como uma interessante discussão acerca do processo de simulação dos fenômenos térmicos, em termos de formulação termodinâmica, com uma seqüência indutiva do modelo especialista que vem desenvolvendo.

## **2 - SOFTWARES DISPONÍVEIS PARA APLICAÇÃO**

Em termos de recursos computacionais para análise de sistemas térmicos, observa-se um desenvolvimento contínuo e profícuo de novos produtos, com características diferenciadas; planilhas de cálculo comerciais têm sido utilizadas como suporte para o desenvolvimento de muitos e variados *softwares*, muitas delas associadas a recursos gráficos, conduzindo a simplificação dos procedimentos de cálculo e permitindo uma dedicação maior dos profissionais ao problema em si.

Sciubba (1998), cita o emprego de diferentes pacotes comerciais utilizados como simuladores de processos, tais como o *SIMULINK*, um *software* de aplicação geral e com possibilidade de emprego na avaliação de processos transitórios; pacotes computacionais como o *ASPEN+*, *Pro-Vision*, *Chemasil*, *GateCycle*, dentre uma série de outros, compõem

uma amostra desse universo.

A título de ilustração, cabe a apresentação sumária de alguns dos programas comerciais: da grande diversidade de modelos citam-se o *IPSEpro*, da *SimTech Simulation Technology* (Áustria) e a linha de produtos da *ThermoFlow Incorporation* (EUA), com destaque para o *Thermoflex*, ambos com estrutura de figuras pré-definidas para montagem de configurações e análise. De tipo similar ao anterior, o *software Cycle-Tempo*, desenvolvido pelo *TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation*, da *Delft University of Technology*, Holanda, tem a vantagem de realizar o cálculo da exergia dos diferentes fluxos, além da entalpia e entropia, apresentando os resultados na forma de esquemas, tabelas ou gráficos. Uma imagem da tela deste *software* pode ser apreciada na Fig.1.

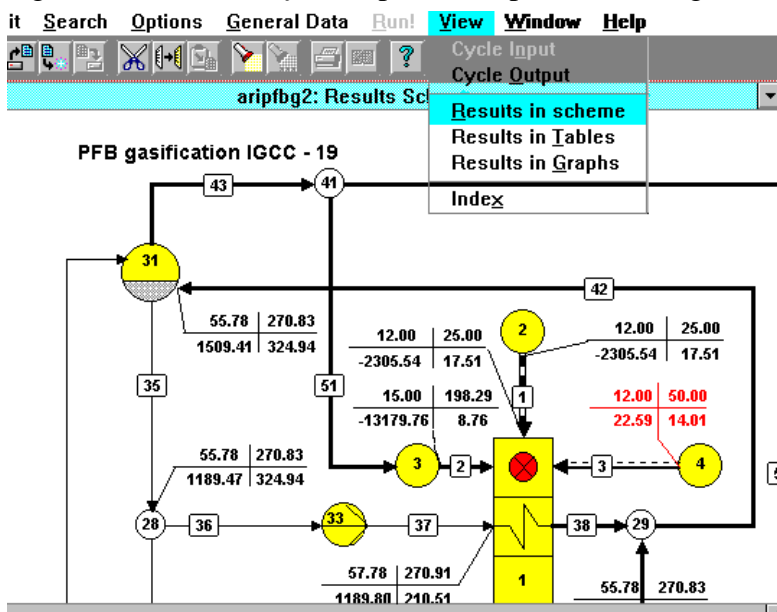


Figura 1: Tela ilustrativa do *software Cycle-Tempo*.

Um outro *software* comercial que pode citar-se é o EES da *F-Chart Software*. A diferença dos anteriormente citados é que este não trabalha com dispositivos previamente definidos, apenas permite cálculos rápidos de um grande número de equações, inclui métodos simples de otimização não linear e traz uma livreria de propriedades termodinâmicas e de transporte de um bom número de substâncias. É particularmente adequado para a utilização em cursos de graduação, pós graduação e extensão (elimina a enfadonha consulta a tabelas de propriedades, permite o traçado de gráficos), mas pode ser também utilizado em cálculos mais alentados. Uma tela com exemplo de cálculo, ilustrando seu uso típico, pode apreciar-se na Fig. 2.

