

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA SOLAR INDUSTRIAL

Thiago Parente Lima, thiago.parente@gmail.com
José Carlos Charamba Dutra, charamba@ufpe.com.br¹
Ana Rosa Mendes Primo, armprimo@ufpe.com.br¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - CEP 50740-530 - Recife, PE - Brasil

Resumo. *A energia solar é um tipo de energia renovável que possui grande potencial de aplicação em determinados setores da indústria. No Brasil, entretanto, a utilização da energia solar em sistemas industriais de aquecimento de água ainda é pouco difundida, apesar de muitos processos industriais necessitarem de água aquecida até temperaturas que podem ser facilmente alcançadas através do uso de simples coletores planos. Através de uma simulação numérica, esse trabalho apresenta um estudo de viabilidade técnico-econômica de um sistema de aquecimento de água solar aplicado a uma lavanderia na cidade do Recife, no Nordeste do Brasil. Para a análise técnica do sistema, foi simulado o comportamento térmico de um sistema de coletores planos. Após a modelagem dos componentes do sistema procedeu-se à otimização de parâmetros como ângulo de inclinação, vazão e área dos coletores, bem como o volume do reservatório. Para a análise econômica, foi utilizado como parâmetro de otimização a economia do ciclo de vida do sistema solar comparado ao sistema já instalado na indústria, que utiliza gás natural como combustível. Os resultados mostraram que a redução de combustível a ser conseguida através do aquecimento solar torna viável a utilização dessa fonte alternativa de energia neste tipo de indústria.*

Palavras-chave: *energia solar, análise técnico-econômica, coletores planos, aquecimento, simulação numérica*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energias renováveis muitas vezes tem como função reduzir ou substituir o uso dos combustíveis convencionais utilizados para a mesma função. No Brasil, assim como na maioria dos países, a energia solar vem sendo aplicada principalmente para o uso em aquecimento doméstico. Apesar do grande potencial que há nesse setor, a aplicação industrial da energia solar também não deve ser desconsiderada. Dois motivos principais são apontados pelo IEA (2008), em pesquisa realizada em países da união européia. Primeiro, esse setor utiliza cerca de 28% da energia primaria total consumida para uso final. Segundo, cerca de 30% da demanda industrial de aquecimento requer temperaturas abaixo de 100°C, perfeitamente alcançáveis com sistemas solares.

Dentro do setor industrial, algumas indústrias são mais favoráveis a utilização de energia solar devido às características de seus processos. Indústrias de laticínios, bebidas, têxteis, papel e lavanderias possuem processos que são realizados numa faixa de temperatura mais adequada para o uso de energia solar. Mesmo nessas indústrias, na maioria dos processos de aquecimento são utilizados combustíveis fósseis ou biomassa como fonte energética. A queima desses combustíveis provoca a emissão de gases e os seus conseqüentes efeitos já conhecidos ao meio-ambiente que são motivo da atual preocupação mundial. A finalidade da utilização de energia solar para o aquecimento em processos industriais é provocar a redução do uso desses combustíveis e seus conseqüentes impactos ao meio ambiente.

Esse trabalho tem como objetivo propor a utilização de energia solar para uma lavanderia industrial na cidade do Recife, no Nordeste do Brasil, através da apresentação de uma metodologia adequada à escolha de sistemas solares para o uso industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abdel-Dayem and Mohamad (2001) realizaram um estudo quanto à viabilidade técnico-econômica de um sistema de aquecimento de água solar para uma indústria têxtil. Duas configurações de sistemas foram escolhidas: aquecimento da água de alimentação da caldeira e aquecimento para a alimentação direta do processo. O dimensionamento do sistema incluiu a área e a vazão dos coletores e utilizou como parâmetro de decisão a econômica do ciclo de vida do sistema. A

configuração de alimentação direta se mostrou mais economicamente atrativa.

Kalogirou (2003) fez um estudo mais amplo sobre o potencial da aplicação da energia solar na indústria. Diversas simulações foram feitas com sistemas utilizando diferentes tecnologias de coletores para o mesmo perfil de demanda sob faixas de temperatura variando de $60\text{-}240^{\circ}\text{C}$. O autor mostrou que o emprego da energia solar é economicamente viável para essas aplicações.

Em Schnitzer *et al.* (2007), foi investigado o potencial técnico e econômico da utilização de um sistema de solar aplicado a processos de uma indústria de laticínios. Os autores aplicaram uma nova metodologia para a otimização da integração do sistema do estudo de caso. O investimento no sistema solar apresentou um período de retorno de 3 anos, reduzindo as emissões de CO_2 causadas pela queima de gás natural em até 218 toneladas por ano.

Kulkarni *et al.* (2008) utilizaram a metodologia de “*space design*” para o dimensionamento de um sistema solar aplicado a um processo de pasteurização de uma indústria de laticínios, utilizando coletores parabólicos concentradores e o armazenamento de água pressurizada. Segundo o autor, foi possível alcançar uma redução de até 23% do custo inicial do sistema após sua otimização.

