

ANÁLISES ENERGÉTICAS E EXERGÉTICAS DE COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA - TIPO A, B e C COM DIFERENTES ÁREAS EXTERNAS

Lucas Paglioni Pataro Faria, lppf@ig.com.br¹
Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br¹
Elizabeth Marques Duarte Pereira, bethduarte00@gmail.com²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Avenida Antônio Carlos, Nº. 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

²Centro Universitário UNA, Avenida Raja Gabáglia, Nº. 3.950, Estoril, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: Nas recentes décadas, novas preocupações como destruição ambiental e escassez de recursos têm aumentado as considerações nas tomadas de decisão. Mas sempre, eficiências e perdas têm sido aspectos importantes. Eficiências baseadas na energia podem ser freqüentemente não intuitivas ou até mesmo conduzir a erros, em parte porque a eficiência energética não necessariamente fornece a medida de quanto próximo o processo aproxima-se do ideal. Também perdas de energia podem ser grandes em quantidade, quando elas são de fato não tão significantes termodinamicamente devido à baixa qualidade ou utilidade da energia que é perdida. A eficiência exergética deve fornecer medidas de aproximação para o ideal, e perdas exergéticas devem fornecer medidas do desvio para idealidade. Conseqüentemente acredita-se que várias ações são necessárias, dentre elas, deve estar claro sobre o que se quer dizer quando discute-se eficiências termodinâmicas e perdas; e deve-se utilizar medidas de eficiências e perdas baseadas na exergia; O objetivo deste estudo é verificar as eficiências energéticas e exergéticas para 3 coletores solares de placa plana com áreas externas diferentes e classificações diferentes, podendo ser (A, B ou C). Por ultimo, realiza-se uma análise energética e exergética para um chuveiro elétrico comercial, a fim de obter-se uma comparação entre o aquecimento de água pelo sistema solar e pelo sistema elétrico convencional. O modelo de simulação computacional adotado é o Engineering Equation Solver (EES) 1992 – Versão Comercial 6.883 – 3D (09/01/03), apresenta-se também um estudo numérico através de tópicos, adotados pela classificação dos coletores quanto a sua eficiência (A, B, ou C). Para o coletor do tipo A analisado, chega-se a uma eficiência energética de 61,14 % e a uma eficiência exergética de 5,62% , ou seja, uma diferença de aproximadamente 55,5% na análise das eficiências para uma coletor operando em condições reais, tais resultados são análogos para os coletores tipo B e C.

Palavras-chave: Eficiência, Energia, Exergia, Coletor e Solar.

1. INTRODUÇÃO

A conversão de radiação solar em energia térmica para uma placa absorvedora transfere energia para o fluido de trabalho e a associação de perdas térmicas para o ambiente é a geração de entropia que torna o processo irreversível. Conseqüentemente um nível de alta performance para um coletor solar é esperado quando estes processos ocorrem com o mínimo de irreversibilidade possível. Este conceito de irreversibilidade mínima ou geração de entropia (também equivale ao princípio de máxima exergia entregada ou disponibilizada) achou grande aplicação na análise e otimização de muitos sistemas termodinâmicos, incluindo coletores solares. Isto é particularmente útil na construção de coletores solares, porque a taxa na qual a energia é coletada torna-se maior em altas taxas de vazão, mas nestas condições, a temperatura do fluido de saída é muito baixa e o trabalho potencial desta energia é também baixo. Por outro lado, baixas taxas de vazão resultam em altas temperaturas de saída do fluido, com grande potencial de trabalho específico, mas a quantidade de energia extraída do sistema é baixa. Portanto, deve-se encontrar um ponto de operação ótimo para os coletores solares, e a 2ª Lei da Termodinâmica ou análise exergética fornece isto (McGovern, 1990a).

A experiência mostra que equipamentos de energia solar operam abaixo de sua capacidade nos trópicos. Isto é parcialmente devido à alta proporção de radiação difusa na insolação. Radiação solar difusa é a energia radiante do sol que alcança a terra depois de sofrer processos irreversíveis ao penetrar na atmosfera terrestre. Esta radiação tem aumentado a entropia e abaixado a temperatura da radiação e, portanto, tornando o processo de baixa disponibilidade termodinâmica em relação a radiação original. Em suma, a Absortividade-Transmitância da radiação de muitos materiais de energia solar é mais baixa para radiação difusa (McGovern, 1990b).

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

É de conhecimento que a eficiência energética térmica solar aumenta com o aumento da taxa de vazão, e de forma similar, a temperatura de saída do fluido aumenta com a área coletora. Na análise energética de coletores solares de placa plana, a intensidade da radiação solar incidente (S), a temperatura ambiente (T_e), a temperatura do agente térmico (fluido) na saída do coletor solar ($T_{f,o}$), a potência do coletor solar (P_C) e a eficiência energética solar térmica, (η_{en}), devem ser admitidas como prioridade (Kam, 1996).

