

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS EFICIENTES EM VIÇOSA

ENERGETIC AND EXERGÉTIC ANALYSIS OF THE EFFICIENT ELECTRIC EQUIPMENT ADOPTION IN VIÇOSA

¹Cristhian Lao Vorobieff

²Delly Oliveira Filho

Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário, Viçosa, MG, 36571-000.

¹ crikalao@yahoo.com.br,

² delly@ufv.br

RESUMO

O impacto de uma medida da melhoria do desempenho (MD) no setor residencial de sistemas de energia elétrica é investigado em níveis diferentes como, os dispositivos elétricos que estão sendo melhorados, o cliente, os aparelhos elétricos e de gás/óleo, as companhias que fornecem eletricidade e sobre tudo, os recursos naturais. A atenção especial é dada para se avaliar a influência de ganho de calor devido aos efeitos cruzados no aquecimento e na refrigeração de ambientes. O impacto de uma medida de MD é examinado dos pontos da vista dos primeiro e segundo princípios da termodinâmica para várias medidas de MD, vários tipos de geração, e alternativas de aquecimento de ambiente.

Palavras-Chave: Energia, exergia, princípios da termodinâmica, climatização, dispositivos elétricos eficientes.

ABSTRACT

The impact of a measure of the improvement of the performance (IP) in the residential sector of systems of electric energy is investigated in different levels like, the electric devices themselves whose levels are being improved, the customer, the electrical and gas utilities and the natural resources. The special attention is given to the influence of profit of heat due to cross-effects in the heating and loads the refrigeration. The impact of a measure of IP is examined of the points of the sight of first and as the principles of the thermodynamics for some measures of IP, some types of generation, and alternatives of environment climatization.

Keywords: Energy, exergy, principles of the thermodynamics, climatization, efficient electric devices.

1 - INTRODUÇÃO

O Gerenciamento do Lado da Demanda, GLD é definido como medidas de racionalização do uso de energia elétrica do lado das cargas. Essas medidas podem ser tomadas tanto pelos consumidores, pelas concessionárias, como pelo Estado. O GLD é reconhecido pelas concessionárias de energia elétrica e pela sociedade como uma alternativa atrativa à expansão de sistema e como um recurso a ser planejado (RABL, 1991). Em 1990, Latorre et al estudaram a aplicação de técnicas de GLD no setor industrial, e concluíram que o custo da energia elétrica conservada foi estimado entre 12 e 21 US\$/MWh em comparação com o custo marginal da expansão que foi estimado em cerca de 62 US\$/MWh. Similarmente, um estudo realizado em British Columbia (HENRIQUES, 1992) indicou que o custo de um programa de GLD foi de 11 US\$/MWh comparado a 33 US\$/MWh para gerar a energia equivalente com as usinas novas. Uma medida importante de GLD, conhecida como a melhoria do desempenho (MD) (TALUKDAR E GELLINGS, 1987), consiste na utilização de equipamentos elétricos mais eficientes. Essas medidas podem ser implementadas por

meio de programas de incentivo para a substituição e adoção de equipamentos elétricos mais eficientes. Exemplos de medidas de MD são: (i) substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas compactas fluorescentes, (ii) instalação de aquecedores de água eficientes e (iii) uso de motores elétricos mais eficientes.

As medidas da melhoria do desempenho pelo GLD não podem ser avaliadas somente considerando a redução da energia no nível do equipamento que está sendo substituído, posto que a redução da energia ocorre em todo o sistema de energia. O modelo geral, desenvolvido para o estudo e o projeto de sistemas de energia genéricos (ver Figura 1), consiste em oito níveis básicos interconectados básicos: os recursos naturais (RN), os transportes dos recursos naturais (TR), as refinarias e processamento do combustível (RE), o transporte do combustível refinado (TC), as usinas de energia elétrica (U), a transmissão de energia elétrica (LT), os equipamentos da conversão da energia (CE) e os usos finais (EU) (OLIVEIRA e GALIANA, 1994). Assim, ao se executar uma medida de MD para determinado equipamento da conversão de energia, também será influenciado o sistema de energia em todos

os níveis de recursos naturais. Similarmente, uma medida de MD afetará o consumo da energia por outras cargas, no mesmo nível, devido ao fenômeno conhecido como efeitos cruzados. Um exemplo típico dos efeitos cruzados é o impacto de melhorar o desempenho de todos os equipamentos internos de conversão da energia no aquecimento de ambiente e nas necessidades de refrigeração de uma moradia. Em um estudo conduzido por uma instituição canadense (MOREAU e STRICKER, 1994), foi relatado que, para um dado tipo de casa em Montreal, um aquecedor de água mais eficiente economiza 438kWh/ano, mas somente 42% desta redução da energia está sendo realizada na moradia ou no cliente. Isto é, em consequência da maior eficiência do aquecedor de água, menos calor está sendo liberado dentro do ambiente e portanto, as exigências de

aquecimento do espaço aumentam por 291 kWh/ano durante o período de aquecimento. Do mesmo modo, as exigências do condicionamento de ar diminuem por 38 kWh/ano durante o período de refrigeração. Fora do período de refrigeração ou de aquecimento, a energia conservada não afeta significativamente outras cargas relacionadas ao calor. Nota-se que, se isto se propagar, a redução da energia líquida na moradia, como também os recursos naturais e os benefícios acumulados podem ser consideravelmente mais substanciais, dependendo do tipo de geração de energia. Este exemplo ilustra a necessidade de se analisar o impacto de medidas de MD numa perspectiva maior nos diferentes níveis, isto é, do equipamento, do cliente, concessionárias e/ou distribuidoras de energia e do recurso natural

