

## **Iniciativa de Sustentabilidade na Indústria: Dimensionamento de um Sistema de Aquecimento Solar de Água**

**RAFAELA RAMOS BARBOSA**

Universidade Federal da Paraíba  
rafaela.barbosa@cear.ufpb.br

**FILIPY MACIEL DE MELO**

UFPB - Universidade Federal da Paraíba  
filipismaciel@gmail.com

**MONICA CARVALHO**

Universidade Federal da Paraíba  
monica.carvalho@cear.ufpb.br



## INICIATIVA DE SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA: DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

### Resumo

Apresenta-se um roteiro de dimensionamento de um Sistema de Aquecimento Solar (SAS) com foco em aplicações industriais. Neste artigo é destacada 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. A metodologia seguiu a normativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA). Uma vez estabelecida as condições do sistema e a disposição dos seus principais componentes, foi realizado o cálculo das principais perdas presentes no SAS. Notou-se que a maior parte da energia solar é perdida ainda na área coletora. Partindo do pressuposto de que um SAS é viável tecnicamente quando apresenta uma fração solar mínima de 50%, o SAS dimensionado mostrou-se apto do ponto de vista técnico e operacional, contribuindo para a sustentabilidade da indústria no tocante a incorporação de energia renovável para atendimento de demanda energética.

**Palavras-chave:** sustentabilidade, eficiência energética, energia solar, indústria, aquecimento de água.

### Abstract

This study presents a design guide for a Solar Heating System (SHS) focused on industrial applications. The importance of considering climate conditions is highlighted herein, along with the relevance of utilizing reliable solar radiation data, and the potential for this type of application in Brazil to diversify the Brazilian energy matrix and rationalize energy resources with contribution of solar energy. The methodology employed followed the guidelines of the Brazilian Association of Technical Standards and of the Brazilian Association of Refrigeration, Air Conditioning, Ventilation and Heating. Once the conditions of the system were established along with the dispositions of the main components, the main losses of the SHS were calculated. It was observed that most of the solar energy is lost at the collector area. Considering that a SHS is technically viable for a minimum solar fraction of 50%, the SHS designed herein was satisfactory and operational, contributing to the sustainability of industry regarding the incorporation of renewable energy to satisfy energy demands.

**Keywords:** sustainability; energy efficiency; solar energy; industry; water heating.



## 1 Introducao

Alcançar soluções para problemas ambientais atuais requer ações a longo prazo para o desenvolvimento sustentável; neste aspecto, as energias renováveis aparecem como soluções eficientes e eficazes já que existe conexão forte entre energia renovável e desenvolvimento sustentável (Dincer, 2000). A incorporação de energias renováveis é uma estratégia para o desenvolvimento sustentável, e segundo Lund (2007) a estratégia deve envolver três grandes mudanças tecnológicas: diminuição da demanda energética, eficiência energética na produção de energia, e substituição de combustíveis fósseis por várias fontes de energia renovável.

Consequentemente, planos de incorporação de energia renovável devem incluir a integração de fontes renováveis de maneira coerente, incentivados pela economia de energia e medidas de eficiência. 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), e grande parte da energia é direcionada para processos industriais, em que são necessárias temperaturas entre 60 a 250°C (Silva, 2014). Por meio da utilização de tecnologias já bem consolidadas (e.g., coletores e concentradores solares) é possível atingir esses níveis de temperaturas por meio do uso da energia solar.

Para que os sistemas de energia solar apresentem funcionamento adequado e eficiente é necessário que alguns critérios sejam estabelecidos. Este estudo tem o objetivo de descrever o dimensionamento de um Sistema de Aquecimento Solar (SAS) a ser instalado em uma indústria têxtil, localizada em João Pessoa (Paraíba). Ainda que a pesquisa seja aplicada e tenha um foco regional, em termos do caso de estudo utilizado, o estudo possui importância científica. A dimensão local, até mesmo o foco específico na indústria, é uma maneira de demonstrar a relevância da ciência.

## 2 Metodologia

### 2.1 Levantamento de dados

Considerou-se o perfil de consumo de água quente em uma indústria têxtil, localizada em João Pessoa, Paraíba, que 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 empresa apresenta uma demanda mensal de água quente, com temperaturas entre 50 a 60°C, variando entre aproximadamente 230 a 300 m<sup>3</sup>/mês (cerca de 10 m<sup>3</sup>/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 necessária para atingir as condições necessárias de toda a demanda de água do processo é necessário o conhecimento das condições climáticas do local durante todo o ano (Tabela 1).