Anderson and Duke (2008) utilizaram o método *f-chart* para simular a viabilidade técnica de sistemas solares integrados aos sistemas de aquecimento e refrigeração de uma indústria de laticínios, utilizando coletores de placa plana e de tubo evacuado. O estudo demonstrou que os coletores empregados são tecnicamente viáveis para o sistema.

Desideri *et al.* (2009) realizaram um estudo de viabilidade técnico-econômica para a integração de um sistema solar aplicado ao sistema de refrigeração de indústria de alimentos. A integração do sistema foi considerada viável com período de retorno de investimento de 10 anos e a consequente redução de 58% das emissões de CO_2 .

Esse trabalho tem como objetivo propor a utilização de energia solar para uma lavanderia industrial na cidade do Recife, no Nordeste do Brasil, através da apresentação de uma metodologia adequada à escolha de sistemas solares para o uso industrial.

3. METODOLOGIA

Como estudo de caso, foi escolhido uma lavanderia hospitalar localizada na cidade de Recife-PE. A empresa existe há mais de 14 anos e presta serviços a hospitais e clínicas da região, atendendo hoje cerca de 40 clientes. A lavanderia funciona 24 horas por dia, 7 dias por semana e utiliza água quente para as lavadoras a uma temperatura de 60°C . Dos 9 processos de lavagem realizados pela lavanderia, 4 deles consomem água quente perfazendo uma demanda total de $515,4\text{m}^3/\text{mês}$, sendo este valor 7,2% do total de água consumida nos processos de lavagem. Para o aquecimento dessa água a empresa utiliza um boiler com tanque horizontal de 3m^3 consumindo cerca de $16.000\text{m}^3/\text{mês}$ de gás natural fornecidos pela companhia do estado. Segundo dados do fabricante, o boiler possui um rendimento energético de 85%.

3.1 Perfil de demanda

A construção do perfil de demanda de água quente foi realizada a partir das informações fornecidas pela própria empresa. Foram disponibilizadas tabelas descrevendo os processos de lavagem realizados na empresa, descrevendo cada operação executada no processo com dados de temperatura da água, vazão de água por quilo de roupa e tempo de operação. Também foi disponibilizado para cada processo, a quantidade de roupa lavada por mês e o número de processos realizados. Com base nessas informações foi construído o perfil de demanda de água quente mostrado na Fig. (1).

O perfil mostrado na Fig. (1) será utilizado para representar o consumo de água quente da lavanderia durante todo ano. Segundo a empresa, está hipótese pode ser adotada já que a mesma possui contratos fixos com clientes e os processos tendem a se repetir diariamente apenas com pequenas variações no volume roupas.

3.2 Dimensionamento do Sistema

Inicialmente o sistema será dimensionado conforme algumas práticas comuns recomendadas por fabricantes e encontradas na literatura. Esse sistema inicial, denominado a partir de agora de “caso base” será utilizado como ponto de partida nas simulações. De acordo com INMETRO (2009), considerando apenas os coletores que possuem o selo PROCEL, os coletores solares produzem uma média de $80,4\text{kWh}/\text{m}^2\text{mês}$. Para fornecer água a uma temperatura de 60°C , levando em consideração o perfil de demanda da lavanderia, são necessários uma média de $78.953\text{MJ}/\text{mês}$. Dessa forma seria necessária uma área de $272,8\text{m}^2$ de coletores ou aproximadamente 169 unidades considerando uma área de $1,62\text{m}^2$ pra cada coletor. Para o volume do tanque será utilizada a relação de $50\text{l}/\text{m}^2$, bastante empregada para o dimensionamento de sistemas (INMETRO, 2009). A vazão nos coletores será de $30\text{kg}/\text{hm}^2$, e os mesmos estarão voltados para o norte sob um ângulo de inclinação de $\phi + 15^{\circ}$ com relação a superfície. Para todas as simulações as propriedades físicas foram consideradas constantes e determinadas a partir da média entre os seus valores a 25 e 60°C . A Tab. (1) faz um resumo dos principais parâmetros utilizados para o caso base e suas características financeiras e energéticas.

A partir do caso base, serão realizadas simulações para o dimensionamento dos principais componentes/parâmetros do sistema, a saber: ângulo de inclinação, vazão e área dos coletores e volume do reservatório térmico. Estes serão

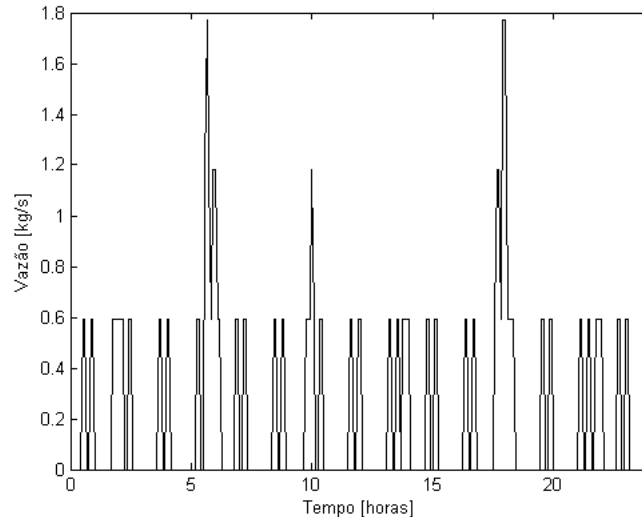


Figura 1. Perfil de demanda de água quente (60°C) da lavanderia

determinados seguindo a metodologia de otimização semelhante à utilizada por Abdel-Dayem and Mohamad (2001), Kalogirou (2003) e Hobbi and Siddiqui (2009). O parâmetro escolhido para otimização foi da Economia do Ciclo de Vida Anualizada (ECVA), ou seja, será definido como ótima e economicamente viável a configuração que resultar no maior valor positivo para a ECVA.