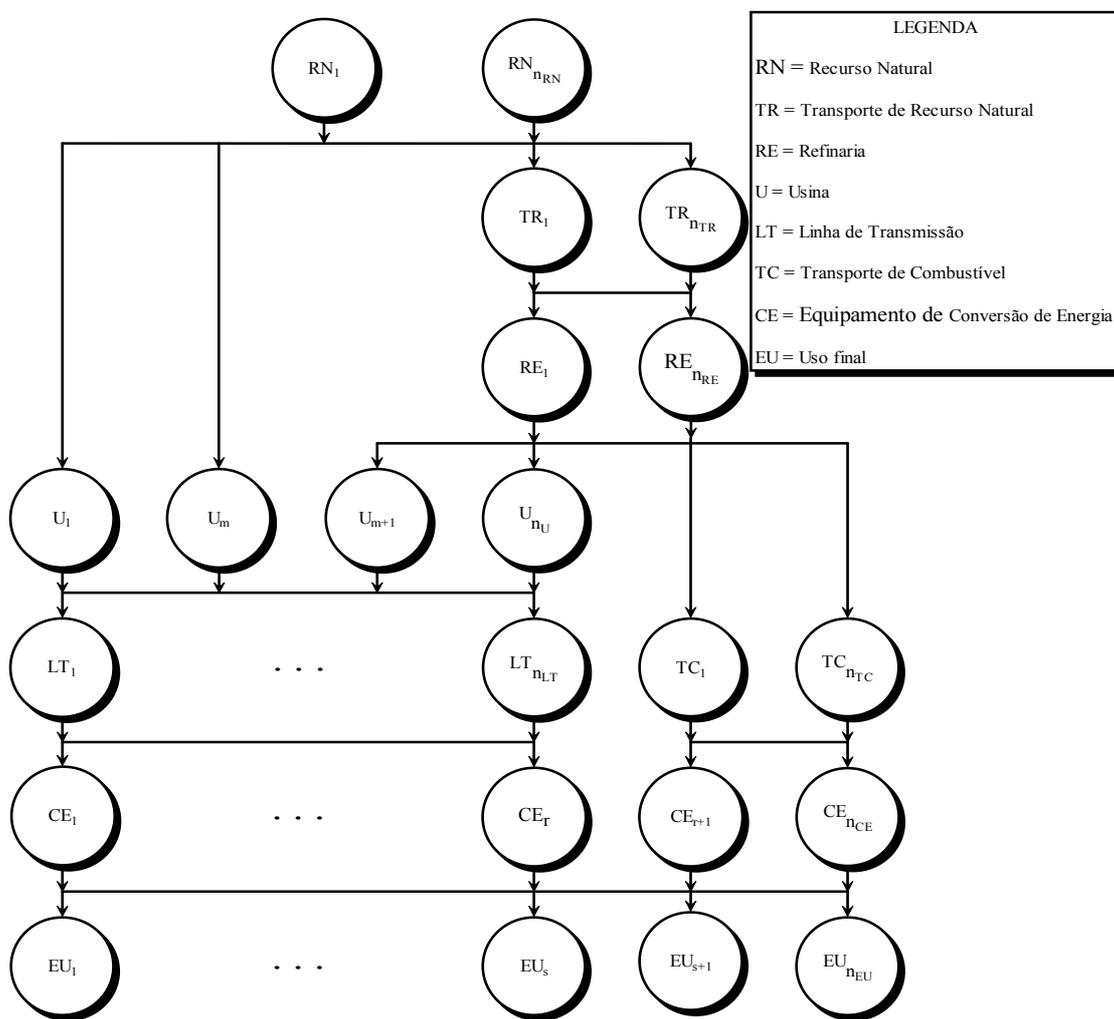


Figura 1: Composição de um sistema energético com diversos recursos naturais, etapas de transformação e usos finais para a energia.

Uma razão importante para desenvolver amplas perspectivas de analisar estratégias de GLD é que ela deve fornecer um planejamento anual com meios mais sistemáticos de avaliar e de dar prioridade a alternativas diferentes de MD. Esta avaliação é baseada em critérios como: aspectos econômicos, confiabilidade do sistema,

impacto ambiental, benefícios sociais e eficiência do sistema total. Neste contexto, discute-se que a interpretação da eficiência do sistema deve ser expandida, para explicar não somente a eficiência energética no sentido convencional, mas também para a

eficiência exergetica que é relacionada à “qualidade” da energia (OLIVEIRA e GALIANA, 1994).

A análise exergetica é derivada do segundo princípio da termodinâmica. O termo exergia, conhecido também como exegia, é a disponibilidade, a energia livre e a energia útil (WEPFER, 1979) e vem do grego, significando o trabalho disponível. A exergia representa a habilidade de uma forma de energia ser convertida em trabalho. Por exemplo, o calor de baixa temperatura tem um índice muito baixo de exergia, em contraste à eletricidade ou ao trabalho mecânico, que tem um índice exergetico elevado, desde que seja mais eficientemente convertida em outras formas de energia. Essencialmente, o máximo de reversibilidade de uma forma de energia, o máximo da qualidade que é lhe atribuída, pode ser assim determinado. No contraste à energia, que nunca pode ser destruída, certa quantidade de exergia sempre é perdida irreversivelmente durante todo o processo da conversão da energia, e é importante minimizar a destruição irreversível deste recurso.

A importância prática da análise exergetica torna-se mais aparente ao comparar os sistemas ou os processos de conversão da energia, que têm as eficiências energéticas iguais, mas que pode substancialmente diferir em suas eficiências exergeticas. No planejamento do sistema de energia e na avaliação de estratégias de GLD, a eficiência exergetica deve ser considerada pelo menos como um fundamento igual com suas contrapartes energéticas. Essencialmente, a exergia é um escasso e valioso recurso e deve ser tratado como tal.