Baseado nestes parâmetros, as características de construção (números de placas de vidro (N), espessura do isolamento (d), comprimento do tubo de elevação (L), área coletora (A_C) e ângulo de inclinação da superfície (s)) podem ser determinadas. Então, as características funcionais do coletor solar podem ser obtidas: Produto efetivo da transmitância-absortividade ($\tau\alpha$), coeficiente global de perda de calor (U_L) e o fator de eficiência (F).

Todas estas informações podem permitir o estabelecimento de características operacionais, desde que se saiba a taxa de vazão do fluido (\dot{m}) e seu calor específico (C_p) (essencial para a determinação da natureza química do fluido).

A temperatura de saída do fluido do coletor pode ser representada pela Eq. (1) (Sonntag et al., 2003).

$$T_{f,o} = f\left(T_e, S, U_L, A_C, T_{f,i}, \dot{m}, C_p, s, (\tau\alpha)\right) \quad (1)$$

Um método para se estabelecer o modo de operação ótimo de coletores solares deriva da análise exérgica de processos específicos do fluido que passa através dos tubos dos coletores. A literatura relevante analisada contém estudos da dependência da eficiência exérgica sobre a taxa de vazão do fluido e sobre a temperatura do fluido na entrada do coletor solar.

Segundo Onyegegbu e Morhenne (1993) e Rosen (2002a) a exergia específica do fluido dentro do coletor solar (e), depende da temperatura de entrada do fluido ($T_{f,i}$), este parâmetro torna a radiação solar e a taxa de vazão do fluido, aspectos pertinentes na análise da eficiência exérgica do coletor solar.

2.1. Análise Termodinâmica

A análise termodinâmica é baseada em várias hipóteses, dentre elas destaca-se: A eficiência exérgica do coletor é dada pela taxa entre a exergia armazenada pelo fluido que passa através dos tubos e a quantidade de energia solar incidente ao longo do coletor em um determinado tempo.

(a) A distribuição de temperatura na direção da vazão do fluido (T_f) é dada pela relação da Eq. (2).

$$T_f - T_e = \frac{S}{U_L} + \left(T_{f,i} - T_e - \frac{S}{U_L}\right) e^{\left[-\frac{(U_L F A_C)}{\dot{m} C_p}\right]} \quad (2)$$

Se a $T_{f,i} = T_e$, a variação da temperatura do fluido na saída do coletor solar é representada pela Eq. (3).

$$\Delta T = T_{f,o} - T_e = \left(\frac{S}{U_L}\right) \left(1 - e^{\left(-\frac{U_L F A_C}{C_p \dot{m}}\right)}\right) \quad (3)$$

(b) A eficiência térmica solar do ponto de vista da energia (η_{en}) é representada pela Eq. (4).

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_C S} \quad (4)$$

(c) A taxa de exergia transferida do sol para o fluido $\left(\dot{E}_f = \dot{m}e\right)$ que é aquecido enquanto atravessa os tubos do coletor é representada pela Eq. (5).

$$\dot{E}_f = \dot{m}e = \dot{m}\left[(h_{f,o} - h_{f,i}) - T_e(s_{f,o} - s_{f,i})\right] \quad (5)$$

Onde $h_{f,o} - h_{f,i} = C_p(T_{f,o} - T_{f,i})$ é a variação da entalpia específica, e $s_{f,o} - s_{f,i} = C_p \ln\left(\frac{T_{f,o}}{T_{f,i}}\right)$ é a variação de entropia específica. Conseqüentemente, pode se reescrever a Eq. (5) segundo a Eq. (6).

Onde:

$h_{f,o}$: Entalpia do fluido na saída do coletor solar;

$h_{f,i}$: Entalpia do fluido na entrada do coletor solar;

$s_{f,o}$: Entropia do fluido na saída do coletor solar;

$s_{f,i}$: Entropia do fluido na entrada do coletor solar.

$$\dot{E}_f = \dot{m}C_p \left(\Delta T - T_e \ln\left(\frac{T_{f,o}}{T_{f,i}}\right) \right) \quad (6)$$

(d) A eficiência exergética (η_{ex}) é dada pela Eq. (7).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}C_p \left(\Delta T - T_e \ln\left(\frac{T_{f,o}}{T_{f,i}}\right) \right)}{A_C S} \quad (7)$$

Inserindo na Eq. (7) o ΔT fornecido pela Eq. (3), encontra-se a seguinte relação para η_{ex} de acordo com a Eq. (8), segundo Fará e Luminosu (2005).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}C_p}{A_C S} \left[\frac{S}{U_L} \left(1 - e^{-\left(\frac{U_L F' A_C}{C_p \dot{m}}\right)} \right) - T_e \ln \left(1 + \frac{S}{T_e U_L} \left(1 - e^{-\left(\frac{U_L F' A_C}{C_p \dot{m}}\right)} \right) \right) \right] \quad (8)$$