Tabela 1. Índices e custos utilizados nas simulações

Índice/custo	Valor
Taxa de inflação (%)	5,05
Taxa mínima atrativa (%)	13,84
Tempo de vida útil (anos)	20
Coletor (R\$/m ²)	330,97
Reservatório (R\$)	$C_s = 1428,1V_s + 799,07$
Combustível (R\$/m ³)	1,1448

3.3 Sistema Proposto

O sistema proposto será formado por um banco de coletores de placa plana composto por módulos conectados em paralelo. A circulação do fluido nos coletores será feita através de bomba (sistema ativo). A água aquecida nos coletores será enviada ao reservatório térmico (sistema direto) que por sua vez estará conectado ao boiler já existente na indústria, que servirá como fonte de energia auxiliar quando a temperatura do reservatório térmico ficar abaixo dos 60°C necessários. Caso ocorra o oposto, água vinda da rede de abastecimento poderá ser misturada no boiler até que seja atingida a temperatura ideal de demanda. Por fim a água do boiler é enviada para as lavadoras. Um esquema do sistema proposto é mostrado na Fig. (2).

3.4 Modelagem do Sistema

Para a simulação do sistema foi desenvolvido um programa utilizando a plataforma Matlab. O programa simula um sistema de aquecimento solar ativo/direto. Para a simulação dos coletores de placa plana foi utilizado o modelo de rendimento energético (Eq. (1)) determinado através das curvas de eficiência dos coletores em conjunto com as equações de correção da vazão e ângulo de incidência (Duffie and Beckman, 1991).

$$\eta_{co} = F_r(\tau\alpha)_n - F_r U_l \left(\frac{T_{f,i} - T_{amb}}{I_t} \right) \quad (1)$$

onde η_{co} é o rendimento energético, $F_r(\tau\alpha)_n$ [adimensional] e $F_r U_l$ [W/°Cm²] são parâmetros obtidos experimentalmente que caracterizam a forma com que o coletor absorve a radiação solar e perde energia para o ambiente, respectiva-

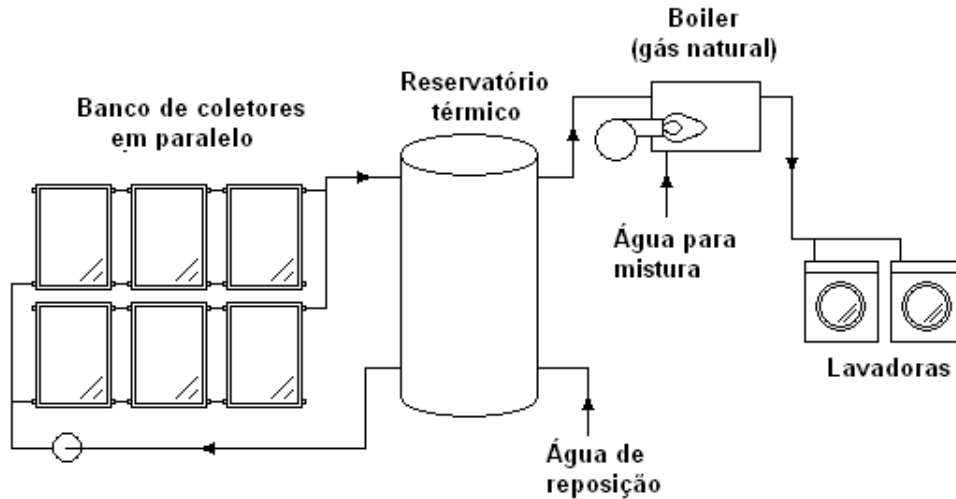


Figura 2. Esquema do sistema proposto

mente. $T_{f,i}$ [$^{\circ}C$] é a temperatura de entrada do fluido nos coletores, T_{amb} [$^{\circ}C$] é a temperatura ambiente e I_t [W/m^2] a radiação incidente nos coletores.