Embora a importância da análise exergetica seja reconhecida na termodinâmica desde o terceiro quarto do século XIX (MAXWELL, 1871) e sua aplicação atentamente considerada na engenharia mecânica (KAYGUSUZ e AYHAN 1993, NIEUWLAAR 1993, KLENKE 1991, BOUSTEAD e HANCOCK 1979), o projeto e o planejamento de sistemas de energia elétricos ignora virtualmente o conceito da exergia.

2 - OBJETIVOS

O objetivo deste artigo é analisar energética e exergeticamente o impacto de medidas da melhoria do desempenho pelo Gerenciamento do Lado da Demanda no equipamento, no cliente, nos equipamentos de condicionamento de ar, no consumo de energéticos e nos níveis dos recursos naturais.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Modelo de Sistema de Energia

No planejamento de um sistema de energia elétrica é essencial ter uma compreensão clara do comportamento de todo o processo de conversão de energia dos recursos naturais até seus usos finais. Pode-se compreender o modelo geral do sistema (ver Figura 1) observando a entrada e saída de energia de cada um dos elementos de conversão, em cuja interconexão são modeladas tanto energia quanto exergia.

3.2. Descrição geral do modelo

Utiliza-se o modelo geral desenvolvido para um sistema de energia arbitrário (ver Figura 1). Diversas formas de recursos naturais podem ser consideradas no modelo como o energético, hidroeletricidade, nuclear, o gás natural, o carvão, o óleo cru e a energia solar. Estes recursos alimentam os diferentes tipos das refinarias ou abastecem as usinas de processamento de combustível, que, por sua vez, fornecem às usinas de energia elétrica ou aos sistemas de distribuição de combustível. Determinados tipos de recursos naturais (ver Figura 1), por exemplo, hidro, solar e vento, alimentam diretamente as usinas de energia e contornam o transporte e os passos de processamento de combustível. As usinas geradoras de energia fornecem a eletricidade ao sistema da transmissão e distribuição, que é conectado aos vários tipos de equipamentos elétricos da conversão da energia (por exemplo: motores elétricos, sistemas de iluminação, aquecimento, transporte, comunicação e eletrônicos). Similarmente, os sistemas da distribuição de energia são ligados aos equipamentos não elétricos de conversão de energia (por exemplo: aquecimento de ambiente direto, processos industriais e transporte). O modelo permite a classificação de equipamentos de conversão de energia em classes mais refinadas. Por exemplo, pode diferenciar-se entre vários tipos de sistemas de aquecimento de ambiente (por exemplo: aquecedor elétrico, bomba de calor ar-ar e fornalha central a gás) ou de iluminação (por exemplo: incandescente, fluorescente). Finalmente, todos estes equipamentos suprem os usos finais, cujas variáveis são consideradas independentes do modelo (BROEHL, 1987). Os usos finais principais da energia incluem a tração, a iluminação e o aquecimento. O uso final aquecimento pode ser classificado em: aquecimento de ambiente, cozimento de alimentos, aquecimento de água e passar roupa, entre outros. Os usos finais podem também ser classificados por setores (residencial, comercial, industrial ou institucional). Em todos os vários estágios da transformação de energia, desde os recursos naturais até os usos finais, o modelo é, conseqüentemente, caracterizado como comportamento de um sistema de energia arbitrário.

Nota-se que, a linha horizontal atua como um barramento onde é feito o exame das entradas e que as distribui entre suas saídas (ver Figura 1), de acordo com um esquema especificado da distribuição. Por exemplo, a linha sob as refinarias (RE) faz exame dos combustíveis refinados (por exemplo, óleo, combustível nuclear, gás) e expede uma proporção de cada combustível às usinas de força (U) ou ao sistema do transporte e de distribuição do combustível (TC).

3.3. O elemento básico do modelo da conversão da energia

Para compreender como um modelo da energia é construído, considera-se primeiramente um elemento básico arbitrário da conversão da energia (ver Figura 2).

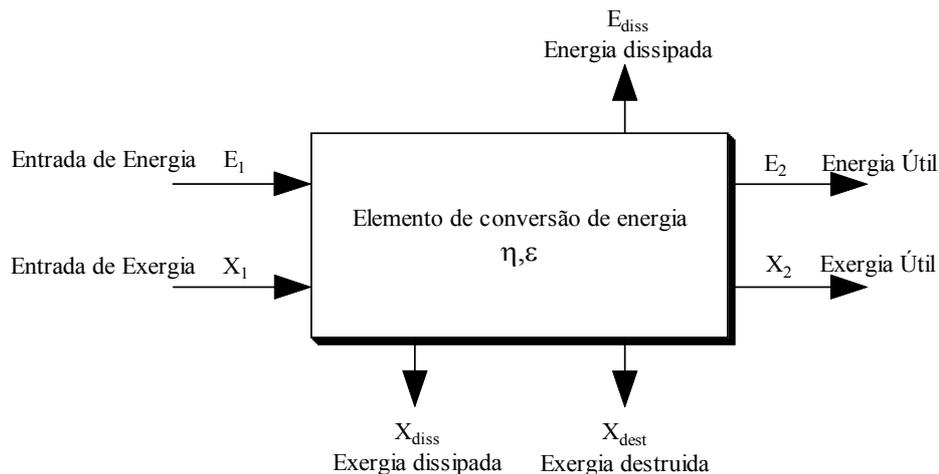


Figura 2: Elemento básico de conversão da energia.