De acordo com a Eq. (8), para um coletor solar com propriedades térmicas de isolamento fornecidas, se U_L é constante, em um dado espaço, conseqüentemente, S também é constante, e a eficiência exergética é parametricamente dependente da taxa de fluxo e da área coletora, de acordo com a Eq. (9).

$$\eta_{ex} = f\left(\dot{m}, A_C\right) \quad (9)$$

Até este ponto objetivava-se expor em linhas gerais o fato de que a dependência da eficiência exergética sobre a taxa de vazão do fluido e da área coletora $\eta_{ex} = f\left(\dot{m}, A_C\right)$, considerando as quantidades $U_L, (\tau\alpha), T_e, T_{f,i}, C_p, S$ como dados de entrada, é uma “superfície” com pontos de eficiência local máxima e pontos de eficiência global máxima. O ponto de eficiência global máxima desta suposta “superfície” é constituído através da relação entre η_{ex}, \dot{m}, A_C , na qual estabelece o modo ou ponto ótimo de operação para o coletor solar plano.

2.2. Modelo Matemático em Plataforma EES

O objetivo deste estudo é verificar a eficiência energética e a eficiência exergética – pelo método proposto por Fará e Luminosu (2005) de acordo com a Eq. (8), para 3 coletores solares com áreas externas diferentes e classificações diferentes, podendo ser (A, B ou C). Por ultimo, realiza-se uma análise, baseada na metodologia descrita no item 2.1, para um chuveiro elétrico comercial, a fim de se obter uma comparação entre o aquecimento de água pelo sistema solar e o aquecimento de água pelo sistema elétrico convencional. O modelo de simulação computacional adotado é o Engineering Equation Solver (EES) 1992 – Versão Comercial 6.883 – 3D (09/01/03)®, o estudo é apresentado através de tópicos de acordo com a classificação dos coletores quanto a sua eficiência (A, B, ou C). Espera-se demonstrar a importância de uma análise exergética para analisar a eficiência de um processo ou equipamento. Os dados de entrada para os coletores solares de placa plana dos tipos A, B e C, foram fornecidos pelo Grupo de Estudos em Energia (GREEN) da Pontifícia Universidade Católica – MG e são omitidos por motivos de confidencialidade, no entanto, as avaliações para cada um deles serão apresentadas, não prejudicando, desta forma, a compreensão do trabalho.

2.3. Classificação dos Coletores Solares de Placa Plana

Os coletores solares de placa plana, podem ser divididos em 5 categorias A, B, C, D ou E. Esta classificação depende de seu índice de produção média mensal de energia específica (P_{me}) medido em $[kWh/mês m^2]$.

A Tab. (1), fornecida pelo Inmetro (2006), apresenta a classificação dos coletores solares de placa plana.

Tabela 1. Classificação dos Coletores Solares de Placa Plana

CLASSES	INDICE BANHO / ACOPLADO	INDICE PISCINA	BANHO		ACOPLADO		PISCINA		TOTAL (B+A+P)
			TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	
A	$P_{me} > 77,0$	$P_{me} > 95,0$	47	40,2	0	0,0	15	44,1	62
B	$77,0 \geq P_{me} > 71,0$	$95,0 \geq P_{me} > 87,0$	30	25,6	1	25,0	5	14,7	36
C	$71,0 \geq P_{me} > 61,0$	$87,0 \geq P_{me} > 79,0$	28	23,9	1	25,0	8	23,5	37
D	$61,0 \geq P_{me} > 51,0$	$79,0 \geq P_{me} > 71,0$	9	7,7	2	50,0	3	37,5	14
E	$51,0 \geq P_{me} > 41,0$	$71,0 \geq P_{me} > 63,0$	3	2,6	0	0,0	3	8,8	6
			117		4		34		155

2.4. Dados de Entrada para os Coletores Solares dos Tipos A, B e C

Os dados de entrada, fornecidos pelo GREEN, para os coletores solares são: Temperatura ambiente; Temperatura do fluido na saída do coletor solar; Temperatura do fluido na entrada do coletor solar; Radiação solar incidente; Vazão volumétrica; Vazão mássica; Volume específico do fluido; Variação de entalpia do fluido.

2.5. Tratamento de Dados no EES

De posse dos dados de entrada, pode-se tratar estas informações no EES. A seqüência de programação utilizada foi:

- 1) Define-se a pressão na qual o fluido (água) esta exposto: 100 kPa;
- 2) Calcula-se o calor específico da água, a partir da média aritmética dos valores de temperatura da água na entrada e saída do coletor;
- 3) Define-se a área externa do coletor;
- 4) Calcula-se o valor do fluxo de energia disponível descrita por Brzustowski e Golem (1977);
- 5) Calcula-se o valor da variação de entropia;
- 6) Calcula-se o valor da eficiência energética;
- 7) Calcula-se o valor da eficiência exergética definida pelas Eqs. (8 e 12).

