



Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar de água para aplicações industriais

Design of a solar water heating system for industrial applications

Rafaela Ramos Barbosa¹

Monica Carvalho²

Resumo: No Brasil, o uso industrial da energia solar cresce timidamente embora as vantagens econômicas e ambientais estejam demonstradas. Existe a necessidade de amadurecer o uso desta fonte, frente a sua disponibilidade no país, para acompanhar o cenário mundial e favorecer e promover sua utilização em políticas públicas e estratégias de desenvolvimento econômico. Apresenta-se aqui um roteiro de dimensionamento de um Sistema de Aquecimento Solar com foco em aplicações industriais, elaborado com base em referências bibliográficas consistentes. O objetivo é facilitar o dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água para aplicações não residenciais. Destaca-se a importância da consideração das condições climáticas ao longo do ano, bem como a relevância de se utilizar dados confiáveis de radiação solar e o potencial deste tipo de aplicação no Brasil para a diversificação da matriz energética brasileira e racionalização dos recursos energéticos com a contribuição da energia solar. Ao verificar o perfil do consumo de água quente e os resultados obtidos no cálculo das perdas térmicas predominantes, optou-se por dobrar o volume de armazenamento para garantir o atendimento ao consumo.

Palavras-chave: Energias renováveis, Aquecimento de Água, Energia Solar.

¹ UFPB – Universidade Federal da Paraíba

² UFPB – Universidade Federal da Paraíba

Abstract: In Brazil, the utilization of solar energy grows timidly despite the demonstration of economic and environmental advantages. There is a necessity of maturing the use of this resource, due to its wide availability in the country, to accompany the global scenario and favor and promote its utilization through public policies and economic development strategies. A design guide for a Solar Heating System is presented herein, focused on industrial applications, elaborated considering consistent bibliographical references. The objective is to provide the sizing of solar water heating systems for non-residential applications. The importance of considering climatic conditions throughout the year is highlighted, as well as a relevance of reliable solar radiation data and the potential of this type of application in Brazil for a diversification of the Brazilian energy matrix and rationalization of resources with the contribution of solar energy. After verification of the hot water profile and the results obtained in the calculations of predominant thermal losses, the storage volume was doubled to assure that hot water demands were satisfied.

Keywords: Renewable energy, Water Heating, Solar Energy.

1. Introdução

As energias renováveis se apresentam como uma alternativa aos convencionais sistemas geradores de energia. A localização geográfica do Brasil o torna um dos países com maior potencial de exploração em energias renováveis, com destaque em algumas regiões para a energia solar (BRASIL, 2008).

O setor industrial brasileiro é responsável por cerca de um terço de toda a demanda energética nacional (BRASIL, 2014). Grande parte daquela energia é direcionada para os processos industriais, seja na utilização de energia elétrica como também na geração de energia térmica, também chamado calor de processo. Em grande parte dos processos industriais são necessárias temperaturas entre 60 a 250°C (HOOKER; MAY; WEST, 1980; KALOGIROU, 2003; MUNEEER; MAUBLEU; ADIF, 2006; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; VAJEN; LAUTERBACH; SCHMITT, 2012; KURUP; TURCHI, 2016). Por meio da utilização de tecnologias já bem consolidadas, coletores e concentradores solares, é possível atingir esses níveis de temperaturas por meio do uso da energia solar.

Os sistemas solares térmicos industriais são capazes de suprir total ou parcialmente demanda de calor dependendo das condições estabelecidas no projeto. O primeiro passo para estabelecer tais condições é a determinação das temperaturas necessárias seguido da determinação da localização da instalação, análise das condições climáticas local, área para instalação do sistema, investimento disponível e escolha da tecnologia (EUROPEAN COMMISSION, 2001; JAISANKAR *et al.*, 2011).

Para que os sistemas de energia solar apresentem funcionamento adequado e eficiente é necessário que alguns critérios sejam estabelecidos (MALO, 2013; MARTINEZ, 2009; RAMLOW; NUSZ, 2010; NORTON, 2013; NORTON, 2014), descrevendo os métodos utilizados para o desenvolvimento de um Sistema de Aquecimento solar (SAS), assim como a escolha dos dados de radiação solar empregados considerando o perfil da demanda de água quente, sua aplicação e as condições climáticas em que o SAS será submetido.

Sistemas de aquecimento solar (SAS) são caracterizados pelo emprego de equipamentos capazes de realizar o aproveitamento térmico da radiação solar incidente. Os SAS de água são os que atualmente possuem maiores possibilidades de aplicações, pois representa uma importante estratégia para o consumo de energia em diferentes setores. Em aplicações residenciais e comerciais este tipo de sistema pode contribuir com diminuições significativas na demanda de energia do sistema elétrico. No setor industrial, além de apresentar potencial na diminuição do consumo de eletricidade estes sistemas se apresentam como uma alternativa competitiva a utilização de sistemas geradores de calor de processo e na diminuição da utilização de combustíveis fósseis.

O objetivo deste estudo é apresentar o passo-a-passo para o dimensionamento de um Sistema de Aquecimento Solar para fins industriais. Ainda que a pesquisa seja aplicada, em termos do caso de estudo adotado, o trabalho possui importância científica global. A dimensão local, até mesmo o foco específico na indústria, é somente uma maneira de demonstrar a relevância da ciência.

2. Materiais e métodos

A partir dos elementos mínimos necessários exigidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e utilizando as informações da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA, 2008), construiu-se a metodologia para o projeto e para análise da viabilidade técnica da implantação de um SAS de água para processos industriais, e definiram-se as ferramentas necessárias para sua execução. A Figura 1 (BARBOSA, 2017) foi elaborada com base nas informações da ABNT e ABRAVA.

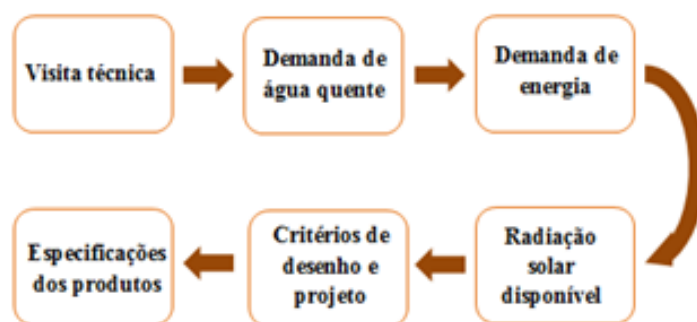


Figura 1 – Roteiro para execução de projeto de um SAS (BARBOSA, 2017).

2.1 Levantamento de dados

Para o desenvolvimento do trabalho e exemplificação da metodologia recomendada será considerado o perfil de consumo de água quente em uma indústria têxtil, localizada em João Pessoa, Paraíba. A indústria opera durante 24 horas diárias, com pausas programadas apenas por 24 horas a cada um mês para manutenção preventiva dos equipamentos e por um período de recesso de 15 dias entre os meses de dezembro e janeiro, sendo a parada de 7 e 8 dias, respectivamente. A indústria apresenta uma demanda mensal de água quente, com temperaturas entre 50 a 60°C, variando entre aproximadamente 230 a 300 m³/mês (cerca de 10 m³/dia), o que equivale a uma vazão de consumo de aproximadamente 0,12 kg/s.

O comportamento é pouco variável ao longo dos meses, o que implicará em uma demanda de energia para aquecimento da água com comportamento similar. No entanto, para determinar com melhor precisão a energia útil associada ao atendimento da demanda de água, é necessário conhecer as condições climáticas do local durante todo o ano. Na Tabela 1 estão apresentados os

dados climáticos históricos para a cidade de João Pessoa, disponíveis no Climaticus 4.2 (ALUCCI, 2011).

Tabela 1- Dados médios mensais para a cidade de João Pessoa (1951-2011).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Temp. Média (°C)	25,8	25,2	28,2	25,5	27	26,2	23,7	25,4	27,5	27,7	27	24,1	26,1
Temp. Máx. (°C)	31,8	30,5	30	29,8	29,6	28,3	26,3	27,8	28,3	29,3	29,7	30	29,3
Temp. Mín. (°C)	22,8	22,6	21,2	22,9	22,2	21,8	20,3	21,7	18,9	23,3	23,2	23	21,9
Umidade Relativa (%)	75	75	81	79	81	81	87	75	67	73	74	74	76,8
Nebulosidade (0-10)	5,6	5,8	6,1	6	6,2	6,1	6	5,2	5,7	5,1	5,4	5,3	5,7
Insolação Total (horas)	244	219	209	182	194	181	149	212	235	266,2	273	229	216,1
Velocidade do vento (m/s)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	3,00	2,50	2,50	2,00	2,50

FONTE: (ALUCCI, 2011).