As seguintes relações são válidas (ver Figura 2),

$$E_2 = \eta E_1 \quad (1)$$

$$X_2 = \varepsilon X_1 \quad (2)$$

em que

E_1, E_2 = entrada e saída anuais de energia do equipamento de conversão de energia, respectivamente;

X_1, X_2 = entrada e saída anuais de exergia de equipamento de conversão de energia, respectivamente;

η = eficiência energética;

ε = eficiência exergetica.

Desde que a energia seja conservada, tem-se que:

$$E_1 = E_2 + E_{diss} \quad (3)$$

A energia dissipada na forma de calor ao ambiente é

$$E_{diss} = E_1 - E_2 = (1 - \eta) E_1 \quad (4)$$

Por outro lado, a exergia em geral não é conservada na maioria dos processos de conversão, de modo que

$$X_1 \geq X_2 + X_{diss} \quad (5)$$

onde X_{diss} é a quantidade da exergia da energia dissipada geralmente sob a forma de calor à baixa temperatura. A destruição irreversível da exergia, X_{dest} , que ocorre é dada por

$$X_{dest} = X_1 - X_2 - X_{diss} = (1 - \varepsilon) X_1 - X_{diss} \quad (6)$$

Além disso, em todo processo é possível estimar que a fração da energia da entrada (α_1) e a da saída (α_2) podem ser convertidas em trabalho disponível (exergia). Então,

$$X_k = \alpha_k E_k, \quad k = 1, 2 \quad (7)$$

Por causa de (1), (2) e (7), é necessário que as eficiências energéticas e exergeticas satisfaçam à relação

$$\frac{\varepsilon}{\eta} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (8)$$

OLIVEIRA e GALIANA (1995) listaram valores das eficiências de acordo com o primeiro e o segundo princípios da termodinâmica (η, ε), bem como a fração da energia da entrada (α_{ent}) e da saída (α_{sai}) que pode ser convertida para trabalho. Por exemplo, para um aquecedor elétrico de ambiente de 1 kW, com a entrada sendo eletricidade e a saída calor a 20°C, α_1 é aproximadamente 95% (baseado na melhor eficiência de um motor elétrico) enquanto que α_2 é 6,8% (baseado no ciclo ideal de Carnot, eficiência com temperatura 20 e 0°C). Como se pode considerar que um aquecedor elétrico é 100 % eficiente energeticamente, sua eficiência exergetica (ε) será de $100 * 6,8 / 95 = 7,2\%$. Conseqüentemente, visto que 100% da energia da entrada é convertida a uma saída útil na forma de calor, este processo destrói 92,8% da exergia de entrada.

3.4. Modelo de efeitos cruzados

Neste subsistema de uso de energia, incluindo o equipamento de conversão de energia e o sistema de climatização de ambiente, com possibilidade de aquecimento e resfriamento (ver Figura 3), os equipamentos de conversão de energia estudados foram os refrigeradores eficientes e ineficientes (R_e, R_i) e o sistema de iluminação eficiente e ineficiente (I_e, I_i), respectivamente. O resfriamento foi feito por meio de sistema de condicionamento de ar eficiente e ineficiente (AC_e, AC_i), e o aquecimento ambiental (A_e, A_g) por meio de resistências elétricas e/ou de aquecimento a gás, respectivamente

