

## PLANEJAMENTO INTEGRADO DOS RECURSOS – UMA ANÁLISE EXERGÉTICA

José Márcio Costa<sup>1</sup>, Delly Oliveira Filho<sup>2</sup>, Jadir Nogueira da Silva<sup>3</sup>, Luiz Aurélio Raggi<sup>4</sup>

### RESUMO

Realizou-se este trabalho com o objetivo de indicar a análise exergetica como ferramenta do planejamento integrado dos recursos (PIR). O rendimento energético baseado somente no primeiro princípio da termodinâmica não leva em consideração a “qualidade” da energia utilizada. O rendimento baseado no segundo princípio da termodinâmica indica a capacidade máxima de realizar trabalho. Assim, o planejamento de sistemas de energia poderá obter o melhor resultado na associação do par recurso-uso final da energia.

**Palavras-chave:** exergetica, planejamento, energia.

### ABSTRACT

#### The Integrated Resources Planning – An Exergetic Analysis

Exergetic analysis was evaluated as a tool for integrated resources planning (IRP). The energy performance based only on the first principle of thermodynamics ignores the “quality” of the energy used. The performance based on the second principle of thermodynamics indicates the maximum capacity to carry out work. Thus, the optimum results can be obtained by planning energy systems combining resource and final use of energy.

**Palavras-chave:** exergy, planning, energy.

---

Recebido para publicação em 28.08.2006

<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Prof. Adjunto, Depto de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>2</sup> Eng. Eletricista, Prof. Adjunto, Depto de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>3</sup> Físico, Prof. Titular, Depto de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, Depto de Informática, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

## INTRODUÇÃO

A ambição desmedida por riqueza em nossa sociedade, dita moderna, tem sido incapaz de avaliar a resposta dada pelo meio ambiente. Respostas que necessitam da intervenção do homem para que as próximas gerações tenham qualidade de vida. As manifestações da natureza têm sido gritantes, pois, cada vez mais, as catástrofes naturais estão acontecendo no mundo: cidades inundadas, calor excessivo, neve em diferentes estações do ano, queimadas incontroláveis, escassez ou excesso de chuva, chuvas ácidas etc.

Em janeiro de 1992, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente – Rio 92, que, devido ao seu grande sucesso, veio comprovar a importância e o desejo de uma política ambiental consolidada e aplicada. A Rio 92 foi um marco mundial para promoção do meio ambiente e contou com a presença de representantes governamentais de 179 países, 18.000 participantes de 166 países e 450.000 visitantes (PNUMA, 2000).

A preocupação com a redução dos impactos ambientais e com o desenvolvimento sustentável reverteu-se em ações práticas da sociedade civil brasileira, como as da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2006). Definiu-se um texto preliminar de normas para certificação ambiental de produtos com a criação de um programa denominado “ABNT – Qualidade Ambiental”. Essa certificação tem como meta informar os consumidores sobre produtos que são menos agressivos ao meio ambiente (ABNT, 2006).

Outro grande exemplo é a “Lei Robin Hood” (Lei nº 12.040/95) do Estado de Minas Gerais, que favorece os municípios de menor porte e mais pobres com aumentos na quota-parte do ICMS (GOVERNO DE MINAS GERAIS, 1997). Em troca, esses municípios têm que investir em educação, saúde, agricultura, patrimônio cultural e preservação do meio ambiente. Os critérios para preservação do meio ambiente, com menor impacto sobre os recursos naturais, são a proteção legal das reservas ambientais, o tratamento de lixo e esgotos sanitários.

A abordagem sistêmica do Planejamento Integrado dos Recursos (PIR) envolve questões importantes sobre o suprimento da energia e a satisfação das necessidades dos consumidores com confiabilidade, economia financeira e a vertente questão ambiental. O

desenvolvimento sustentável e a minimização do impacto ambiental têm se tornado cada vez mais relevante em relação aos demais. Portanto, trata-se de uma abordagem que se inicia desde o recurso natural como reservas de energia, biomassa e potencial hidroelétrico até o uso final dado a energia. Também, projeta-se estratégias de integração das opções de ofertas energéticas do lado da demanda, ferramentas para explicar os custos econômicos, sociais e ambientais da conversão e do uso final dado à energia. As projeções são baseadas nos serviços de energia solicitados, considerando-se várias bases tecnológicas (tipos de equipamentos de conversão de energia, lâmpadas eficientes, motores de alto rendimento etc.) e fatores socioeconômicos (preço, renda, índice de aceitação de determinada tecnologia, hábitos de consumo etc.) (JANNUZZI & SWISHER, 1997).