2.6. Chuveiro Elétrico

2.6.1. Dados de Entrada para o Chuveiro Elétrico

Os dados de entrada para o chuveiro elétrico são a temperatura ambiente e as potências de acionamento do chuveiro elétrico.

2.6.2. Tratamento de Dados no EES

De posse dos dados de entrada, pode-se tratar estas informações no EES. A seqüência de programação utilizada foi:

- 1) Admite-se que a eficiência energética deste chuveiro elétrico seja de 92 %;
- 2) Calcula-se o calor específico da água a 303 (K) e 100 (kPa), estes são os valores reais de operação do equipamento;
- 3) Admitindo-se que sua eficiência seja de 92%, utiliza-se a equação eficiência energética para se obter a vazão mássica do sistema. Os dados de entrada são: O Calor específico da água, os diversos valores da potência de acionamento do chuveiro elétrico e por último, admite-se que a diferença entre a temperatura da água de banho e a temperatura ambiente da água, seja igual a 20°C, isto considerando-se que a temperatura da água de banho seja de aproximadamente 40°C e a temperatura ambiente esteja em torno de 20°C.
- 4) O último passo é determinar a eficiência exergética, pelas Eqs. (8 e 12), deste chuveiro elétrico.

3. RESULTADOS

3.1 Análise Geral dos Coletores Solares de Placa Plana - Tipos A, B e C

O objetivo principal almejado na análise termodinâmica deste tipo coletor é perceber a diferença nos valores obtidos para as eficiências. A eficiência energética e exergética merecem análises diferentes e, portanto conclusões diferentes são obtidas. A princípio, pode-se adiantar que o cálculo da eficiência exergética de um coletor solar é muito mais pertinente e, portanto muito mais próximo do real. Para melhor visualização, será feita uma comparação entre os dois métodos de análise.

A primeira análise a se fazer é em relação à eficiência energética para o coletor solar do tipo A, esta eficiência, definida pela Eq. (4), apresentou valores que variam desde 48,93% a 61,14 %, para as condições de operação definidas. Este tipo de análise de desempenho de coletores solares de placa plana é extremamente usado e, portanto é válido fazer algumas considerações sobre a mesma. O conceito imposto pela 1ª Lei da Termodinâmica é o de conservação de energia, ou seja, toda a energia disponível é convertida em trabalho, ou melhor, toda a energia disponível é utilizada. Este princípio pode ser utilizado para verificar se o desempenho de um coletor solar. Observando a Eq. (10), pode-se concluir que:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_C S} \quad (10)$$

O numerador da Eq. (10) representa o “trabalho” realizado, que na verdade, nada mais é do que elevar a temperatura do fluido à entrada do coletor até a temperatura de saída do mesmo. O denominador desta equação representa a energia consumida para elevar a temperatura da água de um estado inicial para um estado final. Esta energia é a radiação solar incidente (S) multiplicada pela área do coletor (A_C). O que a primeira lei da termodinâmica determina é admitir que toda a radiação solar incidente esta sendo utilizada para elevar a temperatura da água. A partir desta hipótese, chega-se a valores de eficiência energética máxima, para este coletor (A), de aproximadamente 61,14%.

A segunda análise a se fazer é com relação a teoria imposta pela 2ª Lei da Termodinâmica para o coletor solar do tipo A. Desde 1956, associado ao uso crescente da análise de disponibilidade, Szargut (2005) desenvolveu o conceito da eficiência determinada a partir do ponto de vista da exergia. Este conceito envolve a comparação da produção desejada num processo com a variação da disponibilidade termodinâmica no mesmo processo. Pode-se ainda dizer que a eficiência do ponto de vista da primeira lei da termodinâmica corresponde a uma comparação entre duas quantidades energéticas, por isso também chamada de eficiência energética.

Nesse sentido, este conceito proporciona uma avaliação do processo real em função da mudança real de estado e é simplesmente um outro meio conveniente de utilizar o conceito de disponibilidade termodinâmica. Através de uma análise mais rigorosa, a eficiência exergética determina que a conversão de radiação solar em energia térmica para uma placa absorvedora, transfere energia para o fluido de trabalho, e a associação de perdas térmicas para o ambiente é a geração de entropia que torna o processo irreversível.