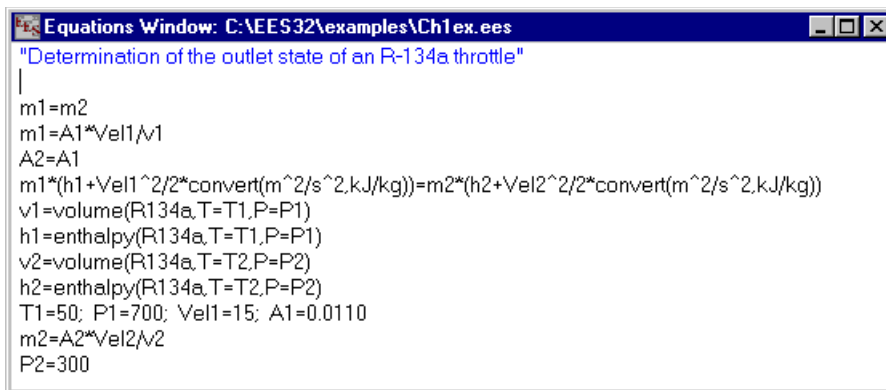


Figura 2: Tela do *software EES* da *F-Chart*: exemplo de cálculo.

Diversas experiências de desenvolvimento de *softwares* voltados à análise de sistemas energéticos podem ser citadas nos diversos centros que tratam do tema; a experiência da

UNESP nesse sentido pode ser ilustrada pelo desenvolvimento dos programas EASY (*Energy Assistant System*, baseado em linguagem visual) e CoGerador (desenvolvido com base no modelo multiobjetivo para análise de centrais de cogeração apresentado em Balestieri e Correia (1997)), cujo exemplo de resultado de uma simulação é apresentada na Fig. 3.

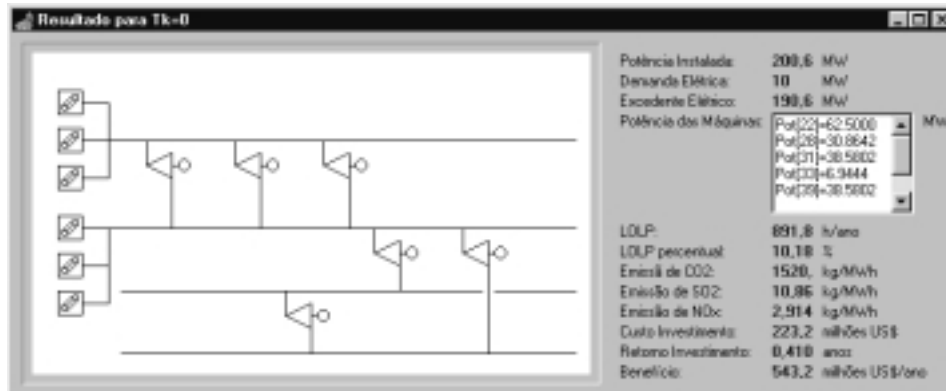


Fig. 3 - Tela de apresentação de resultados do *software* CoGerador

Vale destacar que o desenvolvimento de tais códigos computacionais não visam, em princípio, substituir os produtos comerciais disponíveis, mas têm por objetivo primeiro incrementar o desenvolvimento profissional dos bolsistas de graduação e pós graduação envolvidos nesses projetos, de modo a atingir-se um dos objetivos da Universidade: formar profissionais competentes para o mercado de trabalho. Além disso, é importante destacar que compete também à Universidade apresentar sua contribuição no desenvolvimento de novas formulações que possam, num futuro, ser incorporadas aos produtos comerciais.