O conceito de exergia pode se tornar parte do PIR na busca do par ideal, recurso x uso final, por avaliar a qualidade de energia e que uso final se faz dela. A análise exérgica baseia-se no primeiro e segundo princípios da termodinâmica, que valorizam e quantificam o conceito de *qualidade do uso da energia*, diferentemente do critério tradicional de medir apenas a eficiência (avaliação energética), o qual se baseia somente no primeiro princípio da termodinâmica, e que estabelece que a energia se conserva, mas nada aborda a respeito da sua qualidade (OLIVEIRA FILHO et al., 2000).

Vários setores da economia têm ignorado a análise exérgica no planejamento de sistemas. Acredita-se que isso é devido, principalmente, à falta de familiaridade com o segundo princípio da termodinâmica e às implicações decorrentes para avaliação precisa. Há variáveis e alguns fatores que não se encontram totalmente disponíveis no mercado e precisam ser estudados, daí a dificuldade. São eles: fatores tecnológicos de conversão da energia, informações sobre o uso final da energia, razões políticas e nível de conscientização sobre o segundo princípio da termodinâmica, exergia e suas implicações no planejamento, e sobre as diversas esferas de decisão da sociedade, tecnologia disponível, equipamentos eficientes e hábitos de consumo (COSTA & OLIVEIRA FILHO, 2000).

A análise exergética pode dar às instituições reguladoras do sistema energético nacional, instrumentos que auxiliem o mercado econômico a encontrar o equilíbrio entre o impacto ambiental e a utilidade necessária ao setor elétrico.

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a complementaridade da avaliação exergética no planejamento integrado dos recursos sobre o uso da energia.

## MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, constatou-se a importância da busca de índices de avaliação do uso da energia nos princípios da termodinâmica, esclarecendo sua significância pelo primeiro princípio da termodinâmica (PPT), também conhecido como *Lei da Conservação da Energia* e pelo segundo princípio da termodinâmica (SPT) que se baseia nos enunciados de Kelvin-Planck e Clausius.

De acordo com o enunciado de Kelvin-Planck, *é impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e da troca de calor com um único reservatório térmico*. Portanto, é impossível construir um motor térmico que, operando segundo um ciclo, receba uma quantidade de calor de um corpo com alta temperatura e produza igual quantidade de trabalho. Conforme o enunciado de Clausius *é impossível construir um dispositivo que opere segundo um ciclo e não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente*. (VAN WYLEN et al., 1998).

O fornecimento de trabalho, de acordo com o primeiro princípio da termodinâmica, gera calor, mas não esclarece o que é feito do calor que atravessa a fronteira. Pela análise energética é impossível mensurar a disponibilidade de energia do sistema capaz de gerar trabalho, conforme indicado pela equação 1

$$\text{Eficiência energética} = \frac{\text{Energia}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Energia}_{\text{DISPONÍVEL}}} \quad (1)$$

A energia é transferida para o meio ambiente, mas também ocorre aumento de pressão no gás, que aumenta sucessivamente a disponibilidade energética. O ar comprimido, expandido à temperatura ambiente, gera trabalho e retira do meio igual quantidade de calor. A diferença que torna marcante a análise exergética é a parte líquida transformável da energia em qualquer outra forma energética (equação 2)

$$\text{Exergia} = \alpha \text{ Energia} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

em que,

$\alpha$  = fração da energia convertível em trabalho útil.

A definição de exergia em geral é “a capacidade de realizar trabalho”. Esse conceito é fundamentado na relação entre as eficiências de PPT e SPT, por fatores de conversão energia/exergia, conforme indicado pela equação 3 (OLIVEIRA FILHO, 1995)

$$\frac{\varepsilon}{\eta} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (3)$$

em que,

$\varepsilon$  = Eficiência exergética;

$\eta$  = Eficiência energética; e

$\alpha_1$  e  $\alpha_2$  = Índices tecnológicos dos equipamentos e processos de conversão de energia.