O próximo passo consiste na estimativa da energia solar disponível, e aqui utilizou-se o software RadiaSol 2 (UFRGS, 2010). Além da localização geográfica deve-se especificar a inclinação, a orientação da superfície e o albedo das superfícies adjacentes aos coletores, e aqui considerou-se o albedo do telhado da indústria de 0,6 a inclinação dos coletores de 16°N e a orientação de 180°N (ângulo azimutal).



Tabela 1- Dados médios mensais para a cidade de João Pessoa (Alucci, 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

## 2.2 Dimensionamento do SAS

Este trabalho utilizou a metodologia de Duffie & Beckman (2014), com o objetivo de observar as perdas presentes em cada parte do SAS e a identificação dos motivos, afim de propor possíveis soluções e assim um SAS mais eficiente, e também as indicações da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA, 2008).

1º Etapa: Volume de Armazenamento: O volume de armazenamento pode ser calculado pela seguinte equação (ABNT, 2008):

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

Onde:  $V_{\text{consumo}}$  é o consumo diário ( $\text{m}^3$ );  $T_{\text{consumo}}$  é a temperatura de consumo de utilização;  $T_{\text{armaz}}$  é a temperatura de armazenamento da água ( $T_{\text{armaz}} > T_{\text{consumo}}$ );  $T_{\text{amb}}$  é a temperatura ambiente média anual do local da instalação;

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, através da equação a seguir:

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

Onde:  $\rho$  é a massa específica da água igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_p$  é o calor específico da água a pressão constante, igual a  $4,18 \text{ kJ/kg K}$ ;  $V_{\text{armaz}}$  será considerado igual ao consumo médio diário (para esse cálculo) em  $\text{m}^3/\text{dia}$ ;  $T_{\text{armaz}}$  será considerado igual à temperatura requerida no processo industrial (para esse cálculo);  $T_{\text{ambiente}}$  é a temperatura média do ambiente (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 será considerado os valores médios da radiação, da temperatura ambiente local e será desconsiderada 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.

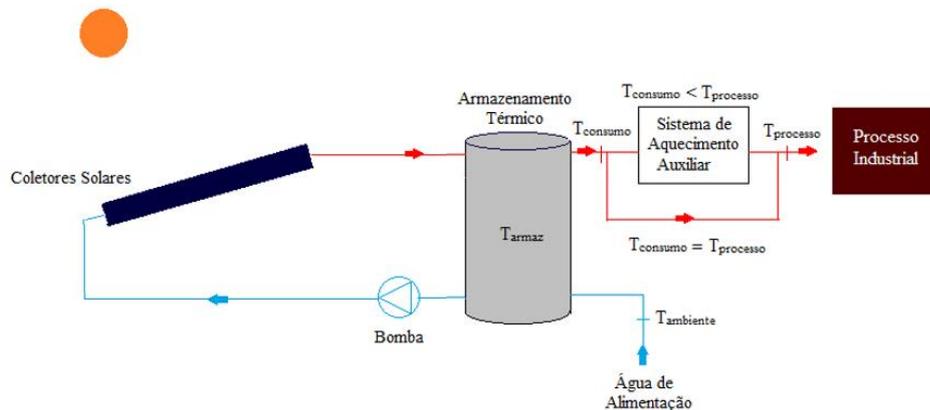


Figura 1 – Esquema de Funcionamento Proposto do SAS.

A seguir, por meio da aplicação da 1<sup>o</sup> 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:

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

- Balanço de Energia no Tanque de Armazenamento:

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

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,  $T_{armaz}$ .

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  $T_{armaz} = T_{ambiente}$  e igual a 1 quando  $T_{armaz} = T_{consumo}$ . 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):

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

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

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

Onde  $m_{consumo}$  é igual a vazão mássica da água de alimentação e  $m_c$  é a vazão nos coletores. Logo, a temperatura média de armazenamento do tanque pode ser calculada:

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

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:

$$f = \frac{m_{consumo} C_p (T_{armaz} - T_{ambiente})}{m_{consumo} C_p (T_{consumo} - T_{ambiente})} = \frac{T_{armaz} - T_{ambiente}}{T_{consumo} - T_{ambiente}} \quad (8)$$



Onde  $f$  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):

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

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

Das Equações 3 a 9, os seguintes dados são conhecidos: Radiação Incidente no plano inclinado; Eficiência dos coletores solar usados; Temperatura da água de alimentação ( $T_{\text{ambiente}}$ ); 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.