### 3. ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA DE PLANTAS INDUSTRIAIS: A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

Dentre os trabalhos desenvolvidos no Brasil, citando apenas dissertações e teses, podem mencionar-se os referentes à simulação e análise energética e exergética de motores térmicos de ignição por centelha (Gallo, 1990), e de ciclo Diesel (Velasquez Alegre, 1994), e análise termoeconômica, focalizando custos de manutenção de plantas de geração de potência (Carvalho, 1996). Muitos trabalhos foram dedicados à análise de sistemas de cogeração, dentre eles os dedicados à análise de sistemas utilizados na indústria sucro-alcooleira (Walter, 1994, Barreda del Campo, 1994, 1999), de um polo petroquímico, incluindo turbinas a gás e vapor, Torres (1999), incluindo a análise e proposta de projetos como no caso de um sistema com turbina a gás (Guarinelo, 1997), ou com motores diesel, para um hospital (Santo, 1997). A utilização da energia e os custos associados nas indústrias de papel e celulose (Silveira, 1990) e de cimento (Silva, 1994) também foram analisados com ferramental termoeconômico.

No que diz respeito ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, SP, a aplicação da análise exergética e termoeconômica na avaliação do desempenho de plantas de utilidades industriais teve início no Agrupamento de Engenharia Térmica em 1993 quando foi feita uma análise exergética e termoeconômica entre um sistema de ar condicionado convencional e um sistema baseado em uma planta de cogeração para um *shopping center*, assim como de uma usina de açúcar e álcool de porte médio. A partir de 1995 o AET começou a desenvolver trabalhos de análise exergética e termoeconômica para a Petrobras, inicialmente para o Cenpes (Centro de Pesquisas) e em 1998 para o Setor de Abastecimento e Refino. Foi elaborada uma metodologia de avaliação de desempenho de plantas de processamento primário, essa metodologia foi aplicada a plantas *offshore* e *onshore*. Essa abordagem foi generalizada para ser empregada em qualquer sistema de cogeração e ciclo combinado. Em 1998 foram conduzidos dois trabalhos de análise termoeconômica. O primeiro avaliou os custos de

produção das utilidades geradas em uma refinaria da Petrobras, o segundo projeto teve como objetivo a comparação exergetica e termoeconômica entre o sistema de processamento primário de uma plataforma *offshore* e um sistema de bombeamento multifásico submarino em desenvolvimento pela Petrobras.

Da experiência acumulada, podem destacar-se os seguintes aspectos:

- a necessidade de se elaborar uma planta síntese da planta real, em função do nível de detalhes das informações técnicas e econômicas disponíveis;
- a sempre presente dificuldade de levantamento e determinação de parâmetros de operação (nominais e/ou efetivos), tais como pressão, temperatura, composição dos fluxos nos pontos necessários para a realização das análises requeridas, bem como dados de custos de investimento e operacional;
- a possibilidade que a análise exergetica fornece de identificarem-se os equipamentos (componentes) do processo que são os principais responsáveis pela ocorrência de ineficiências na planta industrial;
- a importância de traduzirem-se os resultados das análises exergetica e termoeconômica em termos de parâmetros normalmente utilizados para a caracterização de desempenho energético e econômico de sistemas térmicos, tais como consumo específico e custo de produção por unidade de massa, para melhor apresentar os resultados aos usuários destas informações;
- o elevado grau de desconhecimento das potencialidades que a análise exergetica e termoeconômica têm como ferramentas de análise e otimização de sistemas térmico por parte considerável do corpo técnico das empresas;
- o principal elemento de convencimento da utilidade destas ferramentas de análise consiste na associação dos resultados obtidos com a determinação racional dos custos de produção dos fluxos de calor, de massa e/ou trabalho mecânico/elétrico, internos e externos nas plantas analisadas.

O conjunto de aspectos relacionados evidencia que, se os três primeiros aspectos fazem parte de todo processo de análise e síntese de plantas industriais, os demais itens indicam que, apesar das vantagens existentes, a aceitação deste tipo de análise é extremamente limitado, devido ao desconhecimento que os engenheiros têm do potencial que o emprego da Segunda Lei oferece na análise e compreensão dos processos de conversão de energia.

A forma mais efetiva de popularizar o emprego das análises exergetica e termoeconômica de processos, no meio industrial, é através da ênfase no ensino destes conceitos e ferramentas nos cursos de graduação, pós-graduação e de educação continuada. Desta forma, os balanços de exergia e de custos em base exergetica poderão ser tão utilizados como os balanços de energia, assim como o conceito de tempo de retorno de investimento.