A equação 3 indica que a análise exergética contém em si a análise energética. Contudo, não se pode falar que a análise exergética depende somente da energética. A eficiência do segundo princípio da termodinâmica depende também dos índices tecnológicos dos equipamentos e processos de conversão de energia (fração da energia convertível em trabalho útil, conforme a equação 2).

A equação 4 indica como na análise exergética calcula-se a eficiência exergética.

$$\varepsilon = \frac{\text{Trabalho}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Trabalho}_{\text{DISPONÍVEL}}} = \frac{\text{Exergia}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Exergia}_{\text{DISPONÍVEL}}} \quad (4)$$

Pode-se atribuir aos rendimentos energéticos e exergéticos pesos diferenciados, segundo ambos os princípios da termodinâmica, para a tomada de decisões no PIR (ALMEIDA NETO, 1999). O peso atribuído a cada parcela dos rendimentos utilizados será em função da importância que os mecanismos reguladores darão aos usos quantitativos e qualitativos da energia, sendo assim, seria possível escolher o melhor par recurso-uso final da energia.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, analisou-se a avaliação do rendimento energético pelo primeiro princípio da termodinâmica, que não leva em consideração a “qualidade” da energia utilizada. Já o segundo princípio da termodinâmica, auxilia na determinação prática da utilização da energia, determinando-se, assim, a qualidade, que pode ser distinguida entre as várias formas de energias pelo rendimento da segunda lei da termodinâmica.

Segundo CIMBLERIS (1979), no conceito de exergia a “capacidade máxima de uma substância de executar trabalho em processos, cuja condição final seja o

equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente”, deve ser evidenciada.

Como resultado deste trabalho, demonstrou-se o exemplo do chuveiro para aplicação das análises energética e exergética. Consideraram-se a potência do chuveiro ( $P = 4400 \text{ W}$ ), as temperaturas inicial e final da água (Figura 1), e a vazão da água ( $0,05 \text{ L/s}$ ).

A eficiência energética ( $\eta$ ) de primeira lei foi calculada pelas equações 5 e 6, demonstrando a relação entre a energia útil (água aquecida) e a energia fornecida (energia elétrica)

$$\eta = \frac{\text{Energia útil (calor)}}{\text{Energia fornecida (eletricidade)}} = \frac{Q}{W} = \frac{q \rho c_p (T_2 - T_1)}{W} \quad (5)$$

em que,

$q$  = Vazão de água do chuveiro, L/s;

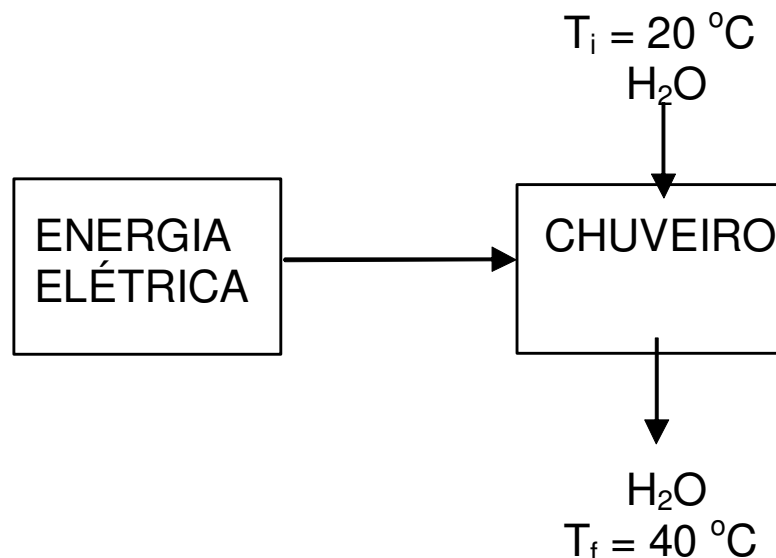
$\rho$  = Massa específica, kg/L;

$c_p$  = Calor específico da água, J/kg K;

$T_2$  e  $T_1$  = Temperatura de saída e de entrada da água no chuveiro, K e

$W$  = Potência do chuveiro utilizado, W.

$$\eta = \frac{Q}{W} = \frac{0,05 \cdot 4,2 \cdot (40 - 20) \cdot 1000}{4400} = 0,95 = 95\% \quad (6)$$



**Figura 1.** Esquema de um chuveiro alimentado com energia elétrica

**Quadro 1.** Rendimento do chuveiro elétrico pelo primeiro e segundo princípio da termodinâmica

Equipamento	Rendimento (%)	
	PPT ( $\eta$ )	SPT ( $\epsilon$ )
Chuveiro elétrico	95,0	6,27

A eficiência exergética entre as duas fontes de calor foi calculada pelo ciclo de Carnot, conforme as equações 7 e 8. O trabalho disponível considerado para energia elétrica foi de 97%, “performance” de motores de alto rendimento elétrico de alta potência.