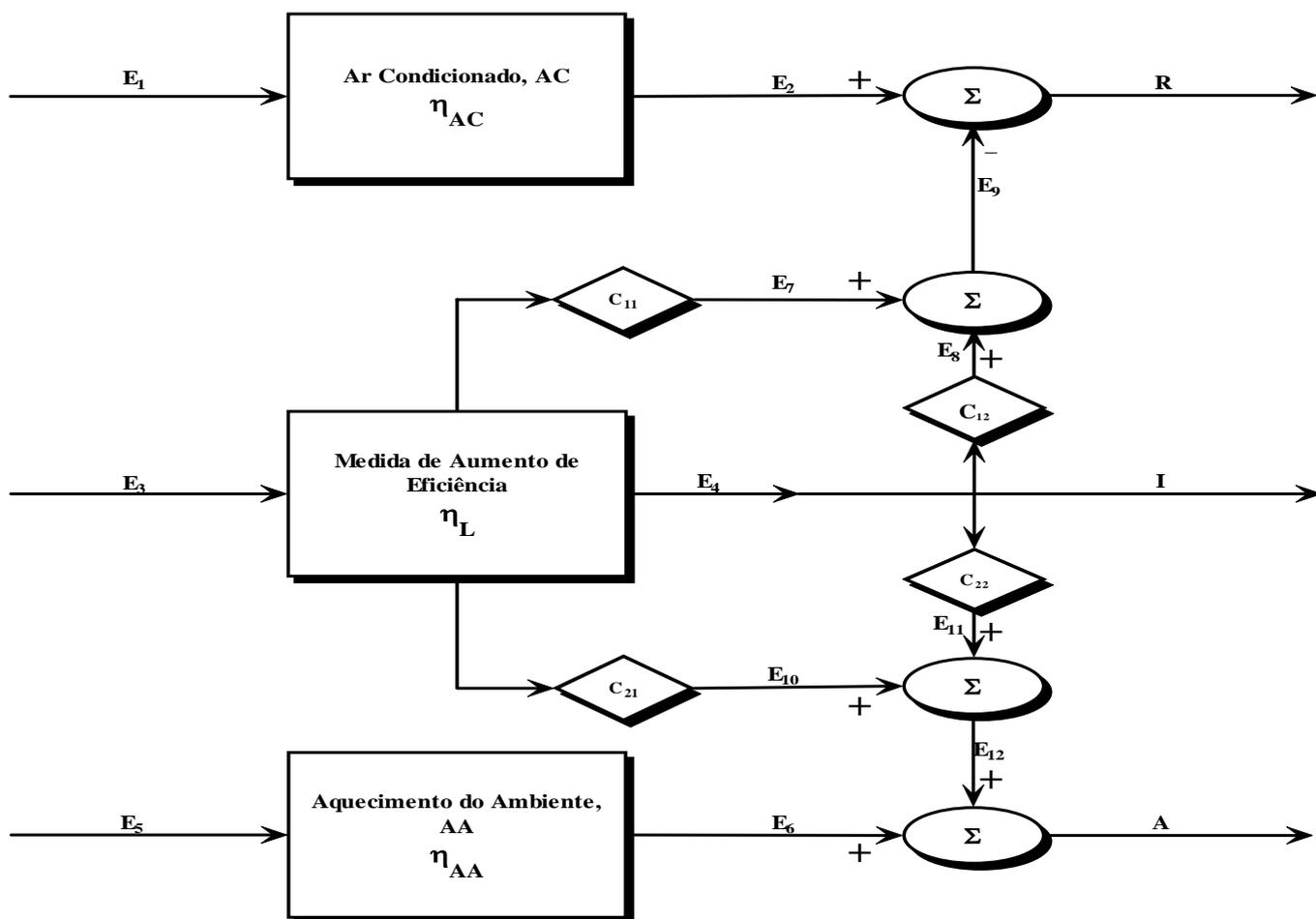


Figura 3: Subsistema típico de uso de energia, incluindo equipamento de conversão contendo efeitos cruzados.

Analisando o sistema (ver Figura 3), percebe-se que uma variação no rendimento dos equipamentos de conversão de energia acarretará em uma mudança nas cargas térmicas de aquecimento e de resfriamento. A esta mudança dá-se o nome de efeito cruzado.

O efeito cruzado será função:

- (i) Da medida de uso eficiente de energia considerada;
- (ii) Do tipo de análise energética e ou exérgica;
- (iii) Do nível de análise, ou seja, consumidor, equipamento, concessionária e recurso natural;
- (iv) Das condições ambientais, ou seja, do clima do local; e
- (v) Da época do ano.

Neste exemplo, apenas as quantidades de energia são indicadas. Um conjunto similar de variáveis e relações aplicam-se ao balanço da exérgia. As relações de entrada/saída de cada elemento da conversão da energia acarretam as seguintes equações (ver Figura 3),

$$E_2 = \eta_{AC} E_1 \quad (9)$$

$$E_4 = \eta_L E_3 \quad (10)$$

$$E_6 = \eta_{AA} E_5 \quad (11)$$

Verifica-se que E_2 é a saída do condicionador de ar (AC) e E_9 é o efeito cruzado líquido no AC, devido aos efeitos de aquecimento do processo de refrigeração. Nitidamente, para um uso final de refrigeração do ambiente, R, o impacto do

efeito cruzado, E_9 , é forçar em um aumento na saída de energia do AC, E_2 . O impacto do efeito cruzado na refrigeração, E_{12} , é diminuir a saída do aquecedor de ambiente, E_6 , a fim adequar o uso final do aquecimento A. Os efeitos cruzados energias de E_9 e E_{12} , têm dois componentes,

$$E_9 = E_7 + E_8 \quad (15)$$

$$E_{12} = E_{10} + E_{11} \quad (16)$$

O componente E_7 é uma fração de c_{11} que são as perdas de refrigeração do equipamento durante o período de refrigeração, enquanto E_{10} for uma fração de c_{21} das perdas do refrigerador durante o período de aquecimento, assim:

$$E_7 = c_{11} (1 - \eta_L) E_3 \quad (17)$$

$$E_{10} = c_{21} (1 - \eta_L) E_3 \quad (18)$$

Do mesmo modo, E_8 e E_{11} representam, respectivamente, as frações do uso final da refrigeração do verão e do inverno, que são convertidas em calor e afetam os usos finais do aquecimento e resfriamento do ambiente. O c_{ik} destas frações é estimado no modelo estatístico desenvolvido por agências governamentais (MOREAU e STRICKER, 1994). Deve-se observar que $E_7 + E_{10}$ devem ser menores do que as perdas de carga de refrigeração anual total, $(1 - \eta)E_3$, devido ao fato que algumas perdas ocorrem fora do período de refrigeração ou de aquecimento. Similarmente, $E_8 + E_{11}$ deve ser menor que a refrigeração. A perda de calor produzida pelo refrigerador

não tem nenhum efeito em cargas relacionadas ao calor fora dos períodos que demandem refrigeração ou aquecimento.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Impacto no Sistema com Estratégias da Melhoria do Desempenho pela GLD

4.1. Descrição do estudo de caso

Nesta seção, um estudo de caso representativo é discutido incluindo:

(1) o impacto da estratégia da melhoria GLD do desempenho em vários níveis de sistemas, mais especificamente, cliente, serviço público e sobretudo recursos naturais;

(2) o impacto desta medida de MD nos termos da redução da energia e da energia da exergia nos vários níveis de sistemas;

(3) o impacto dos efeitos cruzados em cargas relacionadas ao conjunto térmico;

(4) os impactos da medida de MD sob configurações de sistema diferentes. Estes consistem em várias combinações de recursos naturais, de usinas de geração de energia, de refinarias e de equipamentos de aquecimento e resfriamento de ambiente.

A suposta redução de energia ao nível do equipamento é devido à execução de duas alternativas diferentes da Melhoria de Desempenho (ver Tabela 1); em outras palavras, devido à introdução no nível residencial de uma iluminação e refrigeradores mais eficientes. Estes dados de energia, calculados com base em dados do INMETRO, representam o previsto para os valores de exergia.