Um elemento que impulsionará a disseminação da análise exergetica e termoeconômica na avaliação de processos industriais é a crescente pressão dos organismos de controle ambiental para que as indústrias reduzam esse impacto gerado pela emissão de rejeitos de seus processos. Neste cenário, a utilização do conceito de exergia, assim como a determinação de custos em base exergetica, assegura uma avaliação racional da qualidade dos processos de conversão de energia, uma vez que leva em conta os aspectos relativos à eficiência dos processos, tendo sido também proposta sua utilização como uma base consistente para quantificação do impacto ambiental provocado por efluentes de processos industriais.

#### **4.- ENSINO DOS CONCEITOS DE EXERGIA E TERMOCONOMIA**

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.

Possivelmente, se o conceito de exergia (ou de disponibilidade para os seguidores de Keenan) tivesse sido formulado previamente ao conceito de entropia, a utilização dos balanços de 'utilidade termodinâmica' seriam mais populares, como costuma dizer o prof. P. Le Goff. Pode-se ousar dizer mais: estes balanços são mais úteis, para a avaliação do sistema, que os balanços de energia, que nada mais são que mera contabilidade energética.

A grande vantagem do emprego do conceito de exergia é que, através da quantificação da exergia destruída, evidencia-se como as ineficiências dos processos reduzem a utilidade do(s) insumo(s) energéticos utilizado(s) numa planta industrial, podendo-se identificar onde e como as ineficiências são geradas, assim como é possível se determinar, em base racional, o processo de formação de custos de produção das utilidades da planta.

O interesse pelo uso do conceito de exergia será, sem dúvida, incrementado à medida que for associado à quantificação do impacto ambiental provocado pelos rejeitos de processos industriais. Dessa forma, além das informações relativas à quantificação do desempenho dos processos de conversão de energia e da formação de custos de utilidades, será possível uma avaliação termodinâmica global de processos e plantas industriais.

#### **4.1 - Escola Federal de Itajubá, Universidade Federal de Belo Horizonte e Instituto Tecnológico de Aeronáutica**

No Brasil, o desenvolvimento da exergia deu-se mimetizando sua evolução em termos mundiais, onde se destaca uma primeira fase ocorrida na Europa Oriental, com grande atividade entre 1955 a 1965, e posteriormente uma fase mais ocidental, a partir de 1975, quando se destacaram pesquisadores americanos e franceses (vide Fig. P1 no Prefácio do texto *Advanced Engineering Thermodynamics*, Bejan, 1988, mostrando claramente as fases européia e americana dos estudos exergéticos...)

Assim, no Brasil dos anos sessenta, as aulas de Termodinâmica do Professor Richard Bran, na Escola Federal de Engenharia de Itajubá, já buscavam apresentar o conceito e motivar os alunos para o estudo da exergia. Nesta época o livro texto adotado era o Baier (1965) e foram estes talvez os nossos primeiros passos nesta metodologia termodinâmica. Durante este período foram produzidas algumas dissertações, como a de Silva (1973), bem como textos de divulgação, sempre com a participação do Professor Zulcy de Sousa (1966, 1967, 1969).

Vale mencionar que a temática exergética não ficou restrita à EFEI neste primeiro período, seja por que o Prof. Bran passou a lecionar no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, onde procurou difundir este assunto, seja porque o Prof. Borisa Cimblaris, do Departamento de Engenharia Térmica da Universidade Federal de Minas Gerais, também procurou desenvolver e estimular estudos exergéticos em seu grupo, a partir do final dos anos sessenta. Segundo suas palavras, foi determinante para sua efetiva introdução no tema a participação no II Encontro Nacional de Termodinâmica e Transferência de Calor, evento precursor dos atuais ENCIT's, realizado em 1968 no ITA.

Na década de 1990, o Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira passou a ministrar na EFEI os cursos de termodinâmica da pós-graduação, com a utilização do conceito de exergia para a análise de sistemas térmicos. Dentre as dissertações e teses defendidas nesta instituição, que utilizam os conceitos de exergia e/ou termoeconomia, podem citar-se Silveira (1990), Lima (1991), Serrate (1993); Donatelli (1993), Peres (1995), Teixeira (1995) e Carvalho (1996).