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \frac{20}{313} = 0,0638 \cong 6,4\% \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{\text{Trabalho}_{\text{UHL}}}{\text{Trabalho}_{\text{DISPONÍVEL}}} = \frac{\eta_{\text{Carnot}} \eta_{\text{A}_{\text{H}_2\text{O}}}}{\eta_{\text{EE} \rightarrow \text{Trabalho}}} = \frac{(64)(0,95)}{0,97} = 62,7\% \quad (8)$$

em que,

$\eta_{\text{Carnot}}$  = Eficiência do ciclo de Carnot utilizando as temperaturas de saída e entrada do chuveiro;

$\eta_{\text{A}_{\text{H}_2\text{O}}}$  = Eficiência do chuveiro elétrico para aquecimento de água; e

$\eta_{\text{EE} \rightarrow \text{Trabalho}}$  = Eficiência de motores elétricos de alto rendimento utilizando a mesma energia elétrica fornecida ao chuveiro para aquecimento d’água.

No Quadro 1, mostram-se os rendimentos do primeiro e segundo princípios da termodinâmica.

Os resultados foram bem distintos nas avaliações de rendimento pelo primeiro e segundo princípios da termodinâmica. Tal diferença evidenciou que, as análises de eficiência têm grande complementaridade nas avaliações do melhor recurso e serviço que utilizam energia para determinado uso final.

## CONCLUSÕES

- Se nos sistemas atuais de planejamento o direcionamento recurso-uso final da energia baseia-se somente no primeiro princípio da termodinâmica, fica claro que no planejamento integrado dos recursos, este poderá ser melhorado se também a energia

for medida pela qualidade de seu uso final, conforme o segundo princípio da termodinâmica, e não somente pela quantidade.

- O desafio do desenvolvimento sustentável e a preocupação ambiental têm gerado a consciência ecológica que estabelece um novo padrão de planejamento para a sociedade. O índice de rendimento da análise exergética pode passar a ser parâmetro para as ONG’s ambientalistas e defensoras da Terra e comissões de defesa do meio ambiente, visando avaliar o impacto ambiental do par recurso-uso final.

- Considerando-se as perspectivas de uma estratégia de planejamento integrado dos recursos, a eficiência de processos poderá ser quantificada pelos dois princípios da termodinâmica: pelas eficiências energéticas e exergéticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas – <http://www.abnt.org.br>. Agosto/2006.

ALMEIDA NETO, J. F. **Análise exergética do ciclo do combustível nuclear – Etapa da mineração até a obtenção do concentrado de urânio (“Yellow Cake”)**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1999. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.

CIMBLERIS, B. **Uma introdução à energia disponível e conceitos correlatos**. Belo Horizonte: UFMG, 1979. 116p. (Apostila do curso de pós-graduação em engenharia térmica).

COSTA, J. M.; OLIVEIRA FILHO, D. Tarifas exergéticas horo-sazonais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3 - AGRENER 2000. **Anais...** Campinas, SP. (CD-ROM).

GOVERNO DE MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **ICMS ecológico – Coletânea de normas**. Belo Horizonte, julho/1997. 51p.

JANNUZZI, G.M.; SWISHER, J.N.P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. Campinas, SP: Ed. Autores Associados, 1997. 246p.

OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics**. Quebec, 1995, 199p. Thesis (Doutorado) – McGill University, Montreal, 1995.

OLIVEIRA FILHO, D.; TANABE, C.S.; COSTA, J.M. Considerações da análise exérgica em tarifas de energia elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n.1, p. 114-119, 2000.

PNUMA, 2000. <http://www.rolac.unep.mx>. Dezembro/2000.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998. 537p.