O próximo passo consiste da estimativa da energia solar disponível. Há softwares e planilhas de cálculo disponíveis gratuitamente na internet, que a partir das coordenadas geográficas de uma determinada cidade fornecem valores médios mensais e anuais da radiação solar disponível para diferentes inclinações e orientações. Neste trabalho utilizou-se o software RadiaSol 2 (UFRGS, 2010).

Para obter os valores de radiação solar por meio do RadiaSol 2, além da localização geográfica devem-se especificar a inclinação, a orientação da superfície e o albedo das superfícies adjacentes aos coletores. Aqui se considerou o albedo do telhado da indústria de 0,6, com a inclinação dos coletores de 16°N e a orientação de 180°N (ângulo azimutal).

2.2 Dimensionamento do sas

A NBR 15669 (2008) apresenta em sua metodologia de cálculo duas alternativas para o dimensionamento de sistemas de aquecimento solar, dependendo da finalidade do sistema: i) residências unifamiliares, ou ii) demais casos. A metodologia seguida no caso ii) é o método *f-Chart* segundo Duffie e Beckman (2014). Porém, com o objetivo de observar as perdas presentes em cada parte do SAS e a identificação dos motivos, incluíram-se mais detalhes a fim de propor possíveis soluções e assim um SAS mais eficiente. Cada uma das etapas necessárias ao dimensionamento do SAS estão descritas a seguir:

- Primeira etapa: Volume de Armazenamento

O volume de armazenamento pode ser calculado pela Equação 1 (ABNT, 2008):

$$V_{\text{armaz}} = [V_{\text{consumo}} (T_{\text{consumo}} - T_{\text{amb}})] / (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}}) \quad (1)$$

Na equação 1, V_{consumo} = consumo diário (m^3), T_{consumo} = temperatura de consumo de utilização ($^{\circ}\text{C}$), T_{armaz} = temperatura de armazenamento da água ($T_{\text{armaz}} > T_{\text{consumo}}$) ($^{\circ}\text{C}$) e T_{amb} = temperatura ambiente média anual do local da instalação ($^{\circ}\text{C}$).

- 2º Etapa: Demanda Diária de Energia Útil ($E_{\text{útil}}$)

A demanda diária de energia útil é a quantidade de energia utilizada para aquecer a quantidade de água necessária por dia até a temperatura desejada. Segundo a NBR 15669 (ABNT, 2008) a $E_{\text{útil}}$ pode ser determinada, em kWh/dia:

$$E_{\text{útil}} = [V_{\text{armaz}} \rho C_p (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})] / 3600 \quad (2)$$

Na equação 2, ρ é a massa específica da água (1000 kg/m^3), C_p é o calor específico da água a pressão constante ($4,18 \text{ kJ/kg K}$), V_{armaz} será considerado igual ao consumo médio diário (para esse cálculo) em m^3/dia , T_{armaz} será considerado igual à temperatura requerida no processo industrial (para esse cálculo) ($^{\circ}\text{C}$) e T_{ambiente} é a temperatura média do ambiente ($^{\circ}\text{C}$) (considera-se que a água está inicialmente na mesma temperatura).

- 3º Etapa: SAS Proposto sem perdas

A Figura 2 mostra um esboço do esquema proposto para a instalação do sistema de aquecimento solar. O sistema proposto apresenta circulação forçada direta, ou seja, é feito o uso de bombas para circulação da água e a água que circula nos coletores que é a mesma do consumo. Para determinação da área de coletores deve ser feita uma estimativa inicial, onde serão considerados os valores médios da radiação, da temperatura ambiente local e serão desconsideradas as perdas devido ao vento. Os valores inicialmente calculados serão usados como ponto inicial de sucessivas interações e serão obtidos a partir de balanços de energia nos principais componentes do sistema proposto. A seguir, por meio da 1ª Lei da Termodinâmica em cada um dos componentes do sistema considerando a conservação da massa e regime permanente são obtidas as equações que formarão um sistema de equações a ser resolvido posteriormente.

- Balanço de Energia nos Coletores Solares:

$$0 = I A_c n - m_c C_p (T_{c2} - T_{c1}) \quad (3)$$

Na equação 3, I é a irradiação solar (W/m^2), A_c é a área dos coletores (m^2), n é o número de coletores (unidades), m_c é a massa de água na entrada dos coletores (kg/s), C_p é o calor específico da água a pressão constante ($4,18 \text{ kJ}/\text{kg K}$), e T_{c2} e T_{c1} são, respectivamente, as temperaturas na entrada e saída dos coletores ($^\circ\text{C}$)

- Balanço de Energia no Tanque de Armazenamento:

$$0 = m_c C_p (T_{c2} - T_{c1}) - m_{\text{consumo}} C_p (T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (4)$$

Na equação 4, m_{consumo} é igual a vazão mássica da água de alimentação em kg/s , e T_{consumo} e T_{ambiente} são, respectivamente, as temperaturas ($^\circ\text{C}$) de consumo e do ambiente.

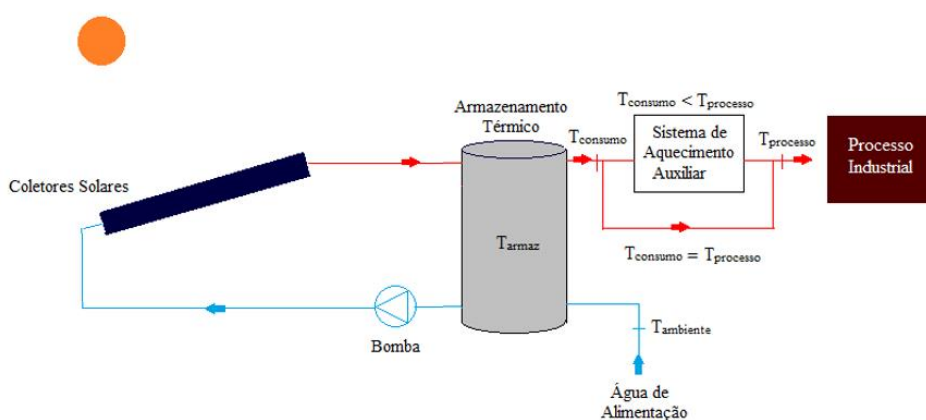


Figura 2 – Esquema de Funcionamento Proposto do SAS (BARBOSA, 2017).

A Equação 2 foi aplicada considerando a temperatura do tanque de armazenamento constante, porém é importante considerar que esta temperatura não será uniforme, o que torna necessária a determinação de uma temperatura média de armazenamento, T_{armaz} .

O tanque tende a apresentar uma temperatura estratificada que varia entre a temperatura de alimentação e a temperatura de consumo. Para considerar este efeito é determinando um coeficiente adimensional (E_{armaz}) que será igual a 0 quando $T_{\text{armaz}} = T_{\text{ambiente}}$ e igual a 1 quando $T_{\text{armaz}} = T_{\text{consumo}}$. Essa estratificação ocorre devido à diferença de densidade da água no tanque, a água mais quente e menos densa fica na parte superior do tanque enquanto que a água fria e mais densa fica na parte inferior.