#### **4.2 Escola Politécnica da USP e Instituto de Pesquisas Tecnológicas**

O Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (EPUSP) oferece dois cursos de pós graduação sobre análise exergética e termoeconômica de processos: Análise Entrópica e Exergética de Processos (desde 1992) e Análise Exergética e Termoeconômica de Sistemas Térmicos (desde 1995). Dentre as teses defendidas que utilizam explicitamente o conceito de exergia/termoeconomia pode-se citar a de Vieira (1997).

No que se refere a cursos de educação continuada, pode-se dizer que o interesse é igualmente grande. Em 1994 foi ministrado no Centro de Treinamento da Petrobras, pelo Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior, um curso de Análise Termodinâmica de Processos, com 80 horas de duração, para engenheiros do Centro de Pesquisas (CENPES) e de refinarias da Petrobras. A partir de 1996 o Agrupamento de Engenharia Térmica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (AET/IPT) oferece um curso de 40 horas de duração sobre o Uso Racional de Energia na Indústria, no qual 30% da carga horária é dedicada à apresentação e aplicação da análise exergética e termoeconômica de processos industriais.

### **4.3 Universidade Estadual de Campinas**

O primeiro curso de pós-graduação devotado explicitamente à Avaliação de Processos pela Segunda lei da Termodinâmica foi ministrado em 1988 pelo Prof. Dr. Luiz Fernando Milanez. No período de 1989 a 1994, pela Prof. Dra. Silvia Azucena Nebra e o Prof. Dr. José Tomaz Vieira Pereira e posteriormente pelo Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo. O conceito de exergia é regularmente introduzido nos cursos de graduação, Termodinâmica I e II, e de extensão, como o de Engenharia de Gás, ministrados na instituição.

No mesmo período, diversos trabalhos foram produzidos com a utilização do conceito de exergia e posteriormente, termoeconomia. Sob o risco de deixar de mencionar algumas, destacam-se apenas as dissertações e teses defendidas, Gallo (1990), Velásquez Alegre (1993); Hubinger (1993), Walter (1992), Silva (1994), Leal (1997), Santo (1997), Torres (1999) , Cerqueira (1999) e Barreda (1999). Estas dissertações e teses geraram trabalhos publicados em nível nacional e internacional.

### **4.4 Universidade Estadual Paulista - UNESP**

O Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, com área de concentração em Transmissão e Conversão de Energia, conta com o tópico de Análise de Segunda Lei na disciplina Termodinâmica Avançada, disciplina básica e obrigatória para os bolsistas, o qual é ampliado na discussão de outras disciplinas eletivas, como Cogeração e Otimização de Sistemas Energéticos, na qual se encontra inserido um capítulo dedicado à Termoeconomia.

Diversos trabalhos relativos a dissertações e teses podem ser aqui mencionados: Ribeiro (1988), Pantalena (1997), Antunes (1999), Silveira (1998) e Tuna (1999) ilustram, de maneira geral, os trabalhos desenvolvidos sob a ótica da otimização termoeconômica; procedimentos mistos, empregando modelos exergéticos associados a ferramentas matemáticas de otimização em estruturas de grafos, podem ser encontradas em Balestieri (1994) e Balestieri (1997).

## **REFERÊNCIAS**

- Agazzani, A., Massardo, A.F.; 1997, A tool for thermoeconomic analysis and optimization of gas, steam and combined plants. *Journal Eng. Gas Turbines Power*, v. 119, p. 885-892.
- Agazzani, A., Massardo, A.F., Frangopoulos, C.A.; 1998, Environmental influence on the thermoeconomic optimization of a combined plant with NO<sub>x</sub> abatement. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v.120, p. 557-65.
- Alegre,J.V.; Milanez,L.F.; 1990, Avaliação do processo de combustão em motores Diesel