Redução da energia no nível do equipamento, em kWh/ano

Medida de Melhoria do Desempenho	Energia	Exergia
MD-1 Refrigerador Eficiente	60,83	57,79
MD-2 Troca de Lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas	189,48	180,00

Tabela 1: Redução energética e exergética no nível do equipamento
Fonte: Adaptado INMETRO 2000.

A redução anual de energia acima mostrada é somente para os equipamentos, isto é, sem considerar efeitos cruzados. A redução exergética mostrada (ver Tabela 1), é baseada na suposição que 95% da redução da energia poderia ser convertido no trabalho, através de um motor elétrico eficiente. Para avaliar o impacto de medidas de Melhoria de Desempenho, nos vários níveis de um sistema de energia (equipamento, cliente, serviço público e recursos naturais), oito configurações de sistema foram estudadas como descrito (ver Tabela 2). Estas configurações de sistema incluem dois tipos de fontes para geração de energia elétrica: hidráulica e térmica; e dois tipos de equipamentos de aquecimento de ambiente: o elétrico, considerado ser 100% eficiente, e um aquecedor direto

a gás com eficiência de 81%. Estas configurações foram selecionadas porque são tipos representativos da geração e de aquecimento ambiental. Outras alternativas do aquecimento do ambiente mais comuns em outras localidades, tais como, a bomba de calor ar-ar ou terra-ar não foram considerados neste trabalho.

As reduções da energia ao nível do cliente são definidas pela redução anual líquida da energia equivalente em kWh, do aquecimento e por equipamentos de refrigeração incluindo efeitos cruzados. Finalmente, as reduções de energia ao nível do serviço público, junto com as reduções anteriormente citadas, definem a redução líquida da energia ao nível do recurso natural.

Equipamento Considerado

Tipo	Geração	Aquecimento Espacial	Ar Condicionado
C ₁	Hidrelétrica	Resistência elétrica	Eficiente
C ₂			Ineficiente
C ₃		Gás	Eficiente
C ₄			Ineficiente
C ₅	Termelétrica	Resistência elétrica	Eficiente
C ₆			Ineficiente
C ₇		Gás	Eficiente
C ₈			Ineficiente

Tabela 1: Redução energética e exergética no nível do equipamento
Fonte: Adaptado INMETRO 2000.

4.2. A avaliação das medidas de Melhoria de Desempenho

Os resultados da simulação obtidos para os casos estudados e definidos na seção anterior (ver Tabelas 3 e 4). As Tabelas contêm oito linhas, cada uma correspondendo à uma configuração de sistema, (ver Tabela 2). Além disso, as colunas de cada Tabela indicam a redução da energia em níveis diferentes do sistema. Finalmente, para cada medida de aumento do desempenho listado (ver Tabela 1), duas Tabelas são mostradas, um para a energia e outra para a redução da exergia.

Os vários resultados mostrados nestas Tabelas são analisados de acordo com os seguintes pontos:

- (a) Impacto dos efeitos cruzados;
- (b) Comparação da redução da energia em níveis e em configurações diferentes do sistema;
- (c) Comparação da redução energética e exergetica da energia;

- (d) Comparação de diferentes medidas da melhoria de eficiência.

5 - DISCUSSÃO

5.1. Impacto energético dos efeitos cruzados em diferentes níveis e configurações de sistema

Como discutido na seção 2, devido à influência dos efeitos cruzados no aquecimento e em cargas refrigeração, a redução da energia líquida no nível da moradia difere significativamente da redução da energia no nível do equipamento. A fim de discutir este ponto, (ver Tabela 3), que mostra a redução da energia com a medida de MD “refrigerador eficiente”. As seguintes observações podem ser feitas:

Configuração	Redução da energia equivalente em kWh/ano						
	Equipamento “refrigerador eficiente”	Redução da carga de ar-condicionado	Aquecimento Espacial	Residência	Concessionária de Energia Elétrica	Distribuidora de Gás	Recurso Natural
C1	60,83	2,3	-19,7	43,4	45,7	-	46,2
C2	60,83	3,4	-19,7	44,6	46,9	-	47,4
C3	60,83	2,3	-24,3	38,8	66,4	-25,6	41,5
C4	60,83	3,4	-24,3	40,0	67,6	-25,6	42,8
C5	60,83	2,3	-19,7	43,4	124,1	-	125,4
C6	60,83	3,4	-19,7	44,6	127,4	-	128,7
C7	60,83	2,3	-24,3	38,8	180,3	-25,6	156,6
C8	60,83	3,4	-24,3	40,0	183,6	-25,6	159,9

Tabela 3: Impacto energético em níveis diferentes do sistema para a Melhoria de Desempenho “refrigerador eficiente” para Viçosa, MG.

Configuração	Redução da exergia equivalente em kWh/ano						
	Equipamento “refrigerador eficiente”	Redução da carga de ar-condicionado	Aquecimento Espacial	Residência	Concessionária de Energia Elétrica	Distribuidora de Gás	Recurso Natural
C1	57,79	2,4	-21,1	39,1	41,6	-	42,0
C2	57,79	3,7	-21,1	40,3	42,9	-	43,3
C3	57,79	2,4	-25,6	34,7	64,0	-28,3	36,4
C4	57,79	3,7	-25,6	35,9	65,4	-28,3	37,7
C5	57,79	7,1	-61,1	3,8	11,5	-	11,8
C6	57,79	10,7	-61,1	7,4	22,6	-	23,1
C7	57,79	7,1	-25,6	39,3	199,3	-28,3	174,8
C8	57,79	10,7	-25,6	42,9	210,4	-28,3	186,1

Tabela 4. - Impacto exergetico em níveis diferentes do sistema para a Melhoria de Desempenho “refrigerador eficiente”.