A variação do coeficiente de estratificação térmica no tanque, E_T , pode ser calculada pela Equação 5:

$$E_{\text{armaz}} = (T_{\text{consumo}} - T_{\text{armaz}}) / (T_{c2} - T_{\text{armaz}}) \quad (5)$$

Realizando um balanço de energia considerando a estratificação térmica do tanque de armazenamento obtém-se:

$$0 = m_c c_p T_{c2} + m_{\text{consumo}} c_p T_{\text{ambiente}} = (m_c + m_{\text{consumo}}) c_p T_{\text{armaz}} \quad (6)$$

Logo, a temperatura média de armazenamento do tanque pode ser calculada:

$$T_{\text{armaz}} = (m_c T_{c2} + m_{\text{consumo}} T_{\text{ambiente}}) / (m_c + m_{\text{consumo}}) \quad (7)$$

A área coletora necessária é determinada pela relação entre a energia solar que é efetivamente usada para aquecer a água do sistema e a energia necessária para o aquecimento da água nas condições desejadas:

$$f = [m_{\text{consumo}} c_p (T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}})] / [m_{\text{consumo}} c_p (T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}})] \\ = (T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}}) / (T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (8)$$

f é um índice que determina a contribuição solar do sistema de aquecimento e varia de acordo com a configuração e a localização do sistema. O número de coletores solares necessários é calculado pela Equação 9:

$$N_{\text{coletores}} = A_c / A_{tc} \quad (9)$$

A_{tc} é a área da cobertura de vidro do coletor, também chamada de área transparente.

Os seguintes dados são conhecidos: Radiação Incidente no plano inclinado (W/m^2); Eficiência dos coletores solar usados (%); Temperatura da água de alimentação (T_{ambiente}); Temperatura requerida no processo ($T_{\text{processo}} = 60^\circ\text{C}$); Vazão de consumo ($m_{\text{cons}} = 0,12 \text{ kg/s}$); Propriedades do fluido de trabalho (água); Área transparente dos coletores (m^2). As variáveis desconhecidas são: Temperatura de entrada dos coletores (T_{c1} , $^\circ\text{C}$); Temperatura de saída dos coletores (T_{c2} , $^\circ\text{C}$); Vazão mássica necessária no banco de coletores (kg/s); Temperatura média do tanque de armazenamento (T_{armaz} , $^\circ\text{C}$); Temperatura de consumo (T_{consumo} , $^\circ\text{C}$); Área coletora (A_c , m^2).

A resolução das equações 3 a 9 é feita a partir de um sistema de equações, resolvido no Software *Engineering Equation Solver* (EES, 2017), considerando inicialmente uma fração solar de 80% e T_{c1} 20% maior que T_{ambiente} (estratificação térmica no tanque de armazenamento). Após determinada a primeira estimativa da área coletora, podem-se fazer estimativas da fração solar para todos os meses do ano, por meio da resolução do mesmo sistema de equações usado anteriormente no EES.

Uma vez proposto o SAS em condições ideais, é necessário calcular as perdas que ocorrem no sistema, e inclui-las no dimensionamento final. As perdas dividem-se em duas partes principais, de acordo com o local da instalação onde ocorrem: i) perdas nos coletores solares (considerada no cálculo da energia útil coletada), e ii) perdas no armazenamento.

2.3 Energia útil coletada

O coletor solar plano absorve a radiação solar incidente, no entanto, parte daquela energia é perdida para o ambiente. A energia útil coletada é a fração da energia que é absorvida pelo coletor e convertida em energia térmica, ou seja, é a diferença entre a energia solar incidente no coletor e a perda para o ambiente.

Para a quantificação da energia útil coletada é necessário a realização de um complexo cálculo iterativo. A Figura 3 mostra o fluxograma do método iterativo proposto.

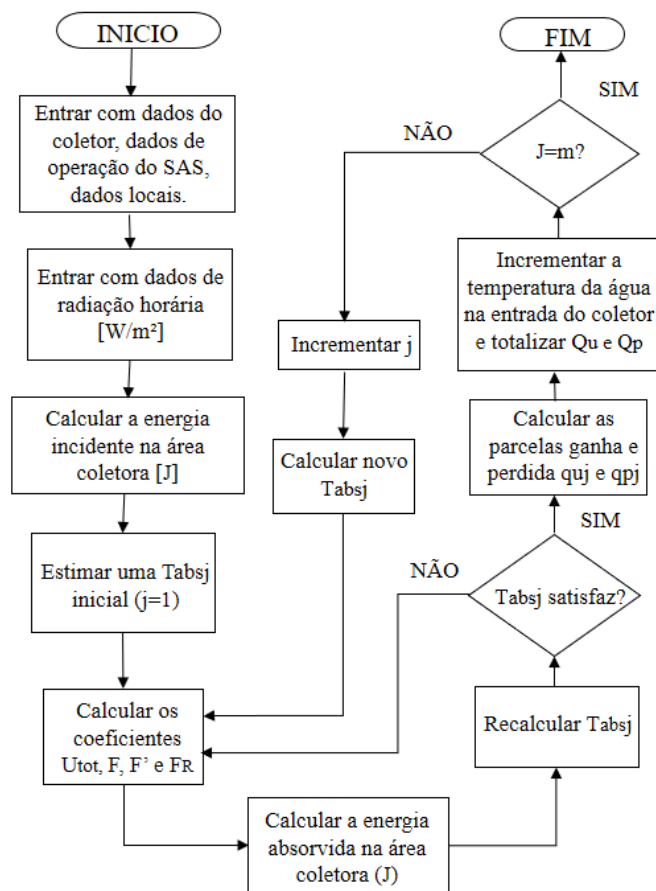


Figura 3 – Fluxograma para o cálculo da energia útil coletada (Adaptado de KLUPPEL, 2016).

A estimativa inicial da temperatura da placa absorvedora, $T_{abs(j=1)}$, será feita a partir da suposição que a temperatura da placa inicialmente será igual a temperatura média do ambiente mais 10 K (DUFFIE; BECKMAN, 2014).

O cálculo do coeficiente global de perda de calor do coletor solar, U_{tot} , fator de rendimento das aletas, F , fator de rendimento de captação F' e do fator de remoção de calor, F_R , será feito seguindo Duffie e Beckman (2014). Considerou-se operação em regime uniforme, temperatura da cobertura de vidro e da placa absorvedora uniformes em todas as suas extensões e espessura,

fluxos de calor unidimensionais e que as perdas radiantes se dão para as altas camadas da atmosfera (considerada um corpo negro).

O cálculo da energia incidente I_j na área coletora A_c é feito por meio da Equação 10:

$$I_j = 3600S_jA_c \quad (10)$$

O coeficiente global de perdas térmicas no coletor é obtido pelo somatório da contribuição das partes do coletor:

$$U_{tot} = U_{topo} + U_{base} + U_{lados} \quad (11)$$

As perdas de energia que ocorrem pelo topo do coletor podem ser determinadas:

$$U_{topo} = \{N/[(C/T_{abs})(T_{abs} + T_{amb}/(N + Z))^e + 1/h_{ca}]\}^{-1} +$$

$$\sigma(T_{abs} + T_{amb})(T_{abs}^2 + T_{amb}^2)/(\varepsilon_p + 0,00591 N h_{ca})^{-1} + (2N + z - 1 + 0,133 \varepsilon_p/\varepsilon_c) - N \quad (12)$$

$$h_{ca} = 2,87 + 3 V_v \quad (13)$$

$$C = 520(1 - 0,000051\beta^2) \quad (14)$$

$$e = 0,430 (1 - (100/T_{abs})) \quad (15)$$

$$z = (1 + 0,089 h_{ca} - 0,1166h_{ca}\varepsilon_p)(1 + 0,07866 N) \quad (16)$$

N é o número de coberturas de vidro no coletor (unidades); ε_p e ε_c são as emissividades da placa absorvedora e do vidro, respectivamente (valores entre 0 e 1); T_{abs} é a temperatura da placa absorvedora (K); V_v é a velocidade média do vento (m/s); h_{ca} é o coeficiente convectivo entre a cobertura de vidro do coletor e o ar ($W/(m^2K)$) e β é a inclinação dos coletores ($^\circ$).

As perdas de energia pela base do coletor e pelos lados são determinadas por:

$$U_{base} = k_i/l_i \quad (17)$$

$$U_{lados} = (A_{lados}/A_{col})U_{base} \quad (18)$$

k_i e l_i são, respectivamente, a condutividade térmica ($W/(m \cdot K)$) e a espessura (m) do isolante térmico, e A_{lados} e A_{col} são a área lateral e a área total do coletor, respectivamente (m^2).

O fator de rendimento das aletas, para aletas retas, F , é determinado por:

$$F = \tanh(m(W - D)/2)/(m(W - D)/2) \quad (19)$$

$$m = \sqrt{U_{\text{tot}}/k} \quad (20)$$

t e k são a espessura (m) e a condutividade térmica (W/(m·K)) da placa absorvedora, respectivamente, W é a distância entre os tubos (m) e D_e é o diâmetro externo dos tubos (m).