- usando a análise de segunda lei, III Encontro Nac. Ciências Térmicas, ABCM, Itapema.
- Alvarado, S, Gherardelli, C.; 1994, Exergoeconomic optimization of a cogeneration plant. *Energy*, v.19, n. 12, p. 1225-1233.
- Antunes, J.S.; 1999, Código computacional para análise de sistemas de cogeração com turbinas a gás. Tese (doutorado), Faculdade de Engenharia, Unesp, Guaratinguetá.
- Baehr, H.D.; 1965, Tratado moderno de termodinâmica, Editorial Jose Monteso, Barcelona.
- Balestieri, J.A.P.; 1994, Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multiobjetiva. Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Balestieri, J.A.P., Correia, P.B.; 1997, Multiobjective linear model for pre-feasibility design of cogeneration systems. *Energy*, v. 22, n. 5, p. 537-548.
- Balestieri, J.A.P.; 1997, Planejamento de centrais de cogeração: projeto, operação e expansão. Tese (Livre Docência), Unesp, Campus de Guaratinguetá.
- Barreda del Campo, E.R.; 1994, Avaliação das possibilidades de incremento da cogeração em usinas açucareiras cubanas, Dissertação de Mestrado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Barreda del Campo, E.R.; 1999, Avaliação termoeconômica do sistema de cogeração da Usina Vale do Rosário, Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Bejan, A.; 1988, *Advanced engineering thermodynamics*, John Wiley, New York.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G, Moran, M.; 1996, *Thermal design and optimization*, John Wiley, New York.
- Carvalho, F.R.; 1996, Termoeconomia aplicada à manutenção de centrais termelétricas, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Cerqueira, S.A.A.G.; 1999, Metodologias de análise termoeconômica de sistemas. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Univ. Est. Campinas, Campinas, 137 p.
- Cycle-Tempo : [www.mep.tno.nl](http://www.mep.tno.nl)
- Donatelli, J. L.; 1993, Análise termodinâmica da casa de força da Cia. Siderúrgica de Tubarão, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Engineering Equation Solver (ESS): [www.fchart.com](http://www.fchart.com)
- Evans, R.B.; 1980, Thermoeconomic isolation and essergy analysis. *Energy*, v. 5, p. 805-821.
- Frangopoulos, C.A.; 1983, Thermoeconomic Functional Analysis: a method for optimal design or improvement of complex thermal systems. Ph.D. Thesis, Georgia Inst. Techn., Atlanta.
- Frangopoulos, C.A.; 1987, Thermoeconomic functional analysis and optimization. *Energy*, v. 12, p. 563-571.
- Gallo, W. L. R.; 1990, Análise exérgica de motores a gasolina e a álcool; Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Guarinelo Júnior, F. F.; 1997, Avaliação termoeconômica de um sistema de cogeração proposto para um Pólo Industrial, Dissertação de Mestrado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Hubinger, M. D.; 1993, Modelagem, simulação e avaliação energética e exérgica de secadores de leito deslizante; Fac. Eng. Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- Keenan, J.H.; 1932, A steam chart for second law analysis. *Mech. Engin.*, v.54, p. 195-204.
- Lima, R. N.; 1991, Abordagem exérgica de sistemas de cogeração, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Leal, P.A. M.; 1997, Avaliação energética e exérgica de um sistema gerador de processos psicrométricos, Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Agrícola, Univ. Estadual de Campinas.
- Lozano, M.A., Valero, A.; 1993, Theory of the exergetic cost, *Energy*, Vol. 18, N° 9, pp 939-960.
- Pantalena, A.; 1997, Cogeração para laticínios de pequeno e médio portes. Dissertação de