(i) Por causa dos efeitos cruzados, as reduções energéticas líquidas do cliente (residência) são consideravelmente menores do que a do equipamento. A escala energética da redução do consumo de energia do cliente é de cerca de 41,9 % a 135,5 % em relação à eficiência do equipamento dependendo da configuração de sistema.

(ii) A coluna 2 indica a redução no consumo de energia no nível do equipamento. A coluna 3 mostra a redução da energia na carga de refrigeração durante o ano, a coluna 4 indica uma redução negativa da energia no sistema de aquecimento, devido ao fato que o refrigerador eficiente libera menos calor residual durante o período de aquecimento.

(iii) As reduções da energia diferem de acordo com a eficiência do sistema de aquecimento do ambiente. Assim, quanto menos eficiente o aquecedor de ambiente (aquecimento direto) trabalhar intensivamente, mais tempo gastará para compensar pelo o calor residual que falta, tendo por resultado uma redução da energia líquida no nível da residência.

(iv) A coluna 5 mostra a redução da energia líquida na residência, que são a soma das colunas 2,3 e 4.

(v) O pior impacto dos efeitos cruzados ocorre para a configuração C3 (geração hidrelétrica combinada com o aquecimento direto de gás e refrigeração com ar-condicionado eficiente) e C7 (geração termelétrica com

aquecimento a gás e refrigeração com ar-condicionado ineficiente), onde dos 60,83 kWh/ano conservados no nível do equipamento, somente 38,8 kWh/ano ou 41,9 % são conservados no nível da moradia.

(vi) Menor impacto prejudicial dos efeitos cruzados no nível da residência ocorre para as configurações C2 e C6, ambos usando resistência elétrica com 100% de eficiência e ar-condicionado ineficiente.

Avaliando a Tabela 4 tem-se que:

(vii) As colunas 6 e 7 mostram respectivamente a redução da energia nas concessionárias de energia elétrica e distribuidora de gás. A coluna 8 representa os recursos naturais totais conservados, que é a soma da redução da energia em todos os serviços.

(viii) As reduções da energia no nível das concessionárias de eletricidade são sempre maiores do que na residência, devido às perdas da transmissão e da geração.

Nas configurações onde há aquecimento direto de ambiente, a redução da energia na concessionária de energia elétrica é realmente mais elevada, visto que o aumento da demanda no aquecimento, devido aos efeitos cruzados, afetará somente a distribuidora de gás onde a redução da energia é negativa.

As reduções máximas da energia no nível da concessionária de energia elétrica ocorrem para o C8 (a geração termelétrica e aquecimento a gás e uso de ar-condicionado ineficiente) principalmente devido à eficiência baixa da usina térmica (35%).

No nível do recurso (coluna 8), a redução da energia é a mais elevada para a configuração C8, confirmando que os maiores impactos de uma medida de MD são sentidos em sistemas menos eficientes.

5.2. Impacto exergético em diferentes níveis e configurações do sistema

As reduções exergéticas da energia correspondentes na MD “refrigerador eficiente” são mostradas na Tabela 4.

Analisando a Tabela 4 tem-se que:

(i) Por causa dos efeitos cruzados, as reduções exergéticas líquidas da energia, no nível da residência, são também mais baixas do que no nível do equipamento.

(ii) Quando duas fontes diferentes de energia são usadas em uma configuração dada, a redução exergética da energia, nos níveis do recurso natural e da residência, geralmente é comparativamente mais elevada do que a redução da energia. Assim, para o C8 (geração termelétrica e aquecimento a gás), como um exemplo, a redução da exergia no nível do recurso natural é 322,07 % do que aquelas do nível do equipamento, quando a redução comparável da energia for 262,83 %. Uma das explicações para isso é o fato que o índice da exergia no gás é mais baixo (73%) do que na eletricidade (95%). Assim, para cada demanda extra do equivalente kWh em gás, somente 0,73 equivalente de kWh de exergia extra será requerida. Estas diferenças no comportamento destacam a importância da análise exergética nos sistemas, com tipos múltiplos de fontes de energia e de processos da conversão.

(iii) Embora, do ponto de vista da energia, a redução da energia no nível do recurso variar em uma escala de aproximadamente um a sete, para as seis configurações estudadas, a redução correspondente da exergia varia somente em uma escala de um a dois. Assim, o impacto desta medida de MD, do ponto de vista da redução da exergia, não é tão impressionante quanto da perspectiva da redução da energia.

5.3. Comparação de diferentes medidas da melhoria de eficiência

Os seguintes tópicos são feitos sobre as diferentes medidas de MD:

A redução absoluta da energia no nível do equipamento diferencia-se muito com as MD's, mas os efeitos relativos nos vários níveis do sistema estão aproximadamente na mesma proporção. As diferenças observadas de percentagem entre os MD's levantam-se principalmente devido às variações nos efeitos cruzados. Por exemplo, considerando a configuração C8, a redução da energia no nível do recurso natural como uma percentagem da redução da energia do equipamento é respectivamente 322,07 %, e 262,83 % para as duas medidas de MD vistas aqui e analogamente no apêndice (seção 8).

Outras medidas de MD não discutidas aqui poderiam resultar em uma diferença muito maior, devido às variações nos efeitos cruzados. Por exemplo, o uso de máquinas de lavar roupas eficientes, com água fria, tem um impacto baixo nos efeitos cruzados da carga de aquecimento.