O fator de rendimento de captação, F' , é determinado:

$$F' = ((1/U_{\text{tot}})/W(D_e + (W - D_e)F)) U_f \quad (21)$$

$$U_f = 1/((1/h_i \pi D_i) + (\gamma/k_b b)) \quad (22)$$

U_f é o coeficiente global de troca térmica entra a chapa e o fluido (W/(m²K)); h_i é o coeficiente de convecção interno aos tubos (W/(m²K)); b e k_b são a largura da junção placa-tubo (m) e a sua condutividade térmica (W/(m·K)), respectivamente; γ é a espessura da solda na junção placa-tubo (m).

O coeficiente de convecção interno nos tubos é determinado pelo cálculo do número de Nusselt (BEJAN; KRAUS, 2003; ÇENGEL, 2009; BERGMAN, 2011; BERGMAN; INCROPERA, 2011), que por sua vez é calculado em função no número de Reynolds:

$$Re = 4 (m_c/N_t)/\pi D_i \mu_{it} \quad (23)$$

Re é o número de Reynolds (adimensional), m_c é a vazão mássica em um coletor (kg/s), N_t o número de tubos no coletor (unidades), D_i o diâmetro interno dos tubos (m) e μ_{it} é a viscosidade cinemática da água no interior dos tubos (m²/s).

Uma vez conhecido o número de Reynolds e caracterizado o escoamento como laminar ($Re < 2300$) ou turbulento ($Re > 4000$), pode se escolher uma correlação adequada para o cálculo do número de Nusselt. Neste trabalho será considerado o escoamento turbulento para $Re \geq 2300$.

Considerando fluxo térmico na superfície dos tubos constantes, neste trabalho as correlações adotadas para o cálculo do número de Nusselt, para escoamento laminar ou turbulento, respectivamente, foram:

$$Nu = 4,36 \quad (24)$$

$$Nu = (f_a/8)(Re - 1000)Pr/1 + 12,7(f_a/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1) \quad (25)$$

f_a é o fator de atrito do escoamento no interior dos tubos e Pr é o número de Prandtl da água na temperatura média da água nos coletores (adimensionais). A Equação 25 foi formulada por

Gnielinski (1976) e é válida para o cálculo do número de Nusselt em escoamento caracterizados como turbulentos ($Re > 2300$).

O fator de atrito do escoamento da água no interior dos tubos é calculado com a seguinte correlação, para $Re < 3000$:

$$f_a = 0,316 Re^{-1/4} \quad (26)$$

Para $Re \geq 3000$:

$$f_a = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (27)$$

Com o número de Nusselt calculado, o coeficiente de convecção do escoamento da água interno aos tubos do coletor ($W/(m^2K)$) é definido isolando h_i :

$$Nu = h_{it}D_i/k_c \quad (28)$$

O fator de remoção de calor, F_R , é calculado por:

$$F_R = (m C_p/A_c U_{tot}) [1 - e^{-A_c U_{tot} F'/m C_p}] \quad (29)$$

O cálculo da energia absorvida por hora na área coletora é feito por meio de:

$$Q_u = 3600 A_c F_R (S - U_{tot}(T_{abs} - T_{amb})) \quad (30)$$

Depois de calculados os valores dos coeficientes considerando a temperatura da placa absorvedora inicialmente estimada, deve-se, por meio de um processo iterativo, corrigir T_{abs} (Equação 31) até que a diferença relativa entre o novo valor de T_{abs} e o valor anterior esteja dentro da tolerância estabelecida (1×10^{-4}).

$$T_{abs} = T_{f1} + (Q_u/A_c F_R U_{tot})(1 - F_R) \quad (31)$$

Com o T_{abs} corrigido, a partir das Equações 11 a 29, recalcula-se os coeficientes U_{tot} , F , F' e F_R e pode-se obter o ganho e as perdas de energia térmica nos coletores.

A parcela de energia total útil e a energia perdida é calculada:

$$Q_{tot} = 3600 \sum_{j=1}^m Q_{uj} = 3600 \sum_{j=1}^m F_{Rj} [S_j - A_c U_{totj} (T_{c1j} - T_{ambj})] \quad (32)$$

$$m C_p (T_{mf(j+1)} - T_{mf(j)}) = Q_{uj} - Q_{pj} \quad (33)$$

T_{mf} é a temperatura média do fluido nos coletores:

$$T_{mf} = T_{f1} + (Q_u/A_c F_R U_{tot})(1 - F_R/F') \quad (34)$$

Para solução da Equação 25 em $j=1$, T_{f1} será considerada igual a T_{amb} . Para $j > 1$, T_{f1} será a média da temperatura ambiente e a temperatura média do fluido no instante anterior, $T_{mf(j-1)}$.

2.4 Perdas no armazenamento

O tanque de armazenamento também é responsável pela conservação da água aquecida nos coletores até que seja direcionada ao processo. Como a água contida nos tanques estará em uma temperatura maior que a temperatura ambiente, mesmo com isolamento térmico, haverá perdas de energia térmica do tanque para o ambiente, ou seja, haverá uma variação da energia interna armazenada nos tanques.

A Equação 35 representa a capacidade de armazenamento de energia interna na estocagem de líquidos desconsiderando os efeitos de estratificação térmica nos tanques.

$$Q_{\text{armaz}} = m_{\text{armaz}} C_p \Delta T_{\text{armaz}} \quad (35)$$

m_{armaz} é a massa do líquido armazenado (kg); C_p é o calor específico do líquido armazenado (kJ/(kg.K)) e ΔT_{armaz} é a variação da temperatura média do líquido no armazenamento em um determinado intervalo de tempo (°C).

Por meio de um balanço de energia obtém-se a Equação 36:

$$m_{\text{armaz}} C_p \Delta T_{\text{armaz}} = Q_u - E_{\text{util}} - 3600 U_{TA} A_{TA} (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}}) \quad (36)$$

Q_u é a energia térmica oriunda dos coletores; E_{util} é a demanda de energia necessária ao processo; U_{TA} e A_{TA} são o coeficiente global de perdas térmicas para o ambiente e a área externo do tanque, respectivamente.

Integrando a Equação 37 em relação ao tempo, considerando um intervalo de tempo de 1 hora, isolando a temperatura final de armazenamento temos:

$$T_{\text{armaz}(j)} = T_{\text{armaz}(j-1)} + (\Delta t / m_{\text{armaz}} C_p) [Q_u - E_{\text{util}} - 3600 U_{TA} A_{TA} (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})] \quad (37)$$

Para solução da Equação anterior em $j=1$, $T_{\text{amaz}(j-1)}$ será considerada igual a $T_{\text{amb}} + 20$; Para $j > 1$, $T_{\text{amaz}(j-1)}$ será a temperatura de armazenamento calculada para hora (j) anterior.

2.5 Fração solar do sas

Depois de conhecidas as perdas presentes na área coletora e no armazenamento pode se determinar a fração solar:

$$\begin{aligned} f &= \text{Ganho Térmico Armazenado} / \text{Demanda de Energia} \\ &= E_{\text{util}} + Q_{\text{armaz}} / E_{\text{util}} \end{aligned} \quad (38)$$

A fração solar (f) representa quanto da energia usado no processo é proveniente do SAS. O valor de Q_{armaz} apresenta valores negativos em situações em que a energia solar não é suficiente para atender toda a demanda, positivo quando excede e nulo quando é igual.

3. Resultados e discussões

A Tabela 2 mostra valores médios de irradiâncias diárias mensais (W/m^2), para cada mês do ano, calculados a partir dos valores de irradiâncias horárias mensais disponibilizados pelo RadiaSol 2. Estes valores são importantes para a quantificação da radiação incidente na superfície e a sua variação ao longo do dia. Para o dimensionamento do sistema serão utilizados os valores de irradiâncias médias horárias mensais em W/m^2 . Os dados da Tabela 2 estão ilustrados na Figura 4.

Tabela 2 - Valores de Irradiâncias Médias Diárias Mensais (W/m^2) no plano inclinado (16°N) para cidade de João Pessoa.