- Mestrado, Fac. Engenharia, Unesp - Univ. Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá.
- Peres, C.A.; 1995, Desempenho de sistemas de combustão de lenha: aspectos conceituais e metodológicos, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Ribeiro, J.A.; 1988, Aplicação de processos de simulação e otimização no projeto de sistemas térmicos. Dissertação de Mestrado, Fac. Engenharia, Unesp, Campus de Guaratinguetá.
- Santo, D. B.E.; 1997, Análise energético e económico de um sistema de cogeração para um hospital, Dissertação de Mestrado, Fac. de Eng. Mecânica, Univ. Estadual de Campinas.
- Sciubba, E.; 1998, Toward automatic process simulators: Part I - Modular numerical procedures. *Journal Eng. Gas Turbines Power*, v. 120, p. 1-8, 1998; Part II - An expert system for process synthesis. *Idem*, p. 9-16.
- Serrate, Y.H.; 1993, Análise energética e exergetica de ciclos combinados TG/TV, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Silva, E; 1973, Simulação de sistemas frigoríficos com aplicação da análise exergetica, dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Silva, R. J.; 1994, Análise energética de plantas de produção de cimento Portland, Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Silveira, J. L.; 1990, Estudos de cogeração no contexto da produção de papel e celulose, Disertação de Mestrado, Esc. Fed. de Engenharia de Itajubá.
- Silveira, J.L.; 1998, Uma contribuição para a modelagem termoeconômica: otimização da operação e do projeto de sistemas energéticos. Tese (Livre Docência), Unesp, Campus de Guaratinguetá.
- SimTech Simulation Technology. On line document, URL: <http://www.SimTechnology.com/>.
- Souza,Z.; 1966, Estudo exergetico de trocadores de calor, publicação interna, Esc. Fed. Engenharia de Itajubá.
- Souza,Z.; 1967, Energia, exergia e anergia , publicação interna, Esc. Fed. Eng. de Itajubá.
- Souza,Z.; 1969, Conseqüências energéticas do II Princípio da Termodinâmica, publicação interna, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Teixeira, M. S.; 1995, Análise exergetica de processos de combustão, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Torres, E. A.; 1999, Avaliação exergetica e termoeconômica de um sistema de cogeração de um Pólo Petroquímico, Tese (Doutorado), Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Thermoflow Incorporation. On line document, URL: <http://www.thermoflow.com/>.
- Tsatsaronis, G.; 1993, Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy Combustion and Science*, v. 19, p. 227-257,.
- Tuna, C. E.; 1999, Um método de análise exergetica para otimização de sistemas energéticos. Tese (doutorado), Faculdade de Engenharia, Unesp, Guaratinguetá, 145 p.
- Valero, A., Lozano, M.A., Serra, L., Torres, C.; 1994, Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 365-381.
- Velásquez Alegre, J. A.; 1993, Simulação dos processos e análise exergetica do motor de ciclo Diesel; Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Vieira, S., 1998, "Estudo de configurações de sistemas térmicos de geração de energia elétrica através da análise de exergia e de termoeconomia", Dissertação de Mestrado, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Walter, A.C.S.; 1994, Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termoelétrica junto ao setor sucro-alcooleiro, Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

## METHODOLOGIES FOR THERMAL SYSTEMS ANALYSIS

### ROUND TABLE: SYMPOSIUM 1: ENERGETIC SYSTEM ANALYSIS

**José Antônio Perrella Balestieri**

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Energia - Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333. 12500-000, Guaratinguetá, SP, Brasil. E-mail: perrella@feg.unesp.br

**Luiz Augusto Horta Nogueira**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá / Agência Nacional do Petróleo, Rua Senador Dantas, 105, 13° andar. 20031-201, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: horta@anp.gov.br

**Silvia Azucena Nebra**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia. Cx. Ps. 6122. 13083-970- Campinas, SP, Brasil. E-mail: sanebra@fem.Unicamp.br

**Sílvio de Oliveira Júnior**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) - Agrupamento de Engenharia Térmica - Av. Prof. Almeida Prado, 532. 05508-901 - São Paulo, SP, Brasil. E-mail: olivsilj@ipt.br

**Waldyr Luiz Ribeiro Gallo**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia / Agência Nacional do Petróleo, Rua Senador Dantas, 105, 10° andar. 20031-201, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: wgallo@anp.gov.br

***Abstract:** This work presents a revision of the state of the art in Brazil and in the world of different aspects relatives to thermal system analysis. Subjects as analysis methodologies, including exergetic analysis, thermoeconomics and system optimisation, are discussed. The available softwares to apply the methodologies, are commented. The works done in this area in divers institutions of the country are mentioned. Some considerations on the teaching and application of the concepts of exergy and thermoeconomics in the under graduate, graduate and continued education courses, as tools for the analysis and optimisation of processes of energy conversion, are presented.*

***Keywords:** Energetic systems, exergy, thermoeconomics, optimisation.*