Ressalta-se, finalmente, que este trabalho faz parte de uma investigação que considerou as análises energética e exergética para duas outras cidades, representativas de climas do Brasil (Campos do Jordão, SP e Ilhéus, BA) e bem como análise detalhada por estações do ano (primavera, verão, outono e inverno) obtendo resultados semelhantes aos apresentados neste trabalho.

6 - CONCLUSÃO

A avaliação de medidas de MD deve incluir a análise energética, assim como a exergética. A análise exergética deriva-se do segundo princípio termodinâmico, e é dada como o trabalho disponível em uma forma de energia, permitindo que o projetista compare formas diferentes de energia. A análise exergética é importante, particularmente, para avaliar o impacto de medidas de MD no setor residencial, desde que as maiorias das medidas gerem efeitos cruzados em cargas relacionadas ao calor (ar condicionado e aquecimento espacial). Como estas cargas não são fornecidas necessariamente pela mesma fonte da energia, os rendimentos energéticos e exergéticos são diferentes. Esta distinção não pode ser detectada pelo primeiro princípio da termodinâmica, isoladamente, e torna-se necessário fazer uma comparação com base no segundo princípio da termodinâmica.

Os programas de melhoria do desempenho (MD) são estratégias possíveis do gerenciamento pelo lado da

demanda. Este efeito, conhecido como efeito cruzado, é bem marcante no setor residencial. Embora possa haver uma redução da energia no nível do equipamento, o aumento de cargas de aquecimento aumenta o gasto de energia, especialmente no inverno, e diminuem o gasto de energia para o resfriamento, especialmente no verão.

Estas variações de demanda de energia, para o aquecimento e o resfriamento, são relevantes especialmente na cidade em questão, pois o clima mais quente demanda mais energia para o resfriamento; e em climas mais frios, é necessário mais energia para aquecimento. Como os rendimentos exergeticos e energéticos são função do objetivo aquecimento ou resfriamento, e do tipo de equipamento utilizado, este artigo mostrou a importância da realização das análises energéticas e exergeticas para o planejamento de sistemas energéticos.

Este impacto varia significativamente entre os níveis diferentes de um sistema de energia (equipamento, cliente, concessionária de energia elétrica, distribuidora de gás e recursos naturais). Por exemplo, a concessionária de energia elétrica pode reduzir uma quantidade importante de energia; entretanto, as distribuidoras de gás terão seu aumento da demanda, de modo que a redução total da energia nos recursos naturais não será tão significativa como o esperado.

As diferentes configurações de sistema de energia têm uma grande influência na redução da energia e/ou exergia em vários níveis do sistema. Oito configurações típicas foram testadas neste artigo, incluindo dois tipos de geração elétrica combinados com os dois tipos de equipamentos de aquecimento e um de refrigeração. Estas análises podem auxiliar na elaboração de tarifas de energéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUSTEAD, I., HANCOCK, G.F. (1979), **Handbook of Industrial Energy Analysis**, (New York: John Wiley & Sons).[s.n.]
BROEHL, J.H. (1987), An End Use Approach to Demand Forecasting, **Load Management**, The Institute of Electric and Electronic Engineers Press, New York, pp. 117-121.
HENRIQUES, D. (1992), Promoting a New Energy Ethic for British Columbia, **Proceedings XII International Union for Electroheat**, Montreal, Quebec, pp.541-546;
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, PBE – Plano Brasileiro de Etiquetagem, (<http://www.inmetro.gov.br/>), data da consulta: 19 de outubro de 2001.
KAYGUSUZ, K., AYHAN, T. (1993), Exergy Analysis of Solar-Assisted Heat-Pump Systems for Domestic Heating, **Energy-The International Journal** Vol. 18 No.10, pp. 1077-1085.
KLENKE, W. (1991), Useful Work, Exergy and Thermodynamics Potentials, **International Chemical Engineering**, Vol. 31, No.4, October 1991, pp. 654-660.
LATORRE, C.O.F., NOBRE E.C., BURGOA C.A. (1989), Diagnóstico do Potencial de Conservação de Energia na Indústria (Diagnosis of the Energy Conservation Potential on the Industrial Sector) **The First International Conference on Power Distribution; The Institute of Electrical and Electronics Engineers**, Belo Horizonte, MG., Brazil, (in Portuguese) p.5.
MAXWELL, J.C. (1871), **Theory of Heat**, 1st. ed., Longmans Green: London.

MOREAU, A., STRICKER S. (1994), Assessment of the Impact of Internal Heat Gains on The Thermal Loads in the Residential Sector, **Electricity 1994**, (Toronto: Canadian Electrical Association) p. 19.
NIEUWLAAR, E. (1993), Exergy Evaluation of Space-Heating Options, **Energy-The International Journal** Vol. 18. No.7 pp.779-790.
OLIVEIRA FILHO, D., GALIANA F.D. (1995) A Model for the Planning of Electric Energy Systems Including Exergetic Considerations, **The Institute of Electrical and Electronic Engineers Power Industry Computer Applications Conference**, Utah, May. [s.n.].
OLIVEIRA FILHO, D., (1995), **Electric Energy System Planning and the Second Principle of Thermodynamics**, Department of Electrical Engineering, McGill University, Ph.D. thesis, Montreal, Quebec, Canada. [s.n.]
RABL V.A. (1991) The Opportunity in DSM, **Electric Power Research Institute Journal**, October/November, pp.4-15.
TALUKDAR S., GELLINGS C.W. (1987) Load Management Concepts, **Load Management**, (New York: The Institute of Electric and Electronic Engineers Press), pp. 3-29.
WEPFER, W.J. (1979) **Application of the Second Law to the Analysis and Design of Energy Systems**, PhD thesis, University of Wisconsin Madison. [s.