As incógnitas são: Temperatura de entrada dos coletores ( $T_{c1}$ ); Temperatura de saída dos coletores ( $T_{c2}$ ); Vazão mássica necessária no banco de coletores; Temperatura média do tanque de armazenamento ( $T_{\text{armaz}}$ ); Temperatura de consumo ( $T_{\text{consumo}}$ ); Área coletora ( $A_c$ ).

A resolução das equações 3 a 9 foi feita a partir de um sistema de equações que pode ser resolvido no Software *Engineering Equation Solver* (EES), considerando inicialmente uma fração solar de 80% e  $T_{c1}$  20% maior que  $T_{\text{ambiente}}$  (estratificação térmica no tanque de armazenamento). Após determinada a primeira estimativa da área coletora, pode-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.

### 2.3 Perdas térmicas do sistema de aquecimento solar de água

Uma vez proposto o dimensionamento de um SAS em condições ideais, é possível e necessário, para se obter um projeto final eficiente, realizar o cálculo das perdas que ocorrem no sistema e assim o seu dimensionamento final as considerando.

Pode-se dividir as perdas presentes em SAS em duas partes principais, de acordo com o local da instalação onde ocorrem: perdas nos coletores solares e perdas no armazenamento. A perda presente nos coletores é considerada no cálculo da energia útil coletada.

#### 2.3.1 Energia útil coletada

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, de acordo com a Figura 2.

A estimativa inicial da temperatura da placa absorvedora,  $T_{\text{abs}(j=1)}$ , 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).

Para calcular o coeficiente global de perda de calor do coletor solar,  $U_{\text{tot}}$ ; o fator de rendimento das aletas,  $F$ ; o fator de rendimento de captação  $F'$  e o fator de remoção de calor,  $F_R$  serão utilizadas as equações indicadas por Duffie & Beckman (2014). Algumas hipóteses devem ser consideradas: 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; As perdas radiantes se dão para as altas camadas da atmosfera (considerada um corpo negro).

O cálculo da energia incidente na área coletora é feito pela Equação 10:

$$I_j = 3600 S_j A_c \quad (10)$$

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

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

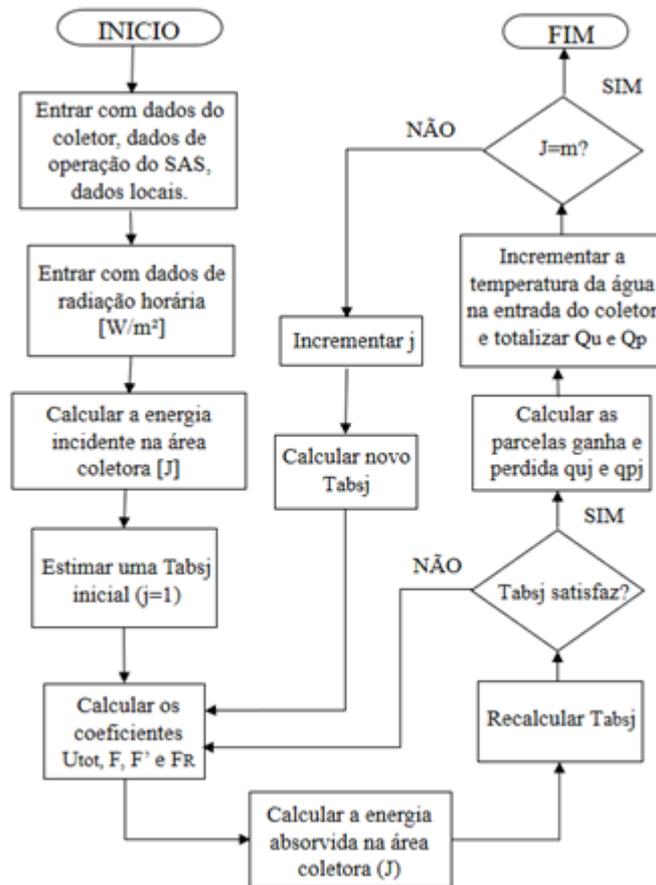


Figura 2 – Fluxograma para o cálculo da energia útil coletada (Adaptado de Kluppel, 2016).