Mês	Irradiâncias médias diárias (W/m^2)			
	Global	Direta	Difusa	Inclinada (16°)
Jan	297	161	154	316
Fev	317	181	141	323
Mar	305	150	145	296
Abr	279	134	118	252
Mai	280	127	111	239
Jun	237	97	99	197
Jul	253	115	94	210
Ago	299	143	118	263
Set	315	165	130	296
Out	356	216	138	355
Nov	367	244	139	383
Dez	351	234	140	375
Anual	302	156	134	296

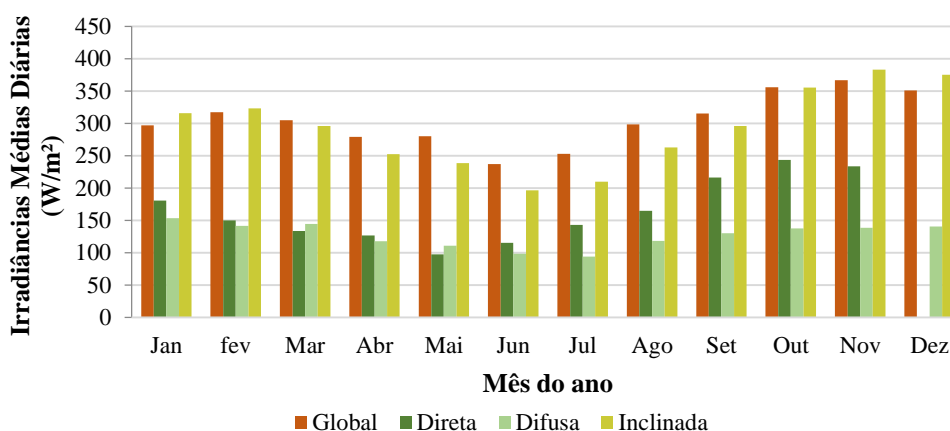


Figura 4 - Irradiâncias Médias Diárias Mensais no plano inclinado (16°N) em João Pessoa.

3.1 Dimensionamento do sas

O volume de armazenamento calculado foi de 7,70 m³. No entanto como a demanda de água quente é constante e sem interrupção (24h por dia) e a disponibilidade de energia solar não, o volume de armazenamento será dobrado, ou seja, considera-se 16 m³ para garantir uma maior contribuição do sistema. Os cálculos foram realizados para uma temperatura de armazenamento igual a 70°C.

Uma estimativa da demanda de energia útil mensal do sistema pode ser obtida multiplicando o valor calculado com a Equação 2 pelo número de dias do mês em que o sistema está em funcionamento. Neste caso, a temperatura ambiente considerada para cada mês é a temperatura média anual (Tabela 1).

Tabela 3 – Demanda Mensal de Energia para Aquecimento de Água (10.000 Ldia).

Mês	Dias de operação	Eútil (kWh/mês)
Jan	23	9229,44
Fev	28	11.235,84
Mar	30	12.038,40
Abr	29	11.637,12
Mai	30	12.038,40
Jun	29	11.637,12
Jul	30	12.038,40
Ago	30	12.038,40
Set	29	11.637,12
Out	30	12.038,40
Nov	29	11.637,12
Dez	24	9630,72
Total Anual	341	9229,44

Calculados os valores médios mensais da energia útil, observou-se que a maior demanda de energia mensal é de 12.038,40 kWh/mês (ocorre nos meses de março, maio, julho, agosto e setembro) e, portanto, para os cálculos seguintes este será o valor de energia útil mensal utilizado.

Como se trata de um processo contínuo de operação, a demanda de energia diária independe do mês do ano. Dividindo-se os dados mensais da demanda energia útil pelo dia de operação no mês nota-se que a demanda diária é sempre 401, 28 kWh (60,1920 MJ por hora).

3.2 Escolha do coletor solar

Uma vez estimada a disponibilidade da radiação solar e conhecidas as condições de aquecimento necessárias pode-se selecionar a tecnologia que será utilizada. Neste trabalho serão empregados coletores planos, pois é possível atender as especificidades da demanda com esta tecnologia e, em relação às demais, é a tecnologia solar térmica de maior aplicabilidade no Brasil.

O coletor solar adotado nesse trabalho foi o coletor solar plano S-81. A Tabela 4 mostra as especificações técnicas do coletor, e sua eficiência é dada pela Equação 40 (GREEN-PUC Minas, 2003):

$$n = 62,1 - 513,6 ((T_{c2} - T_{amb})/I) \quad (40)$$

T_{c2} é a temperatura em que a água sai do coletor solar (°C).

Tabela 4 – Especificações Técnicas: Coletor Solar Plano.

Especificações Técnicas (S-81)	
Área Externa	1,78 m ²
Área Transparente	1,72 m ²
Peso do Coletor Seco	29 kg
Pressão Máxima de Operação	250 kPa
Fluido de Trabalho	Água
Eficiência Térmica	51,8%
$F_R(\tau\alpha)$	0,645
$F_R(U_i)$	5,334

FONTE: (GREEN – PUC Minas, 2003).

3.3 SAS proposto sem perdas

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos para os valores médios anuais desconsiderando as perdas presentes do SAS proposto. Estes valores servem como uma estimativa inicial, um ponto de partida para o cálculo dos valores médios mensais e para o dimensionamento final do SAS. A única perda considerada é da curva de eficiência dada pelo fabricante.

Tabela 51 – Resultado do sistema de equações para os valores médios anuais.

T_{c1}	T_{c2}	m_c	T_{armaz}	$T_{consumo}$	A_c	$N_{coletores}$	f
31,32°C	61,59°C	0,1075kg/s	42,87°C	53,22°C	88,79 m ²	51,62	0,80

A vazão volumétrica recomendada pelo fabricante nos coletores em condições de teste é de 70 l/h, o que equivale a uma vazão mássica de aproximadamente 0,02 kg/s, portanto para se atingir a vazão mássica requisitada pelo sistema será necessário o arranjo dos coletores em pelo menos cinco conjuntos em paralelo.

Para que garantir a segurança do dimensionamento o número de coletores será arredondado para o próximo maior valor múltiplo de 5, ou seja, serão utilizados 55 coletores, sendo cinco conjuntos em paralelo de 11 coletores conectados em série, o que resulta em uma área coletora de aproximadamente 95 m².

Definido o número de coletores, a vazão mássica, considerando as médias mensais da radiação solar e da temperatura ambiente e desconsiderando as perdas no SAS, foram obtidos os dados da fração solar mensal para o SAS proposto (Tabela 6).

Tabela 62 – Resultado do sistema de equações para os valores médios mensais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
f	0,9020	0,9061	0,8303	0,7131	0,7070	0,5690	0,5648	0,7420	0,8891	1,073	1,133	1,0200
T _{cl} (°C)	26,67	26,09	26,02	26,19	27,66	26,74	24,28	26,13	28,32	28,68	28,06	25,13
T _{c2} (°C)	63,69	63,93	63,69	55,72	55,66	49,82	48,88	56,93	62,99	70,27	72,92	69,06
T _{armaz} (°C)	43,02	42,80	41,33	39,23	40,03	36,94	35,15	39,73	43,63	47,05	47,87	44,54
T _{cons} (°C)	56,65	56,73	54,10	50,10	50,33	45,43	44,20	51,07	56,40	62,32	64,39	58,71

Nota-se que nos meses de junho e julho o SAS apresenta seu pior aproveitamento, no entanto, em todos os meses do ano é capaz de suprir mais da metade de toda a demanda energética necessária.

3.4 Energia útil coletada

A Tabela 6 mostra os valores médios obtidos no cálculo da energia útil coletada pela área coletora considerando os dados médios horários anuais.