Conseqüentemente, um nível de alta performance para um coletor solar é esperado quando estes processos ocorrem com o mínimo de irreversibilidade possível. Este conceito de irreversibilidade mínima ou geração de entropia também equivale ao princípio de máxima exergia entregada ou disponibilizada (Sociedade do Sol, 2006). Portanto, com base na 2ª Lei da Termodinâmica, chega-se a eficiências exérgicas, para o coletor solar do tipo A, de até 5,234%, eficiências estas muito inferiores àquelas atingidas do ponto de vista da 1ª Lei. Isto já era esperado, visto que, ao contrário da 1ª Lei, a eficiência exérgica leva em consideração as perdas por irreversibilidades internas e externas, valores estes encontrados pelo modelo proposto Fará e Luminosu (2005). Conclusão, o modelo proposto por Fará e Luminosu (2005) para o cálculo da eficiência exérgica é adequado ao assumir valores para a energia disponível como sendo a Radiação Total Incidente (S). No entanto, aconselha-se a substituição do termo (S), na Eq. (8), pela alternativa proposta por Brzustowski e Golem (1977) para calcular o Fluxo da Radiação Solar Disponível, de acordo com a Eq. (11), ao invés da Radiação Total Incidente (S). Portanto, a partir da formulação proposta por Brzustowski e Golem (1977), chega-se a valores para a eficiência exérgica entre 1,633% e 5,623% para o coletor do tipo A. Este modelo, que caracteriza a energia realmente disponível da radiação solar, é caracterizado pelos autores (Onyegegbu e Morhenne (1993) e Rosen (2002a)), como *Disponibilidade da Radiação Solar*.

$$\psi = S \left[1 - \frac{4T_e}{3T_s} \right] \quad (11)$$

onde:

Ψ : Fluxo da Radiação Solar Disponível (W/m^2);

T_e : Temperatura ambiente (K);

T_s : Temperatura Efetiva do Sol (K), que equivale a aproximadamente 5777 (K).

Portanto, a equação da eficiência exérgica pode ser reescrita pela Eq. (12).

$$\eta_{ex} = \dot{m} C_p \left[\Delta T - T_e \ln \left(\frac{T_{f,o}}{T_{f,i}} \right) \right] / (A_C \Psi) \quad (12)$$

Indiretamente, a Eq. (11) admite que uma fração significativa da insolação é difusa devido ao fato da irreversibilidade do processo de dispersão, absorção e re-emissão da radiação solar. Em um nível espectral, o conhecimento do fluxo de energia radioativa dentro de um range de frequência dado e um ângulo fixo de propagação determina a disponibilidade e a temperatura de radiação da fonte. Em um nível macroscópico, considera-se a radiação solar terrestre como a energia de duas fontes combinadas, uma fonte direta e uma fonte difusa, superpostas. A disponibilidade da radiação solar terrestre é então obtida por superposição das disponibilidades destas duas fontes combinadas. A temperatura aparente ou efetiva do sol é geralmente aceita como sendo a temperatura da radiação.

Para o Coletor Solar do Tipo “B”:

- De forma similar ao encontrado para o coletor tipo “A”, as eficiências energéticas variam entre 37,07 % e 70,34%;
- Para a eficiência exérgica proposta por Fará e Luminosu (2005) chega-se a valores de até 4,197 %;
- Para a eficiência exérgica proposta por Brzustowski e Golem (1977) chega-se a valores de até 4,608%.

Para o Coletor Solar do Tipo “C”:

- De forma similar ao encontrado para os coletores tipo “A” e “B”, chega-se a eficiências energéticas que variam entre 37,62 % e 68,82%;
- Para a eficiência exérgica proposta por Fará e Luminosu (2005) chega-se a valores de até 4,169 %;
- Para a eficiência exérgica proposta por Brzustowski e Golem (1977) chega-se a valores de até 4,478%.

As análises exérgicas para os coletores dos tipos A, B e C mostram que, em todos os casos, as eficiências, calculadas pelo modelo de Brzustowski e Golem (1977), são menores do que aquelas calculadas pelo modelo de Fará e Luminosu (2005). Isto já era esperado pois, Brzustowski e Golem (1977) consideram, para seus cálculos, a disponibilidade da radiação solar (Ψ), Fará e Luminosu (2005) consideram, em seu modelo, a radiação solar incidente (S).

3.2. Análise Geral do Chuveiro Elétrico

- Para uma potência de acionamento do chuveiro de 3200 (W) atinge-se uma eficiência exergética de aproximadamente: 2,95 %;

- Para uma potência de acionamento do chuveiro de 10200 (W) atinge-se uma eficiência exergética de aproximadamente: 0,85 %;

- Para uma potência de acionamento do chuveiro de 5000 (W) (Potência Comercial) atinge-se uma eficiência exergética de aproximadamente: 2,062 %.

A apresentação desses valores não implica deixar de prover o serviço, ou melhor, não se está querendo deixar de aquecer a água ou qualquer outro processo em que a eficiência exergética seja baixa; o que se propõe é que haja uma mudança em que os processos sejam supridos por fontes compatíveis de energia, por exemplo, para aquecer a água não se deveria utilizar uma energia de alta qualidade como a energia elétrica, pois o aquecimento de água é um processo com baixo rendimento exergético. O problema porém, seria melhorado se fosse utilizado o gás natural, ou até o gás liquefeito de petróleo ou até mesmo o aquecimento de água por energia solar, como apresentado neste estudo, em cujos processos o rendimento exergético seria elevado a níveis maiores que aqueles que têm como fonte a energia elétrica (Krenz, 1980).