A energia útil fornecida pelos coletores, energia fornecida pelo sistema de aquecimento solar, energia auxiliar, perdas térmicas do tanque e energia total demandada pelo consumo foram definidas respectivamente segundo as Eqs. (2) a (7).

$$\dot{Q}_u = A_{co}[I_t K_{\theta} F_r (\tau \alpha) - F_r U_l (T_s^N - T_{amb})] \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{ls} = \dot{m}_l c_p (T_s^1 - T_r) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{ls} = \dot{m}_l c_p (T_s^1 - T_r) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{aux} = \dot{m}_l c_p (T_l - T_s^1) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{loss} = \sum_{j=1}^N U_s^j A_s^j (T_{amb} - T_s^j) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_l c_p (T_l - T_r) \quad (7)$$

onde A_{co} [m^2] é a área de coletores, K_{θ} o fator de correção quanto ao ângulo de incidência, T_s [$^{\circ}C$] é a temperatura do tanque, \dot{Q}_{ls} [W] é a energia fornecida pelo sistema solar, \dot{m}_l [kg/s] é a vazão demandada pelo processo (consumo), T_r [$^{\circ}C$] é a temperatura do fluido de reposição, \dot{Q}_{aux} [W] é a energia auxiliar, T_l [$^{\circ}C$] a temperatura de demanda do processo, \dot{Q}_{loss} [W] é a energia perdida pelo tanque, \dot{Q}_l [W] é a energia total demandada pelo processo, U_s [$W/^{\circ}Cm^2$] é o coeficiente global de transferência de calor do tanque, A_s [m^2] é a área superficial do tanque e j é o índice de representa os nós do tanque variando de 1 até N.

A tubulação que liga os coletores ao reservatório será considerada como um único nó de capacitância térmica desprezível. A Eq. (8) fornece a temperatura de saída do fluido na tubulação.

$$T_{f,o} = T_{amb} + (T_{f,i} - T_{amb}) \exp\left(-\frac{U_{tub} A_{tub}}{\dot{m}_f c_p}\right) \quad (8)$$

onde $T_{f,o}$ e $T_{f,i}$ [$^{\circ}C$] são as temperaturas de saída e entrada do fluido na tubulação, U_{tub} [$W/^{\circ}Cm^2$] o coeficiente global de transferência de calor da tubulação, A_{tub} [m^2] a sua área superficial, \dot{m}_f [kg/s] a vazão de fluido e c_p [$J/kg^{\circ}C$] o calor específico do fluido.

Para a simulação do reservatório térmico será empregado o modelo unidimensional de múltiplos nós com entrada fixa (parte superior e inferior do tanque) para um tanque completamente cheio sujeito a estratificação. É admitida a hipótese de que o fluido se encontra completamente misturado em cada nó. Para eliminar os efeitos de inversão térmica será utilizado o algoritmo de mistura por média desenvolvido por Newton (1995). Ao efeito de condução térmica entre os nós, foi acrescentado o termo Δk para levar em conta a condução pelas paredes do reservatório. O modelo descrito acima resulta na equação diferencial mostrada abaixo (Eq. (9)):

$$\begin{aligned} m_s c_p \frac{dT}{dt} = & U_s A_s (T_s - T_{amb}) + \dot{Q}_{up} + \dot{Q}_{down} + \dot{m}_{co} c_p (T_{co} - T_s) + \dot{m}_l c_p (T_r - T_s) + \\ & \dots + (k_f + \Delta k) A_{t,f} \Delta x \frac{d^2 T}{dx^2} \end{aligned} \quad (9)$$

onde:

$$\dot{Q}_{down} = (\dot{m}_{co} - \dot{m}_l)c_p(T_s^{j-1,i} - T_s^{j,i}) \quad \text{se } \dot{m}_{co} > \dot{m}_l \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{up} = (\dot{m}_l - \dot{m}_{co})c_p(T_s^{j+1,i} - T_s^{j,i}) \quad \text{se } \dot{m}_{co} < \dot{m}_l \quad (11)$$

e Δk é dado pela Eq. (12):

$$\Delta k = k_{par} \frac{A_{t,par}}{A_{t,f}} \quad (12)$$

Nas equações acima m_s [kg] é a massa de fluido de um nó, \dot{m}_{co} [kg/s] é a vazão nos coletores, T_{co} [°C] a temperatura de saída dos coletores, k_f e k_{par} [W/m°C] a condutividade térmica do fluido e da parede do reservatório, respectivamente, Δx [m] é a altura de um nó, $A_{t,par}$ e $A_{t,f}$ [m²] são as áreas transversais da parede e da região do fluido do reservatório, respectivamente.

3.5 Análise Financeira

A análise financeira realizada nesse trabalho adotará o método da economia do ciclo de vida anualizada (ECVA) (Duffie and Beckman, 1991) como critério de decisão, dado pela Eq. (13):

$$ECVA = CCVA_{conv} - CCVA_{solar} \quad (13)$$

onde $CCVA_{conv}$ é o custo do ciclo de vida anualizado do sistema convencional pré-existente e $CCVA_{solar}$ é o custo do ciclo de vida anualizado do sistema solar integrado ao sistema convencional. O $CCVA_{conv}$ foi determinado segundo a Eq. (14):

$$CCVA_{conv} = \overbrace{Q_l C_{comb}(P/G; d; i; n)(U/P; d; n)}^{\text{Custo com combustível}} \quad (14)$$

onde C_{comb} [R\$/J] é a tarifa do combustível e n [anos] o período correspondente a vida útil do sistema, d [decimal] é a taxa mínima atrativa do mercado e i [decimal] a taxa de inflação. O custo de manutenção do boiler será o mesmo para ambos os sistemas, o que dispensa a necessidade de incluí-lo. Como o sistema já se encontra instalado seu custo inicial também não é levado em consideração.

