



## Uso de energia solar para aquecimento em tratamento de fio máquina.

**Luiz Fernando Bodanese<sup>1</sup> Arno Krenzinger<sup>2</sup>, Andrea Moura Bernardes<sup>3</sup>,**

<sup>1</sup> NEXO – Gestão em Segurança do Trabalho (Luiz Fernando Bodanese)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul ( arno.krenzinger@ufrgs.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul ( amb@ufrgs.br)

### Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação de possibilidade técnica e viabilidade econômica de uso de energia solar como alternativa à energia elétrica no aquecimento de banho de tratamento de fio máquina na indústria siderúrgica. Contém o dimensionamento de um sistema utilizando 35 conjuntos de coletores solares de tubo evacuado, totalizando uma área de absorção de 84 m<sup>2</sup>, além de um tanque térmico, tubulações e acessórios necessários. A análise econômica indicou uma taxa de retorno do investimento de 14,7% quando considerado um período de 10 anos.

**Palavras-chave:** Energia solar. Coletores solares. Energias Alternativas. Aquecimento de Tanque de Água.

**Área Temática:** Energia.

## Solar energy heating for wire rod finishing

### Abstract

*This work presents a study of technical and economic viability of using solar energy for heating water for a wire rod treating bath in one steel mill when compared to the use of electric energy. Contains the design of a system of 35 sets of evacuated solar collectors, with 84 m<sup>2</sup> of absorption area besides the necessary thermic tank, pipes and accessories. The economic evaluation resulted in a return rate of 14,7% when considering 10 years of operation.*

**Key words:** Solar Energy. Solar collector. Alternative energy. Water tank heating.

**Theme Area:** Energy



## 1 Introdução

A energia emitida pelo Sol que chega à Terra por unidade de tempo em uma área unitária perpendicular à direção da propagação possui um valor médio de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Tendo em vista as variações das condições de incidência da radiação devido à rotação da Terra e à composição da atmosfera os valores práticos obtidos na superfície podem variar de 0 a pouco mais de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Em relação ao uso da radiação solar para aquecimento de água, o Brasil tem apresentado um crescimento significativo. Para viabilizar um crescimento mais acelerado da utilização da radiação solar disponível é necessário desenvolver projetos que aproveitem suas vantagens e contornem suas restrições através de suplementação eventual com outras formas de energia.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto de uso de energia solar para aquecimento de banho de tratamento de fio máquina em empresa siderúrgica.

## 2 Sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar

Um sistema de aquecimento utilizando energia solar é constituído por um conjunto de equipamentos interligados utilizados para captar a energia solar e transformá-la em calor útil.

Os sistemas de aquecimento que utilizam a energia solar são compostos basicamente de dispositivos coletores, reservatório térmico, tubulações isoladas termicamente e fonte auxiliar de energia. Podem também conter diversos acessórios tais como bombas de circulação, válvulas e controladores de fluxo de água em casos de sistemas mais complexos.

Os dispositivos coletores são a parte central e diferenciadora desta instalação. O tipo de coletor solar mais tradicional é o formado por placas coletoras planas. Estes coletores têm o formato de caixas retangulares que permitem transferir a energia solar absorvida para um fluido.

Outro tipo de coletor que está ganhando espaço em função da possibilidade de obter maiores temperaturas da água é o composto por tubos evacuados. Neste caso o material absorvedor (material seletivo) se localiza no interior de um tubo com camada dupla de vidro. Entre as camadas de vidro é produzido vácuo, com o que são reduzidas significativamente as perdas térmicas. Alguns modelos, nos quais a transferência de calor não se dá diretamente para a água a ser utilizada, apresentam como componentes básicos adicionais um fluido intermediário e cabeçote.

O tipo de coletor solar a ser utilizado depende da aplicação e da temperatura de operação a que se destina. Neste trabalho foi considerada a utilização de coletores com tubo evacuado tendo em vista a necessidade de temperaturas mais elevadas (aquecimento de água acima de  $80^\circ\text{C}$ ).