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

$$U_{\text{topo}} = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{\text{abs}}} [T_{\text{abs}} + T_{\text{amb}}/N + z]^e + \frac{1}{h_{ca}}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{\text{abs}} + T_{\text{amb}})(T_{\text{abs}}^2 + T_{\text{amb}}^2)}{(\epsilon_p + 0,00591 N h_{ca})^{-1} + (2N + z - 1 + 0,133 \epsilon_p/\epsilon_c) - N} \quad (12)$$

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

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

$$e = 0,430 \left( 1 - \frac{100}{T_{\text{abs}}} \right) \quad (15)$$

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

Onde N é o número de coberturas de vidro no coletor;  $\epsilon_p$  e  $\epsilon_c$  é a emissividade da placa absorvedora e do vidro, respectivamente;  $T_{\text{abs}}$  é a temperatura da placa absorvedora;  $V_v$  é a velocidade média do vento;  $h_{ca}$  é o coeficiente convectivo entre a cobertura de vidro do coletor e o ar e  $\beta$  é a inclinação dos coletores. As perdas de energia pela base do coletor e pelos lados são determinadas pelas Equações (17) e (18):

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

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



Onde  $k_i$  e  $l_i$  são, respectivamente, a condutividade térmica e a espessura usado do isolante térmico;  $A_{\text{lad}} e A_{\text{col}}$  é a área lateral e a área total do coletor. O fator de rendimento das aletas, para aletas retas,  $F$ , é determinado pelas Equações (19) e (20):

$$F = \frac{\text{tgh} \left( m \frac{(W - D)}{2} \right)}{m \frac{(W - D)}{2}} \quad (19)$$

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

Onde  $t$  e  $k$  são a espessura e a condutividade térmica da placa absorvedora, respectivamente e  $W$  é a distância entre os tubos e  $D_e$  é o diâmetro externo dos tubos. O fator de rendimento de captação,  $F'$ , é determinado com as Equações (21) e (22):

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

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

Onde:  $U_f$  é o coeficiente global de troca térmica entra a chapa e o fluido;  $h_i$  é o coeficiente de convecção interno aos tubos;  $b$  e  $k_b$  é a largura da junção placa-tubo e a sua condutividade térmica, respectivamente;  $\gamma$  é a espessura da solda na junção placa-tubo.

O coeficiente de convecção interno nos tubos é determinado através do cálculo do número de Nusselt, que por sua vez é calculado em função no número de Reynolds, dados por:

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

Onde  $Re$  é o número de Reynolds,  $m_c$  é a vazão mássica em um coletor,  $N_t$  o número de tubos no coletor,  $D_i$  o diâmetro interno dos tubos e  $\mu_{it}$  é a viscosidade cinemática da água no interior dos tubos. Neste trabalho será considerado o escoamento turbulento para  $Re \geq 2300$ , e

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 as Equações (24) e (25):

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

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

Onde  $f_a$  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. A Equação (25) é válida para o cálculo do número de Nusselt em  $Re > 2300$ . 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 é definido isolando  $h_{it}$  na Equação (28):

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

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

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



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

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

Depois de calculados os valores dos coeficientes considerando a temperatura da placa absorvedora inicialmente estimada, deve-se, através 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 ( $1 \times 10^{-4}$ ).

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

Com o  $T_{abs}$  corrigido, a partir das Equações 2 a 20, 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 pelas Equações (32) e (33):

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

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

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

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

Para solução da Equação 34 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,  $T_{mf(j-1)}$ .

### 2.3.2 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.

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

Onde:  $m_{armaz}$  é a massa do líquido armazenado;  $C_p$  é o calor específico do líquido armazenado e  $\Delta T_{armaz}$  é a variação da temperatura média do líquido no armazenamento em um determinado intervalo de tempo. Por meio de um balanço de energia obtém-se a Equação 36:

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

Onde  $Q_u$  é a energia térmica vindo 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.

Através da integração da Equação 37 em relação ao tempo, considerando um intervalo de tempo de 1 hora, isolando a Temperatura final de armazenamento temos:

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

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



### 2.3.3 Fração solar do SAS

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

$$f = \frac{\text{Ganho Térmico Armazenado}}{\text{Demanda de Energia}} = \frac{E_{\text{útil}} + Q_{\text{armaz}}}{E_{\text{útil}}} \quad (38)$$

A fração solar ( $f$ ) representa quanto da energia usado no processo é proveniente do SAS. O valor de  $Q_{\text{armaz}}$  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.