3.3. Considerações da Análise Exergética em Tarifas de Energia Elétrica

É importante que o projeto de sistemas de energia seja concebido de modo que a qualidade da energia para uso final seja a melhor possível, evitando situações em que um suprimento de alta qualidade seja usado em um uso final de baixa qualidade como é, por exemplo, o aquecimento de água via energia elétrica.

Na elaboração de tarifas de energia elétrica, vários parâmetros são considerados, dentre eles os sociais, políticos, estratégicos e de engenharia. Dentre os critérios da engenharia, a eficiência do sistema pode ser considerada uma das mais importantes nas utilizações racionais de energia (Filho et al., 2000).

A eficiência de um sistema pode ser medida de duas maneiras: pela eficiência energética e pela eficiência exergética, embora esta não seja considerada atualmente como parâmetro na elaboração de tarifas de energia elétrica. Se considerações exergéticas, além das energéticas, fossem tomadas, haveria uma profunda mudança na matriz energética brasileira. Na expectativa da virada de século e com a estabilização econômica, os diversos setores da economia brasileira viram-se forçados a reduzir seus custos de produção, devido à acirrada competitividade que se instalou depois da abertura de mercado e à luta pela própria sobrevivência e com isso, houve considerável incremento na demanda de energia elétrica.

O Brasil, tendo atravessado uma longa crise econômica, deixou de investir massivamente em infra-estrutura no ritmo que seria necessário e, hoje, o sistema elétrico nacional encontra-se em déficit, em termos de quantidade de energia oferecida, com riscos até de blecaute nos horários de pico de consumo, por não conseguir ofertar energia suficiente (Filho et al., 2000).

De acordo com Ministério das Minas e Energia (1996), seria necessário, até o ano 2015, quase que triplicar a oferta de energia. Considerando o crescimento econômico e populacional projetado pelo CGEE (2001) até aquele ano, seriam necessários, aproximadamente, 200 bilhões de reais em investimentos.

Logicamente, um problema como esse não poderá ser solucionado com apenas uma medida, mas é preciso um conjunto de medidas que planejem o sistema elétrico de forma integrada. O planejamento integrado prevê ações tanto do lado do suprimento da demanda quanto do lado da sua utilização. O Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD) também conhecida pela sigla DSM (Demand Side Management) acarreta, em muitas situações, economia superior às ações do lado do suprimento (Torres-Reyes et al., 2001).

Na maioria absoluta dos casos, a melhoria da eficiência e a utilização racional da energia são, em certos processos e em termos econômicos, menos onerosas que a produção de novas fontes energéticas, significando que os custos dos programas para racionalização de energia são, muitas vezes, menores que os custos para aumento da geração. Existe, atualmente, um outro conceito de avaliação do uso da energia, que leva em conta critérios não somente tradicionais como da quantidade de energia, mas, também, o conceito da qualidade dessa energia, ou seja, a exergia. A eficiência em um processo qualquer era tradicionalmente medida somente pelo Primeiro Princípio da Termodinâmica (PPT) em que se consideram apenas níveis quantitativos, ou seja, a eficiência energética é dada pela relação entre a energia de entrada e a energia de uso final.

Considerando o Segundo Princípio da Termodinâmica (SPT) a eficiência de um processo é a possibilidade de realização de trabalho, isto é, a eficiência exergética é dada pela relação entre energia útil e a realização de trabalho possível, por meio dessa energia. Modificações na utilização final da energia que visem ao aumento da eficiência exergética e também modificações no atual sistema de tarifas de energia elétrica, podem alterar, de forma significativa, o *modus operandi* do planejamento de sistemas de energia.

Segundo Oliveira (1995), o planejamento de sistemas de energia elétrica a longo prazo é realizado de acordo com alguns critérios básicos interrelacionados, como: custo, confiabilidade, impacto ambiental e eficiência. O peso que se atribui a cada um desses critérios básicos depende do contexto histórico, variando com o passar dos anos.

Termodinamicamente, a eficiência de um processo pode ser quantificada por duas maneiras: eficiência energética e eficiência exergetica, em que a primeira é proveniente do PPT enquanto a eficiência exergetica se origina do SPT.

Nos sistemas de energia elétrica, a eficiência é normalmente definida de acordo com o PPT e no planejamento de sistemas de energia elétrica pode ser ampliada, para também incluir a interpretação de acordo SPT (Oliveira, 1995).

A eficiência exergetica diferencia a qualidade da energia, ou seja, o seu emprego no uso final, com menor degradação da energia. O termo exergia expressa a capacidade da energia em realizar trabalho. Em processos de transformação de energia a capacidade de realizar trabalho diminui; portanto, à medida que é transformada a energia, implica geração de irreversibilidade (Brzustowski e Golem, 1977).

Para ilustrar o quanto esses dois tipos de medida de eficiência, eficiência energética e exergetica, são diferentes, é dado este exemplo: num processo em que se faz o aquecimento de água a baixa temperatura (chuveiro elétrico) a eficiência energética é de aproximadamente 90%, enquanto a exergetica não ultrapassa 3%, isso se deve ao fato de que, com a água aquecida a baixa temperatura (de 20 para 40°C) a possibilidade de realização de trabalho é muito pequena.