Tabela 6 – Valores médios anuais obtidos no cálculo da energia útil coletada Q_{tot} (MJ).

j	S [W/m ²]	I [MJ]	T _{abs} [°C]	U _{tot} [W/m ² K]	T _{fm} [°C]	Q _u [MJ]	Q _p [MJ]	Q _{tot} [MJ]	Q _{pt} [MJ]
6	62,00	21,1147	23,99	4,8347	23,54	17,99	3,13	17,99	3,13
7	214,00	72,8798	30,27	4,5158	28,41	72,82	0,06	90,81	3,19
8	400,50	136,3943	39,18	5,3848	35,72	135,82	0,58	226,62	3,76
9	531,00	180,8374	47,49	5,8991	42,93	179,36	1,47	405,99	5,24
10	672,00	228,8563	56,09	6,2315	50,32	226,48	2,38	632,47	7,62
11	748,50	254,9092	62,69	6,5205	56,29	251,53	3,38	884,00	10,99
12	744,00	253,3766	65,98	6,7215	59,64	249,22	4,16	1133,21	15,15
13	662,00	225,4507	65,47	6,8170	59,85	220,95	4,50	1354,16	19,66
14	559,50	190,5433	61,76	6,8037	57,02	185,99	4,55	1540,15	24,21
15	386,00	131,4562	54,26	6,6961	51,02	127,30	4,15	1667,46	28,36
16	231,00	78,6694	45,82	6,4672	43,90	75,41	3,25	1742,87	31,61
17	64,50	21,9661	36,46	6,1807	35,96	19,68	2,28	1762,56	33,90

Uma das observações importantes nos resultados obtidos é o comportamento do coeficiente global de perdas térmicas da área coletora para o ambiente, U_{tot}, em relação a temperatura da placa absorvedora, T_{abs}. À medida que a temperatura da placa absorvedora aumenta, as perdas térmicas dos coletores para o ambiente aumentam também. Esse comportamento é justificado pelo aumento da diferença de temperatura coletor-ambiente.

Os valores de Energia Incidente I, de Energia Coletada Q_u, e de energia perdida Q_p verificados na Tabela 6 estão ilustrados na Figura 5. Observa-se que a energia perdida, ou seja, a

fração da energia solar que é perdida para o ambiente em forma de calor apresenta um comportamento proporcional a energia solar incidente na área coletora e a energia solar que é efetivamente absorvida pelos coletores.

Uma outra particularidade importante observada na Figura 5 é o comportamento da Energia Coletada em relação ao horário. Assim como a Incidência da radiação solar a Energia Coletada cresce do início da manhã até atingir o seu valor máximo próximo ao meio dia legal (no meio dia solar) e cai proporcionalmente até o fim

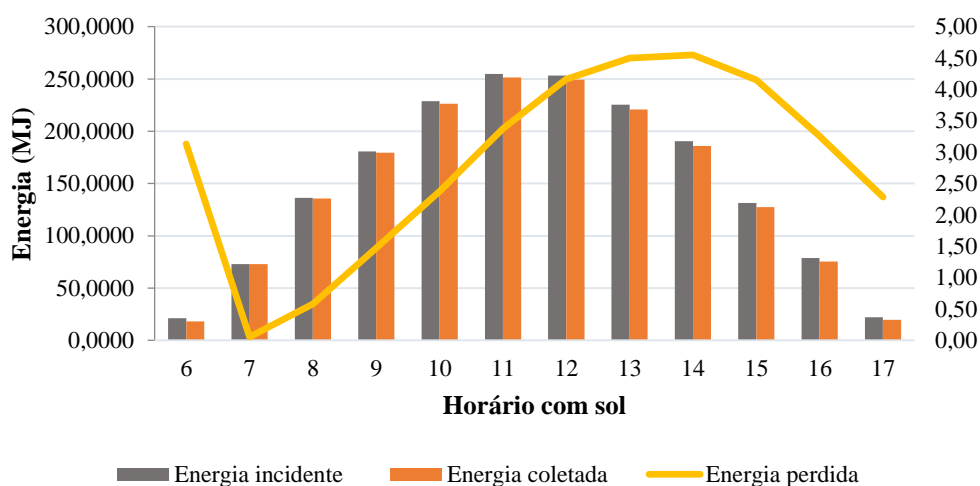


Figura 5– Parcelas de Energia Coletada e Perdida em Relação a Energia Incidente na Área Coletora (MJ).

Observa-se também o comportamento da temperatura média do fluido no coletor, T_{mf} . Nota-se que apesar de também apresentar um comportamento proporcional à incidência de radiação solar e apresentar uma variação considerável hora a hora no dia, o ganho térmico é maior a cada hora passada. As 17h, com uma incidência solar de $64,5 \text{ W/m}^2$, atinge-se uma temperatura média do fluido de $40,7^\circ\text{C}$.

A Tabela 7 mostra os valores mensais de energia total incidente, I_{tot} , energia total coletada, Q_{tot} , e de energia total perdida, Q_{pt} . Estes valores foram obtidos a partir do somatório dos dados horários calculados para cada mês do ano. A Figura 6 mostra a variação mensal das parcelas de energia incidente, coletada e perdida na área coletora.

Tabela 7 – Valores Médios Mensais das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida

	I_{tot} [MJ]	Q_{tot} [MJ]	Q_{pt} [MJ]
Jan	1934,38	1895,23	39,15
Fev	1980,02	1941,01	39,01
Mar	1812,80	1778,38	34,43
Abr	1546,48	1518,40	28,09

Mai	1463,73	1437,79	25,93
Jun	1204,90	1184,35	20,56
Jul	1286,98	1264,85	22,13
Ago	1609,49	1580,33	29,15
Set	1814,16	1780,09	34,07
Out	2177,54	2134,63	42,91
Nov	2349,52	2301,15	48,37
Dez	2299,12	2252,04	47,08
Anual	1796,45	1762,56	33,90

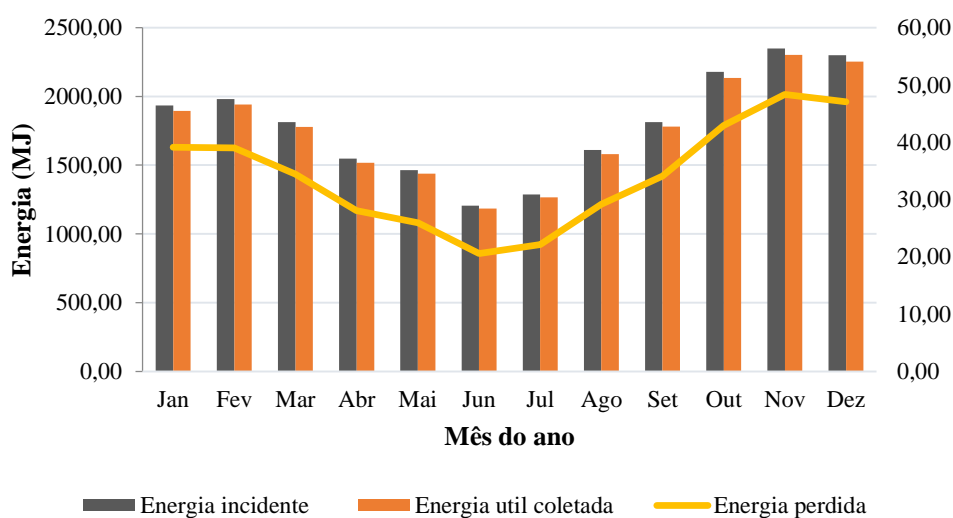


Figura 6 – Comportamento Mensal das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida do SAS.

3.5 Perdas no armazenamento

Antes do cálculo das perdas no armazenamento é necessário a escolha do tanque a ser utilizado, portanto com o volume de armazenamento já definido na primeira parte deste trabalho (16 m³). Foram selecionados 8 tanques de 2000 L, cuja especificações encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Especificações Técnicas do Tanque de Armazenamento

Boiler 2000 L	
Comprimento	2,65 m
Largura	1,07 m
Altura	1,12 m
Isolante Térmico	Poliestireno Expandido
Espessura do isolante	0,05 m

O coeficiente de global de perdas térmicas do tanque para o ambiente a partir dos dados da Tabela 16 considerando que os tanques serão instalados em um ambiente fechado sem incidência de vento. Por meio do método das resistências térmicas foi determinado um valor de aproximadamente 1,1 W/m² K.

A Tabela 9 mostra os valores médios obtidos no cálculo das perdas no armazenamento considerando os dados médios horários anuais e os tanques conectados em paralelo.

A parcela da energia armazenada representa o somatório das parcelas de entrada e saída no tanque de armazenamento durante a hora j . Como a demanda de água quente é constante (60,1920 MJ/h) e a energia solar não, nota-se que nos horários sem incidência solar o Q_{armaz} é negativo e varia de acordo com as perdas térmicas para o ambiente.