### 2.4 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, fabricado pela empresa Solar Tech na cidade de João Pessoa. A Tabela 2 mostra as especificações técnicas do coletor, e sua eficiência é dada pela Equação 39 (GREEN-PUC Minas, 2003):

$$n = 62,1 - 513,6 \left( \frac{T_{c2} - T_{\text{amb}}}{I} \right) \quad (39)$$

Onde:  $T_{c2}$  é a temperatura em que a água sai do coletor solar.

Tabela 2 – Especificações Técnicas: Coletor Solar Plano S-81 da Solartech (GREEN – PUC Minas, 2003).

Especificações Técnicas (S-81)	
Área Externa	1,78 m <sup>2</sup>
Área Transparente	1,72 m <sup>2</sup>
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

### 2.5 Escolha do boiler

Foram selecionados tanques de 2000l da Solar Tech, cuja especificações encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações Técnicas do Tanque de Armazenamento (Solartech, 2016).

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

## 3 Resultados e discussões

A Tabela 4 mostra valores médios de irradiâncias diárias mensais (W/m<sup>2</sup>), 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  $W/m^2$ .

Tabela 4 - Valores de Irradiâncias Médias Diárias Mensais ( $W/m^2$ ) no plano inclinado ( $16^\circ N$ ) para cidade de João Pessoa.

Mês	Irradiâncias médias diárias ( $W/m^2$ )			
	Global	Direta	Difusa	Inclinada ( $16^\circ$ )
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

### 3.1 Dimensionamento do SAS

O volume de armazenamento calculado foi de  $7,70 m^3$ . 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, considerou-se  $16 m^3$  para garantir uma maior contribuição do sistema. Os cálculos foram realizados para uma temperatura de armazenamento igual a  $70^\circ C$ .

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 (Tabela 5).

Tabela 5 – Demanda Mensal de Energia para Aquecimento de Água (10000 litros/dia).

Mês	Dias de operação	Eútil (kWh/mês)
Jan	23	9229,44
Fev	28	11235,84
Mar	30	12038,4
Abr	29	11637,12
Mai	30	12038,4
Jun	29	11637,12
Jul	30	12038,4
Ago	30	12038,4
Set	29	11637,12
Out	30	12038,4
Nov	29	11637,12
Dez	24	9630,72
Total Anual	341	9229,44



Neste caso, a temperatura ambiente considerada para cada mês é a temperatura média anual (Tabela 1). Calculado os valores médios mensais da energia útil, observou-se que a maior demanda de energia mensal é de 12038,40 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 trata-se 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 SAS proposto sem perdas

A Tabela 6 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 61 – 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 <sup>2</sup>	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 5 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 5 conjuntos em paralelo de 11 coletores conectados em série, o que resulta em uma área coletora de aproximadamente 95 m<sup>2</sup>.

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 7).

Tabela 72 – Resultado do sistema de equações para os valores médios mensais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$f$	0,902	0,906	0,830	0,713	0,707	0,569	0,564	0,742	0,889	1,073	1,133	1,020
$T_{c1}$ (°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.

### 3.3 Energia útil coletada

A Tabela 8 mostra os valores médios obtidos no cálculo da energia útil coletada pela área coletora considerando os dados médios horários anuais.

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,  $T_{abs}$ . A medida que a temperatura da placa absorvedora



umenta, as perdas térmicas dos coletores para o ambiente aumentam também. Esse comportamento é justificado pelo aumento da diferença de temperatura coletor-ambiente.

Tabela 8 – Valores médios anuais obtidos no cálculo da energia útil coletada  $Q_{tot}$  (MJ).

j	S [W/m <sup>2</sup> ]	I [MJ]	T <sub>abs</sub> [°C]	U <sub>tot</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	T <sub>fm</sub> [°C]	Q <sub>u</sub> [MJ]	Q <sub>p</sub> [MJ]	Q <sub>tot</sub> [MJ]	Q <sub>pt</sub> [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

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 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 do dia.

Observa-se também o comportamento da temperatura média do fluido no coletor,  $T_{mf}$ . 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 W/m<sup>2</sup>, atinge-se uma temperatura média do fluido de 40,7°C.