O $CCVA_{solar}$ foi definido segundo a Eq. (15):

$$\begin{aligned} CCVA_{solar} = & \overbrace{(C_s + A_{co}C_{co})C_{ins}(U/P; d; n)}^{\text{Investimento inicial}} + \\ & \dots + \overbrace{(C_s + A_{co}C_{co})C_{ins}C_{man}(P/G; d; i; n)(U/P; d; n)}^{\text{Custo com manutenção}} + \\ & \dots + \overbrace{Q_{aux}C_{comb}(P/G; d; i; n)(U/P; d; n)}^{\text{Custo com combustível}} \end{aligned} \quad (15)$$

onde C_s [R\$] é o custo do tanque, C_{co} [R\$] é o custo dos coletores e C_{ins} e C_{man} [decimal] são acréscimos de custo equivalentes a instalação e a manutenção do sistema. Nas equações acima $(P/G; d; i; n)$ é o valor presente de uma série geométrica de lançamentos e $(U/P; d; n)$ é a série uniforme de um valor presente, definidos de acordo com as Eqs. (16) e (17):

$$P = G(P/G; i; d; n) = G \frac{1}{(d-i)} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^n \right] \quad (16)$$

$$U = P(U/P; d; n) = P \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (17)$$

onde G [R\$] é o valor do primeiro lançamento da série geométrica e U [R\$] o valor dos lançamentos da série uniforme.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa sessão serão determinados os principais parâmetros do sistema de aquecimento solar para o caso da lavanderia estudada seguindo a metodologia descrita na sessão anterior. No caso base foram utilizadas médias diárias mensais de radiação global para a cidade de Recife-PE (Tiba *et al.*, 2004). Os modelos utilizados nos dados de radiação foram o de Collares-Pereira and Rabl (1979) para separação de radiação difusa e de Reindl *et al.* (1990) para a determinação da radiação incidente numa superfície inclinada. O passo de tempo do programa foi de 300s, para isso os dados de radiação foram interpolados a partir das médias horárias.

4.1 Determinação do Ângulo de Incidência dos Coletores

Mantendo-se o ângulo dos coletores fixo durante o ano consegue-se a máxima economia do ciclo de vida anualizada (Fig. (3)) para $\beta = 16,1^\circ$, ($\phi + 8$). O valor encontrado encontra-se próximo do valor sugerido por outros autores (Duffie and Beckman (1991); Skeiker (2009) e Sharia *et al.* (2009)). O ângulo de inclinação não é crítico numa região de $\pm 5^\circ$ produzindo apenas uma pequena variação nos valores da ECVA, o que é interessante para fins práticos permitindo assim certa margem de erro durante a instalação. O comportamento dos demais parâmetros de análise do sistema como a TIR, *payback*, fração solar e rendimento energético dos coletores, não mostrados aqui, acompanhou a mesma tendência da Fig. (3) atingindo um valor ótimo na mesma região de $\beta = \phi + 8$.

O aumento do ângulo de incidência implica numa maior captação de energia durante o inverno pelos coletores. Isso é vantajoso em sistemas domésticos onde a demanda por água quente cresce nesses meses. No caso do sistema em questão a demanda é a mesma durante todo o ano, assim, a maior captação de energia durante o inverno não compensa a redução que ocorre ao longo dos outros meses.

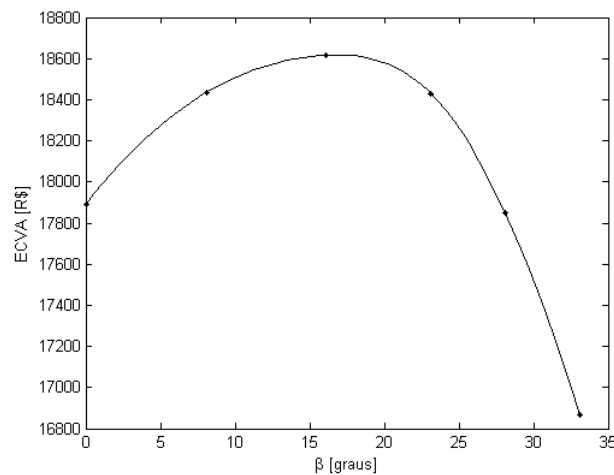


Figura 3. Variação da ECVA em função da vazão nos coletores

4.2 Determinação da Vazão nos Coletores

A vazão nos coletores será determinada seguindo a mesma metodologia utilizada te. A partir desse ponto as simulações ocorreram com os coletores sob o ângulo fixo de $\beta = 16,1^\circ$ durante todo o ano.

A Fig. (4) mostra um valor máximo para uma vazão de $11\text{kg}/\text{hm}^2$. O valor é próximo do encontrado por Abdel-Dayem and Mohamad (2001) de $15\text{kg}/\text{hm}^2$ através de otimização realizada para um sistema de aquecimento também aplicado a uma lavanderia com base na ECV do sistema. Para uma variação desse sistema, com a água dos coletores alimentando uma caldeira, o autor chegou a uma vazão ótima de $7,2\text{kg}/\text{hm}^2$. Ainda no mesmo trabalho é sugerida uma vazão para sistemas de grande porte que vai de 9 a $18\text{kg}/\text{hm}^2$. Na otimização feita por Hobbi and Siddiqui (2009) para um sistema doméstico com relação à máxima fração solar do sistema autor sugere uma vazão entre $20\text{-}40\text{kg}/\text{hm}^2$. O valor de vazão encontrado também está em boa concordância com os relatos por Duffie and Beckman (1991).