Outros Exemplos: No caso de motores eficientes de 10 (kW), a eficiência energética pode ser considerada como de cerca de 87%, enquanto exergetica, de 92%, enquanto as eficiências da análise via PPT são de 80 e 87% (valores da mesma ordem de grandeza), via SPT são de 7 e 92% (valores bem distintos). Esse constitui um exemplo claro da alta discrepância possível entre as eficiências energética e exergetica e da significativa perda irreversível da exergia, até em processos que são 90% energeticamente eficientes, como no caso do chuveiro elétrico (Krenz, (1980); McGovern, (1990 a e b); Klenke, (1991) e Oliveira e Galiana, (1995)).

4. CONCLUSÃO

A combinação das duas primeiras leis da termodinâmica permite que se estabeleça o balanço de exergia (máximo trabalho que um sistema pode realizar ao evoluir do estado em que se encontra até entrar em equilíbrio termodinâmico com o meio).

Exergia é, portanto, conceito bastante útil ao analista e/ou tomador de decisões na área de energia. Ela ressalta o caráter qualitativo dos fluxos energéticos, o que não está explícito na visão tradicional da política energética que, em linhas gerais, busca expandir a oferta de energia para satisfazer uma demanda variável (Oliveira e Galiana, 1995). No entanto, como esta demanda é heterogênea, de fato, o verdadeiro problema do planejamento energético acaba por tornar-se satisfazer usos finais heterogêneos com o mínimo “gasto” de energia “termodinamicamente apropriada”.

Em outras palavras, o uso eficiente dos fluxos energéticos implica na combinação não apenas entre as quantidades supridas e requeridas nos usos finais, mas também entre as qualidades destas quantidades. Aliás, é precisamente a qualidade dos fluxos energéticos (ou a exergia) que não se conserva durante as transformações irreversíveis. Assim, o balanço exergetico fornece informações sobre a degradação da energia que ocorre durante as transformações e os usos finais (os consumos finais) dos fluxos energéticos, sendo capaz de assumir papel expressivo na formulação de políticas energéticas (Klenke, 1991).

Destacam-se, neste sentido, os seguintes aspectos:

1. Aspectos técnicos: melhorar o “casamento” entre a oferta de exergia e a sua demanda. Duas são as fontes de perda de exergia (ou da capacidade de um fluxo realizar trabalho): perdas técnicas, resultantes de imperfeições técnicas de partes das instalações de consumo ou transformação de energia, e perdas estruturais, resultantes do método de produção em si. A redução das perdas exergeticas baseia-se primeiramente no entendimento de que a energia deve, em tese, ser suprida na qualidade requerida pelos processos.

2. Aspectos econômicos: nem sempre o consumo ou a perda de exergia são devidamente valorizados. O que, de fato, não se conserva nas transformações é a exergia; ou ainda, como o “trabalho vale mais do que o calor”, seu custo de oportunidade deve ser maior.

3. Aspectos ambientais: a análise exergetica pode ser usada para medir o potencial poluente de efluentes de processos industriais, através da estimativa da capacidade/potencial de realização de trabalho (produção de impacto) dos efluentes no meio em que são dispostos. Além disso, pode ser empregada para medir a qualidade de efluentes e seu potencial de re-utilização (por exemplo, efluentes térmicos de processos industriais que podem ser empregadas sejam em cascatas de trocadores de calor, seja em sistemas de geração combinada de energia).

4. Efeitos sobre a Economia Popular: Admitindo todos os coletores solares instalados, a economia elétrica obtida pelas famílias brasileiras será de R\$ 15.000.000,00/ano CGEE (2001), economia esta que se baseia tanto no preço pleno do kWh residencial quanto na idéia da manutenção do perfil de consumo de água por parte do usuário, ou seja, o usuário não deverá ceder à facilidade de gastar mais água quente, cuja energia consumida agora é praticamente gratuita, mas, gastando a mesma proporção de água quente originalmente utilizada, o chuveiro “solar” poderá reduzir expressivamente os impactos econômicos e ambientais. Evitando o consumo de um chuveiro elétrico, uma família de baixa renda poderá economizar algo em torno de (1204 kWh por ano x 0,75 % de eficiência x R\$ 0,43 por kWh cobrado pela distribuidora de energia), teria-se uma economia média de R\$ 388,00 para cada família por ano. Isto resulta num retorno financeiro de 9 meses, admitindo-se o custo inicial dos equipamentos, em R\$300,00/unidade.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