Na Tabela 9 dispõem-se 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.

### 3.4 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 anteriormente (16 m<sup>3</sup>).

O coeficiente de global de perdas térmicas do tanque para o ambiente considerou que os tanques serão instalados em um ambiente fechado sem incidência de vento. Através do método das resistências térmicas foi determinado um valor de aproximadamente 1,1 W/m<sup>2</sup> K.

A Tabela 10 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 Mensais das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida

	Itot [MJ]	Qtot [MJ]	Qpt [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

Tabela 10 - Valores Médios horários Anuais das Perdas no Armazenamento.

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

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 representam as perdas térmicas nesses horários e são os responsáveis pelo decaimento da temperatura de armazenamento. Os valores superiores à 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.

Na Tabela 11 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.

Tabela 11 – 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
Mai	1518,40	144,81	<b>-71,00</b>
Abri	1437,79	144,81	<b>-144,83</b>
Jun	1184,35	126,63	<b>-386,90</b>
Jul	1264,85	184,58	<b>-313,40</b>
Ago	1580,33	151,56	<b>-15,84</b>
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

Verifica-se que apenas em 5 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.

### 3.4 Fração solar do SAS

A Tabela 12 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. Nota-se que 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.



Tabela 12 – 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%

#### 4 Conclusões e comentários finais

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.

Visando uma contribuição mínima do SAS de 80%, foi estimadas uma área coletora de 95 m<sup>2</sup>, sendo essa obtida com o emprego de 55 coletores planos da Solartech arranjados em 5 conjuntos em paralelo de 11 coletores conectados em série. O volume de armazenamento, a partir da demanda de água quente, foi calculado em 8 m<sup>3</sup>, porém esse valor foi dobrado (16 m<sup>3</sup>) considerando que o SAS apresenta contribuição variável e restrita às horas de Sol, e a demanda de energia é constante durante todo o dia.

Uma vez estabelecidas as condições do sistema e a disposição dos seus principais componentes, foi realizado o cálculo das principais perdas presentes no SAS. Notou-se que a maior parte da energia solar é perdida ainda na área coletora. Isso ocorre devido principalmente ao fato dos coletores permanecerem expostos ao ambiente recebendo incidência de ventos, além da contribuição das propriedades radiantes dos seus materiais construtivos.

As perdas no armazenamento apresentam valores menos expressivos, 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. 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.

A busca pelo conhecimento e disseminação de boas práticas quanto às maneiras de incorporar energias renováveis em um sistema energético pode ser considerado um planejamento estratégico para o Brasil. Existe clara necessidade de introduzir-se energia renovável para diversificar a matriz energética Brasileira, principalmente no setor industrial, para promoção do crescimento sustentável.



## Referências

- ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. (2008). *Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar*. [s.l.]: [s.n.]
- Alucci, M. (2011). Climaticus 4.2 (versão Beta). Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética- FAUUSP. Recuperado em 01 de agosto de 2017, de [http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus\\_2011\(beta\).xlsm](http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_2011(beta).xlsm)
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). *NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT - 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: ABNT.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil* (3ª ed.). Brasília: ANEEL.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa energética. (2014). *Consumo de energia do Brasil (Análises Setoriais): Nota Técnica DEA 10/14*. Rio de Janeiro: EPE.
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. (2014). *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley.
- European Commission, Directorate General Energy And Transport. (2001). O Potencial da Energia Solar no Calor de Processo Industrial. *Energia Solar – Revista de Energias Renováveis & Ambiente*, 48, 7-37.
- Kluppel, R. P. (2016). *Curso de Conversão Térmica da Energia Solar*. João Pessoa: CEAR/UFPB.
- Lund, H. (2007). Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, 32(6), 912-919.
- Silva, J. A. C. (2014). *Potenciais aplicações de tecnologias solares em processos industriais como fonte de energia: uma revisão bibliográfica*. 2014. 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)- Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo, Lorena: 2014.
- Solartech. (2016). *Informações Técnicas do Boiler 2000l*. João Pessoa: Solartech.
- UFRGS. RadiaSol 2. (2010). Laboratório de Energia Solar. UFRGS, Porto Alegre. Recuperado em 01 de agosto de 2017, de <http://radiasol-c-program-files-x86-radiasol-2.updatestar.com/pt>