Ainda na Fig. (4) pode ser visto um dos principais problemas no uso de baixas vazões em sistemas ativos. Se não for bem dimensionado o sistema pode apresentar pontos de má distribuição da vazão. O aumento da vazão não é crítico levando a alterações suaves nos parâmetros aqui analisados. Porém, a redução da vazão é crítica levando ao aumento da temperatura média do coletor e a consequente queda no seu rendimento. A queda acentuada é notada para valores menores que $9\text{kg}/\text{hm}^2$, ou seja, deverá ser assegurada uma vazão acima desse limite em todos os pontos do sistema a fim de se evitar esse problema.

4.3 Determinação da Área de Coletores

A determinação da área de coletores para o sistema será feita utilizando-se a um ângulo fixo de $16,1^\circ$ e vazão de $11\text{kg}/\text{hm}^2$ como determinado na sessão anterior. A indústria possui uma área de telhado de aproximadamente 400m^2 , neste trabalho será considerado que toda a área do telhado está disponível para a instalação dos coletores. O local é cercado basicamente por residências ou construções de igual porte, o prédio mais alto encontra-se a menor distância de 40m do local.

O máximo valor da ECVA (Fig. (5)) é conseguido para 154 coletores solares, o que equivale a uma área de $\approx 250\text{m}^2$.

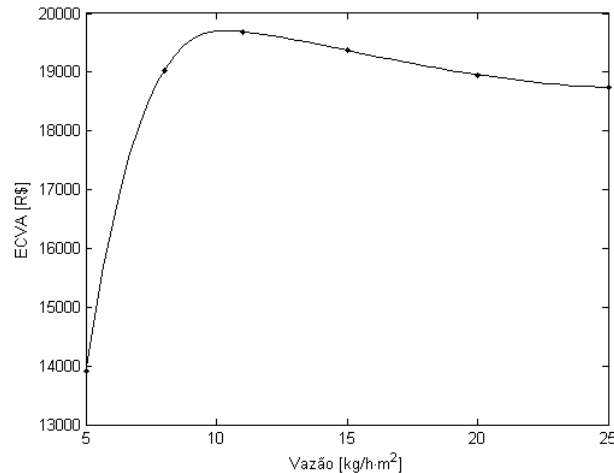


Figura 4. Variação da ECVA em função da vazão nos coletores

O valor é pouco mais do que a metade da área livre de telhado da indústria o que permite sua instalação sem maiores problemas. A fração solar (Fig. (6)) como esperado, cresce à medida que a área de coletores cresce. Para uma área de $250m^2$ o sistema de aquecimento solar atende 87,35% da energia demandada para o aquecimento. A partir desse ponto, o acréscimo da fração solar não é economicamente vantajoso.

A Fig. (7) mostra a variação da eficiência energética dos coletores. A área equivalente a máxima eficiência dos coletores não coincide com a obtida pela máxima ECVA. Para uma área aproximada de $250m^2$ a eficiência dos coletores é de 50,88%. Para um dado volume fixo do tanque, quanto maior o número de coletores, maior será o volume de água quente entrando no tanque. Dependendo dessa vazão de entrada e do volume do tanque, as temperaturas mais altas podem atingir o fundo do tanque, ou seja, o coletor passa a ser alimentado por água a temperaturas mais altas diminuindo assim sua eficiência. Comportamento semelhante é apresentado em Abdel-Dayem and Mohamad (2001).

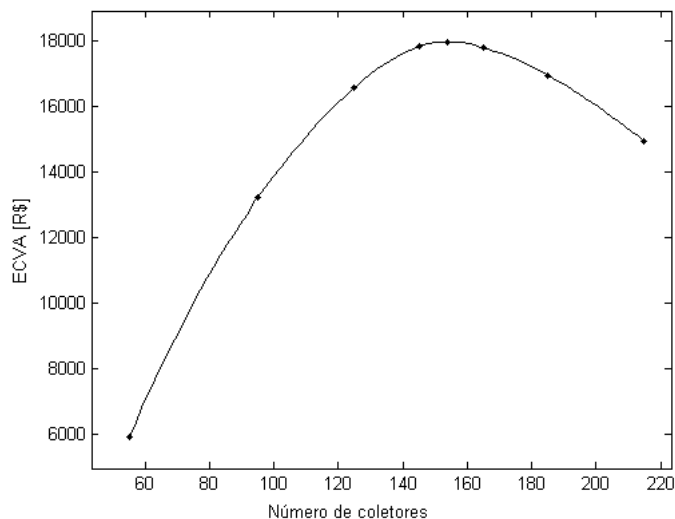


Figura 5. Variação da ECVA em função do número de coletores

4.4 Determinação do Volume do Reservatório

A determinação do volume do reservatório foi feita através da variação da razão do volume do reservatório pela área de coletores (V_r/A_{co}). A investigação partirá de um sistema utilizando os parâmetros determinados até o momento, ou seja: $\beta = 16,1^\circ$, $\dot{m} = 11kg/hm^2$ e 154 coletores ($A_{co} \approx 250m^2$).