6. REFERÊNCIAS

- Brzustowski T. A. e Golem P. J., 1977, "Second-law analysis of energy processes – Part I: Exergy – An introduction", Transactions of the Society for Mechanical Engineers, Vol. 4, N° 4.
- CGEE - Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia, 2001, "Uma proposta de áreas relevantes para atividades de p&d a serem implementadas pelo fundo setorial de energia – CTENERG", http://ftp.mct.gov.br/Fontes/Fundos/Documentos/CTEnerg/ctenerg_estudo005_02.pdf, accessed at: june, 2008.
- Fara L. e Luminosu I., 2005, "Determination of the optimal mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation", Energy, Vol. 30, pp. 731-747.
- Filho D. O., Tanabe C. S. e Costa J. M., 2000, "Considerações da Análise Exergética em Tarifas de Energia Elétrica . Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental", Vol.4, N° 1, pp. 114-119.
- Inmetro, 2006, "Programa Brasileiro de Etiquetagem – Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água", <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/PBE12.pdf>, accessed at: march, 2006.
- Kam W. Li., 1996, "Applied Thermodynamics: Availability Method And Energy Conversion", North Dakota State University Fargo, North Dakota, Taylor & Francis.
- Klenke W., 1991, "Useful work, exergy and thermodynamic potentials", International Chemical Engineering, Vol. 31, N° 4, pp. 654-660.
- Krenz J. H., 1980, "Energy for opulence to sufficiency", Ed. Praeger.
- McGovern J. A., 1990a, "Exergy analysis: A different perspective on energy. I. The concept of exergy", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 24, pp. 253-262.
- McGovern J. A., 1990b, "Exergy analysis: A different perspective on energy. II. Rational efficiency and some examples of exergy analysis", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 24, pp. 263-268.
- Ministério das Minas e Energia – MME, 1996, "Balanço energético nacional".
- Oliveira F. D., 1995, "Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics", Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal.
- Oliveira F. D. e Galiana F. D., 1995, "A model for the planning of electric energy systems including exergetic considerations", Power industry computer applications conference, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Salt Lake City, Utah.
- Onyegegbu S. O. e Morhenne J., 1993, "Transient Multidimensional Second Law Analysis of Solar Collectors Subjected to Time-Varying Insolation with Diffuse Components", Solar Energy, Vol. 50, N° 1, pp. 85-95.
- Rosen M. A., 2002a, "Clarifying thermodynamic efficiencies and losses via exergy", Exergy an International Journal, Vol. 2, pp. 3-5.
- Sociedade do Sol, 2006, "Resultados – Efeitos Ambientais e Econômicos do ASBC", http://www.sociedadedosol.org.br/resultados_ecologicos.htm, accessed at: june, 2006.
- Sonntag R. E., Borgnakke C. and Van Wylen G. J., 2003, "Fundamentals of Thermodynamics", 6th edition.
- Szargut J., 2005, "Exergy Method: Technical And Ecological Applications (Developments In Heat Transfer)".
- Torres-Reyes E., Cervantes de Gortari J. G., Ibarra-Salazar B. A. e Picon-Nuñez M., 2001, "A design method of flat-plate solar collectors based on minimum entropy generation", Exergy an International Journal, pp. 46-52.

7. DIREITOS AUTORAIS

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



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

EXERGETIC AND ENERGETIC ANALYSIS OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS - TYPES A, B AND C WITH DIFFERENT EXTERNAL AREAS

Lucas Paglioni Pataro Faria, lppf@ig.com.br¹
Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br¹
Elizabeth Marques Duarte Pereira, bethduarte00@gmail.com²

¹Federal University of Minas Gerais, School of Engineering, Antônio Carlos Avenue, Nº. 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

²University Center UNA, Raja Gabágia Avenue, Nº. 3.950, Estoril, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

Abstract. *In recent decades, new concerns such as environmental destruction and scarcity of resources have increased the considerations in decision-making. But always, efficiencies and losses have been important aspects. Efficiency based on energy can often not be intuitive or even lead to errors, partly because energy efficiency is not necessarily the measure of how close the process approaches to the ideal. Also energy losses can be large in quantity, when they are in fact thermodynamically not so significant due to low quality or energy usefulness that is lost. The exergetic efficiency should provide measures for the approximation to the ideal, and exergetic losses should provide measures of the deviation to ideality. Therefore it is believed that several actions are needed, among them, should be clear about what is meant when discussing the thermodynamic efficiencies and losses, and we must use measures of efficiencies and losses based on exergy; The aim of this study is to check the energy and exergetic efficiencies to 3 flat plate solar collectors with different external areas and different classifications, such as (A, B or C). Finally, it holds an energetic and exergetic analysis for a commercial electric shower in order to obtain a comparison of water heating by solar system and the conventional electrical system. The computer simulation model used is the Engineering Equation Solver (EES) 1992 - Commercial Edition 6883 - 3D (09/01/03), it also presents a numerical study by topics, adopted by collectors efficiency classification (A, B, or C). It is expected to demonstrate the importance of exergetic analysis to analyze the efficiency of a process or equipment*

Keywords: *Efficiency, Energy, Exergy, Collector and Solar.*

COPYRIGHT

The authors are the only responsible for the content of the printed material included in this work.