Tabela 9 - Valores Médios horários Anuais das Perdas no Armazenamento.

j	Qu [MJ]	Tarmaz [°C]	Qpa [MJ]	Qarmaz [MJ]
1	0	40,90	6,50	-66,70
2	0	39,91	6,18	-66,37
3	0	38,92	5,86	-66,05
4	0	37,94	5,54	-65,73
5	0	36,97	4,92	-65,12
6	17,99	36,27	4,28	-46,48
7	72,82	36,39	4,38	8,25
8	135,82	37,46	4,10	71,53
9	179,36	39,18	4,12	115,05
10	226,48	41,61	4,03	162,26
11	251,53	44,40	4,49	186,85
12	249,22	47,15	5,07	183,95
13	220,95	49,47	5,81	154,95
14	185,99	51,25	6,72	119,08
15	127,30	52,14	7,63	59,48
16	75,41	52,25	8,24	6,98
17	19,68	51,51	8,60	-49,11
18	0	50,48	8,98	-69,17
19	0	49,45	8,67	-68,87
20	0	48,42	8,67	-68,86
21	0	47,39	8,62	-68,81
22	0	46,37	8,29	-68,48
23	0	45,35	7,96	-68,15
24	0	44,33	7,62	-67,82

A Figura 7 mostra a relação entre as parcelas de energia útil coletada, a parcela armazenada e a demanda de energia do processo, com base nos dados médios horários anuais. O eixo horizontal diz respeito à hora do dia e o vertical à parcela de energia em MJ. Verifica-se que nas primeiras e nas últimas horas do dia (horas sem sol) não há contribuição do SAS, porém há perdas, pois, a água quente no tanque de armazenamento perde energia térmica para o ambiente. Estes são fatores importantes que devem ser

considerados para o dimensionamento de um sistema de aquecimento auxiliar na linha de alimentação do processo.

Os valores negativos de energia armazenada na Figura 7 representam as perdas térmicas nesses horários e são os responsáveis pelo decaimento da temperatura de armazenamento. Os valores superiores a demanda de energia ocorrem devido ao volume de armazenamento utilizado (duas vezes o valor calculado) e contribuem para aumentar a contribuição do SAS ao processo.

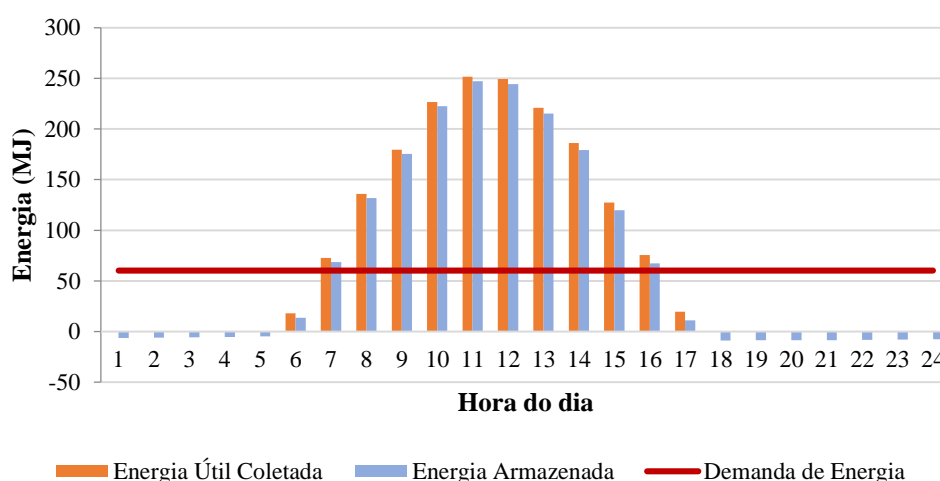


Figura 7 – Relação do Comportamento Horário da Energia Útil Coletada, da Energia Armazenada e da Demanda de Energia.

Na Tabela 10 encontram-se os valores médios diários mensais das parcelas da Energia Útil Coletada, Energia Perdida no Armazenamento e Energia Armazenada. Assim como nos dados anuais, a parcela de Energia Armazenada trata-se do resultado de um balanço de energia no armazenamento, ou seja, é a diferença entre a entrada e a saída de energia. Valores positivos de Q_{armaz} representa energia excedente a demanda (1444,61 MJ/dia) e valores negativos o déficit de energia, ou carga necessária a ser produzida pelo aquecimento auxiliar. A Figura 8 mostra o comportamento das parcelas de energia presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores Médios Diários Mensais das Perdas no Armazenamento.

Mês	Qu [MJ]	Qpa [MJ]	Qarmaz [MJ]
Jan	1895,23	156,64	293,98
Fev	1941,01	154,80	206,76
Mar	1778,38	150,86	182,92
Abri	1518,40	144,81	-71,00
Mai	1437,79	144,81	-144,83

Jun	1184,35	126,63	-386,90
Jul	1264,85	184,58	-313,40
Ago	1580,33	151,56	-15,84
Set	1780,09	147,49	187,99
Out	2134,63	184,58	505,44
Nov	2301,15	191,87	664,67
Dez	2252,04	187,91	619,52

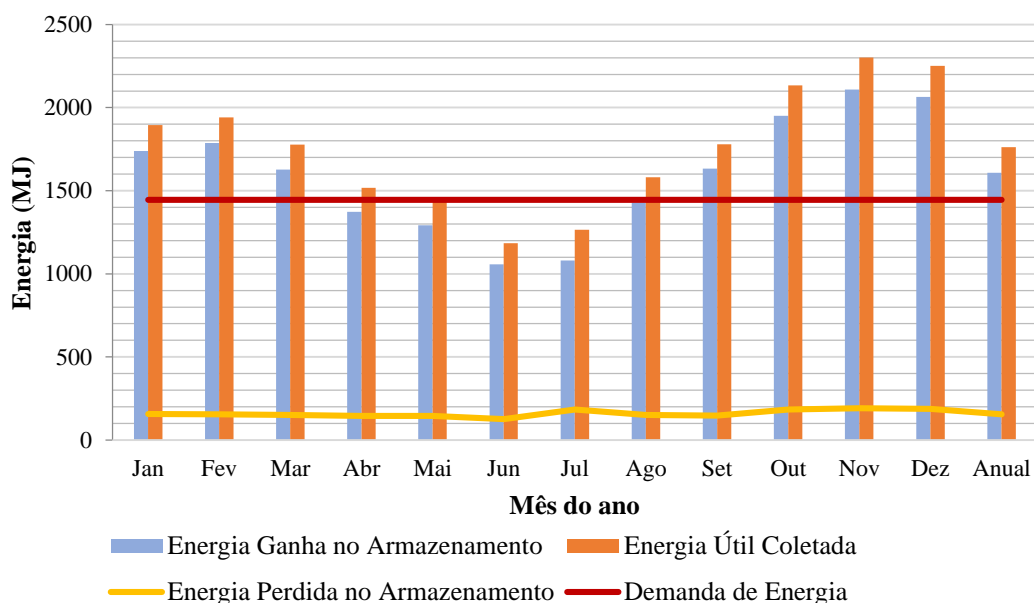


Figura 8 –Comportamento diário Mensal da Energia Útil Coletada, da Energia Ganha no Armazenamento e da perda de energia em relação a demanda.

Verifica-se que apenas em cinco meses do ano (de maio a agosto) a energia líquida diária do SAS não é suficiente para atender a demanda. Esses são também meses em que a incidência de radiação solar é menor, o que acarreta uma menor parcela de energia útil coletada e consequentemente de energia armazenada, no entanto, nos demais meses há excedentes de energia. Esse comportamento se mostra de acordo com a sazonalidade prevista de sistemas de energia Solar.

A parcela de Energia Ganha no Armazenamento é o somatório da energia útil coletada com o valor negativo da energia perdida no armazenamento, ou seja, representa a parcela da energia Solar que é efetivamente convertida em energia térmica. Esse valor também pode ser obtido pelo somatório da demanda de energia e a energia armazenada.

A parcela de Energia perdida no armazenamento apresenta um comportamento pouco variável ao longo do ano, isso ocorre devido a proporcionalidade entre a temperatura de armazenamento e a energia armazenada e a variação da temperatura ambiente.