O máximo valor de ECVA (Fig. (8)) foi obtido para razão $V_r/A_{co} = 56l/m^2$, o que não difere muito com o utilizado inicialmente no caso base onde $V_r/A_{co} = 50l/m^2$ e está em boa concordância com outros resultados encontrados na literatura. Kalogirou (2009) sugere que este valor deva estar entre $35 - 70l/m^2$. O mesmo autor em Kalogirou (2003)

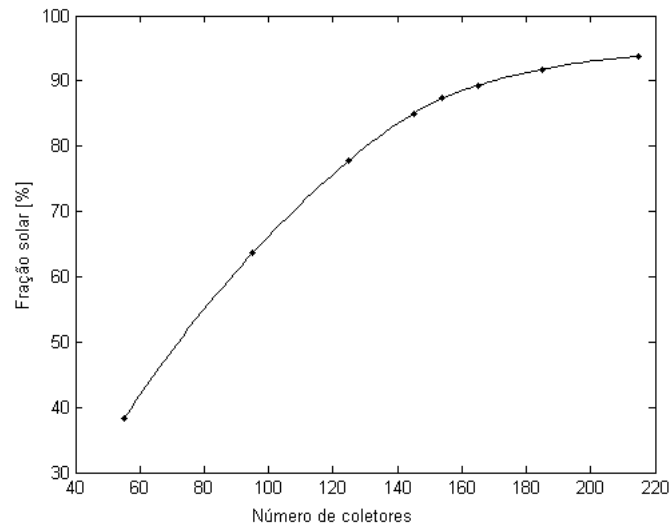


Figura 6. Variação da fração solar em função do número de coletores

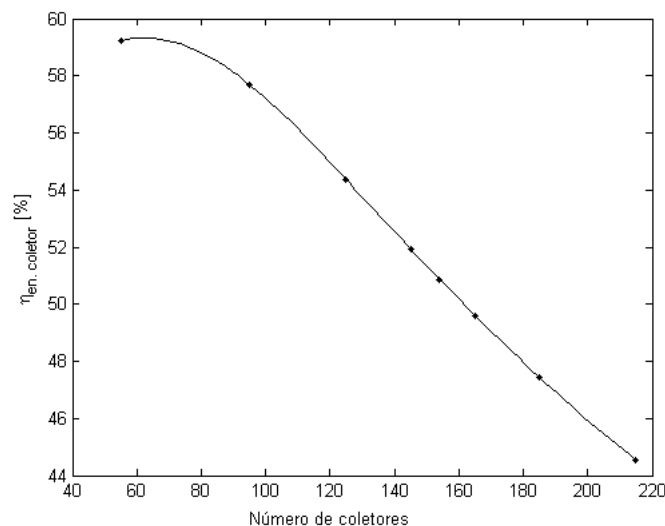


Figura 7. Variação do $\eta_{en.coletor}$ em função do número de coletores

determinou através de uma otimização com relação à ECVA, para uma dada aplicação industrial com um perfil de consumo de 5 dias por semana apenas durante o dia e para uma temperatura de demanda de $60^{\circ}C$, uma razão de $83l/m^2$. Duffie and Beckman (1991) utiliza $75l/m^2$ como padrão para o dimensionamento de sistemas através do método *f-chart*. No estudo de otimização realizado por Hobbi and Siddiqui (2009), o autor recomenda uma razão entre $55 - 65l/m^2$ para a determinação do volume do reservatório.

A configuração final do sistema proposto é mostrada na Tab. (2). A metodologia empregada neste trabalho resultou no dimensionamento de um sistema menor, com a redução de 6,89% do seu custo inicial, e mais economicamente eficiente com um aumento de 8,72% na ECVA com relação ao sistema dimensionado utilizando parâmetros sugeridos por fabricantes e encontrados na literatura. O sistema final também apresenta uma taxa interna de retorno de 29,6%, o que também demonstra que o investimento é viável e possibilita, por exemplo, o financiamento do investimento inicial.

5. CONCLUSÕES

A integração de um sistema de aquecimento de água através de energia solar para atender a demanda da lavanderia estudada neste trabalho mostrou-se técnica e economicamente viável.

A metodologia empregada neste trabalho reduziu o custo inicial do sistema em 6,89%, tornando-o mais economicamente eficiente com um aumento de 8,72% da sua ECVA com relação ao sistema dimensionado utilizando parâmetros sugeridos por fabricantes e encontrados na literatura.

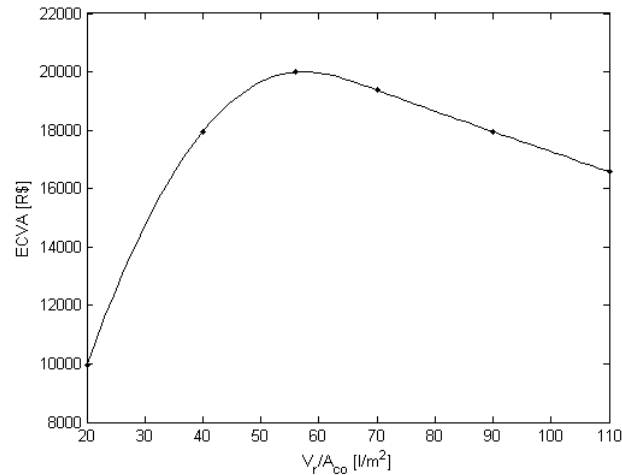


Figura 8. Variação da ECVA em função da razão V_r/A_{co}

Tabela 2. Características do sistema proposto para o estudo de caso

Característica	Valor
Área de coletores (m^2)	249,48
Volume do tanque (m^3)	13,9
β (graus)	16,1 ($\phi + 8$)
Vazão nos coletores (kg/hm^2)	11
F_{solar} (%)	87,54
$\eta_{en.coletor}$ (%)	50,92
Investimento inicial (R\$)	113.653,41
ECVA (R\$)	20.002,41
Payback (anos)	5,4
TIR (%)	29,6

6. AGRADECIMENTOS

À Érika Rocha, da Lavanderia Hospitalav, pela disponibilidade e contribuições prestadas ao trabalho.
À FACEPE pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Abdel-Dayem, A.M. and Mohamad, M.A., 2001. "Potential of solar energy utilization in the textile industry - a case study". *Renewable Energy*, Vol. 23, No. 3–4, pp. 685–694.
- Anderson, T.N. and Duke, M., 2008. "Solar energy use for energy savings in dairy processing plants". *IPENZ engineering treNz*.
- Collares-Pereira, M. and Rabl, A., 1979. "The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse hemispherical and between daily and hourly insolation values". *Solar Energy*, Vol. 22, No. 2, pp. 155–164.
- Desideri, U., Proietti, S. and Sdringola, P., 2009. "Solar-powered cooling systems: Technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications". *Applied Energy*, Vol. 86, No. 9, pp. 1376–1386.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Nova York, 2nd edition.
- Hobbi, A. and Siddiqui, K., 2009. "Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS". *Solar Energy*, Vol. 83, No. 5, pp. 700–714.
- IEA, 2008. "Potencial for solar heat industrial process". 10 dez. 2009 <www.iea-shc.org/task33/publications/index.html>.
- INMETRO, 2009. "Programa brasileiro de etiquetagem - sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água". 11 nov. 2009 <www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/PBE12.pdf>.
- Kalogirou, S., 2003. "The potential of solar industrial process heat applications". *Applied Energy*, Vol. 76, No. 4, pp. 337–361.
- Kalogirou, S., 2009. *Solar Energy Engineering - processes and systems*. Elsevier, Oxford, 1st edition. ISBN 978-0-12-

374501-9.

- Kulkarni, G.N., Kedare, S.B. and Bandyopadhyay, S., 2008. "Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications". *Solar Energy*, Vol. 82, No. 8, pp. 686–699.
- Newton, B.J., 1995. *Modeling of solar storage tanks*. Mestrado em engenharia mecânica, University of Wisconsin, Madison.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., 1990. "Diffuse fraction correlations". *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 1–7.
- Schnitzer, H., Brunner, C. and Gwehenberger, G., 2007. "Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, No. 13–14, pp. 1271–1286.
- Sharia, A., Al-Akhras, M.A. and Al-Omari, I.A., 2009. "Optimizing the tilt angle of solar collectors". *Renewable Energy*, Vol. 26, No. 4, pp. 587–598.
- Skeiker, K., 2009. "Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in syria". *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 9, pp. 2439–2448.
- Tiba, C., Fraidenraich, N., Gallegos, H.G. and Lyra, F.J.M., 2004. "Brazilian Solar Resource Atlas CD-ROM". *Renewable Energy*, Vol. 29, No. 6, pp. 991–1001.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF AN INDUSTRIAL SOLAR WATER HEATING SYSTEM

Thiago Parente Lima, thiago.parente@gmail.com

José Carlos Charamba Dutra, charamba@ufpe.com.br¹

Ana Rosa Mendes Primo, armprimo@ufpe.com.br¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - CEP 50740-530 - Recife, PE - Brasil

Abstract. *Solar energy is a kind of renewable energy that possesses an enormous potential for application in some industry sectors. However, in Brazil the utilization of solar energy in industrial systems of water heating has few users, although some industrial processes need heated water at temperature that could be easily achieved by the utilization of simple flat plat collectors. This work uses a numerical simulation to study the technical and economic viability of a solar heating system applied to a laundry in Recife, a town located in Northeast Brazil with 3,7 million inhabitants. In order to carry out the technical analysis of the system, the thermal behavior of a system composed by flat plat collectors was analyzed. After the modeling of the system components, some parameters were optimized as inclination angle, flow and collector area, as well as the volume of the reservoir. To the economical analysis, the utilized optimization parameter were the savings with the use of the solar heating system in comparison with the actual reduction system used at the moment by the industry, which uses natural gas as source of energy. The results showed that the reduction of fuel induced by the use of a solar heating system turns viable the utilization of this kind of alternative energy for this industry sector.*

Palavras-chave: *solar energy, viability analysis, flat plat collector, water heating, numerical simulation*