3.6 Fração solar do sas

A Tabela 11 mostra os valores da fração solar mensal do SAS considerando o dobro do volume de armazenamento, as perdas presentes na área coletora e no armazenamento do SAS proposto. Na maior parte dos meses a fração solar é maior que 100%, ou seja, é mais do que suficiente para suprir a demanda de água quente analisada.

Tabela 11 – Valores Percentuais da Fração Solar final e das Perdas Totais do SAS.

Mês	<i>f</i>	Energia perdida
Jan	120%	10%
Fev	124%	17%
Mar	113%	10%
Mai	95%	11%
Abri	90%	11%
Jun	73%	12%
Jul	75%	12%
Ago	99%	11%
Set	113%	10%
Out	135%	10%
Nov	146%	10%
Dez	143%	10%

O comportamento da fração solar continua exatamente o mesmo e que, portanto, o aumento de seu valor mesmo com a consideração das perdas presentes no SAS, deve-se ao aumento do volume de armazenamento, porém é importante destacar que mesmo com a utilização do dobro do volume de armazenamento não se obtém o dobro da contribuição solar do sistema.

4. Conclusões

Recentemente o Brasil passou por um momento delicado de restrições energéticas, que levou ao acionamento das usinas termoeletricas (operadas a óleo, gás natural, carvão). Considerando o crescente processo de conscientização ambiental da sociedade, no qual tentam-se minimizar os efeitos antrópicos no ambiente, emerge a desejável diversificação da matriz energética. A inclusão de fontes renováveis incentiva o crescimento econômico sustentável, a longo prazo, e diminui as emissões de gases de efeito estufa (que estão majoritariamente associadas a utilização de combustíveis fósseis). A localização geográfica e a extensão territorial do Brasil o tornam um país de significativo potencial de exploração de energias renováveis, sobretudo de energia solar. O Nordeste destaca-se por estar situado muito próximo à linha do Equador e por isso apresentar uma alta incidência solar, verões longos, secos e quentes.

A avaliação dos recursos disponíveis, da adequação da tecnologia existente e a viabilidade técnica são os requisitos básicos para avaliar um projeto. A tecnologia do aquecimento solar de

água não é tão complexa, mas certamente tem apresentando avanço positivo desde sistemas simples até mais eficientes e atuais. As inovações têm sido amplas ao longo dos anos, incluindo o tipo de coletores, sua localização, presença de tanque de armazenamento e sua posição, e até quanto ao modo de transferência de calor.

Com relação ao dimensionamento desenvolvido neste estudo, observou-se que a maior parte da energia solar foi perdida ainda na área coletora, devido principalmente a incidência de ventos nos coletores, além da contribuição das propriedades radiantes dos seus materiais construtivos (já que definem seu comportamento quanto a radiação incidente - absorvidade, transmissividade e refletividade - e ao ganho térmico de energia, emissividade). As perdas no armazenamento foram menos significantes, pois se dão principalmente por radiação térmica, uma vez que, diferente dos coletores, os tanques podem ser instalados em áreas fechadas de forma a diminuir as perdas convectivas.

Verificou-se que a relação da fração solar do SAS com o volume de armazenamento adotado é muito importante: com um volume de 8 m³, mesmo sem consideração das perdas, verificou-se uma menor contribuição do sistema do que quando adotado o dobro desse valor e contabilizando as perdas. Partindo do pressuposto de que um Sistema de Aquecimento Solar de Água é viável tecnicamente quando apresenta uma fração solar mínima de 50%, o SAS dimensionado mostrou-se apto do ponto de vista técnico e operacional.

O cenário energético atual realça a necessidade do desenvolvimento de estudos específicos visando um melhor conhecimento dos sistemas energéticos, para seu uso racional e melhor desempenho. Destaca-se aqui a necessidade do incentivo a publicação de estudos específicos, que, pela sua pertinência, não apenas aprofundariam a questão da análise térmica, como também apontariam para a normatização de procedimentos. A principal motivação de se propor a utilização de sistemas de aquecimento solar de água é para aumentar o uso eficiente dos recursos naturais disponíveis. Espera-se que este estudo ajude a consolidar o uso mais eficiente e racional da energia, e aumentar a disseminação do conhecimento para promover um aumento na utilização de energia solar.

5. Referências

- ABRAVA. 2008. *Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar*. [s.n.]. 138 f. il. color. Disponível em: <<http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/manual2008.pdf>>. Acesso 03 mar 2018.
- ALUCCI, M. 2011. Climaticus 4.2 (versão Beta). Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética- FAUUSP. Disponível em: <[www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_2011\(beta\).xism](http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_2011(beta).xism)>. Acesso 03 mar 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2008. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação. Rio de Janeiro. 36p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2013. NBR 10185: Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar – Determinação de desempenho térmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 12p.
- BEJAN, A.; KRAUS, A.D. 2003. Heat transfer handbook. Nova Jersey: John Wiley & Sons.
- BERGMAN, T. L. 2011. Introduction to heat transfer. Nova Jersey: John Wiley & Sons.
- BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P. 2011. Fundamentals of heat and mass transfer. Nova Jersey: John Wiley & Sons.
- BRASIL. ANEEL. 2008. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª Ed. Brasília: ANEEL. 236 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- BRASIL. EPE. 2014. Consumo de energia do Brasil (Análises Setoriais): Nota Técnica DEA 10/14. Rio de Janeiro: EPE. 116p.
- ÇENGEL, Y. A. 2009. Heat transfer: a practical approach. 3 th ed. São Paulo: Mc. Graw Hill.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. 2014. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley.
- ENGINEERING EQUATION SOLVER. 2017. F-chart software. Disponível em: <<http://www.fchart.com/ees/>>. Acesso 02 mar 2018.
- EUROPEAN COMMISSION, Directorate General Energy And Transport. 2001. POSHIP: O Potencial da Energia Solar no Calor de Processo Industrial. Energia Solar – Revista de Energias Renováveis & Ambiente, n. 48. p. 7-37.
- GNIELINSKI, V. 1976. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel Flow. Int. Chem. Eng., v. 16, pp. 359-368.
- HOOKER, D. W., MAY, E. K., & WEST, R. E. 1980. Industrial process heat case studies. Department of Energy, Solar Energy Research Institute.
- JAISANKAR, S., ANANTH, J., THULASI, S., JAYASUTHAKAR, S. T., & SHEEBA, K. N. 2011. A comprehensive review on solar water heaters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6), 3045-3050.
- KALOGIROU, S. 2003. The potential of solar industrial process heat applications. Applied Energy, 76(4), 337-361.
- KLUPPEL, R. P. 2016. Curso de Conversão Térmica da Energia Solar. João Pessoa: CEAR/UFPB.
- KURUP, P., & TURCHI, C. 2016. Potential for solar industrial process heat in the United States: A look at California. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1734, No. 1, p. 110001). AIP Publishing.
- MALO, L. M. 2013. Instalaciones de energía solar térmica para la obtención de ACS en viviendas. Marcombo.
- MARTÍNEZ, P. R. 2009. Energía solar térmica: técnicas para su aprovechamiento (Vol. 4). Marcombo.
- MEKHILEF, S., SAIDUR, R., & SAFARI, A. 2011. A review on solar energy use in industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4), 1777-1790.
- MUNEER, T., MAUBLEU, S., & ASIF, M. 2006. Prospects of solar water heating for textile industry in Pakistan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10(1), 1-23.
- NORTON, Brian. Harnessing solar heat. Springer Science & Business Media, 2013.
- NORTON, Brian. Solar Thermal Power Generation and Industrial Process Heat. In: Harnessing Solar Heat. Springer, Dordrecht, 2014. p. 123-143.
- RAMLOW, Bob; NUSZ, Benjamin. Solar Water Heating--Revised & Expanded Edition: A Comprehensive Guide to Solar Water and Space Heating Systems. New Society Publishers, 2010.
- Radiasol 2. 2010. Laboratório de Energia Solar. UFRGS, Porto Alegre: Disponível em <<http://radiasol-c-program-files-x86-radiasol-2.updatestar.com/pt>> Acesso 02 mar 2018.
- VAJEN, K., LAUTERBACH, C., & SCHMITT, B. 2012. Solar heat for industrial processes– Potential, technologies and applications. In International Conference on Solar energy for MENA region (INCOSOL).