## 3 A instalação de decapagem

O processo de decapagem operou até o ano de 2014, quando por questões de mercado parou de ser utilizado, mas as instalações foram mantidas. O aquecimento dos banhos até esta época era obtido através do uso de vapor de  $8 \text{ Kg/cm}^2$  e  $180^\circ\text{C}$ .

A Empresa em estudo pretende dispor de um projeto para retomada de operação da unidade de decapagem para o caso de haver demanda nos próximos anos para os produtos desta área. No entanto não existe mais a alternativa de utilizar vapor para aquecimento dos banhos. Em vista disso há o interesse em avaliar alternativas para suprir esta utilidade.

O objetivo deste trabalho foi o de selecionar um dos tanques do processo de decapagem e desenvolver uma alternativa utilizando a energia solar como fonte principal para



o aquecimento da água utilizada. Adicionalmente deve ser previsto um sistema auxiliar de fornecimento de energia elétrica para os períodos de baixa radiação solar.

O processo de decapagem química do fio máquina na unidade siderúrgica objeto deste trabalho é realizado após a etapa de decapagem mecânica.

O fluxo de decapagem química ocorre pela passagem dos rolos de fio máquina em uma sequência de quatro (4) tanques. Em cada tanque é realizada uma das seguintes etapas:

- a. decapar em Ácido Sulfúrico;
- b. fosfatizar;
- c. neutralizar;
- d. ensaboar.

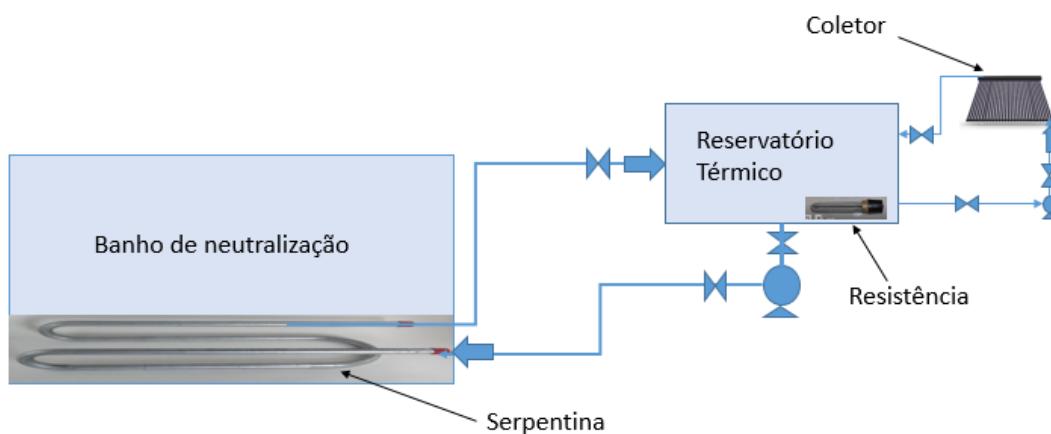
#### 4. Projeto de uso de aquecimento por energia solar para banho de preparo de fio máquina

Em discussão com as áreas de engenharia e operação da unidade siderúrgica foram avaliadas as alternativas para viabilização de uso de energia solar no processo de decapagem química de fio máquina.

Após a etapa de reconhecimento das instalações e avaliação das condições operacionais optou-se por realizar o projeto de uso de energia solar para o aquecimento do banho de neutralização. Este banho tem um volume útil do banho de 28.000 L o que equivale a uma massa de  $28 \cdot 10^6$  g de água.

Um fluxograma simplificado do sistema previsto neste trabalho está apresentado na Figura 1.

**Figura 1**  
Fluxograma simplificado do sistema aquecimento previsto



No processo foco deste trabalho foram identificadas duas demandas de energia durante os ciclos de operação:

- $Q_A$  = Calor necessário para aquecimento inicial do banho de neutralização da temperatura de suprimento ( $25^\circ\text{C}$ ) até a temperatura de operação do banho ( $50^\circ\text{C}$ ). Este aquecimento é realizado semanalmente quando da troca total do banho devido a necessidades operacionais.
- $POT_T$  - Potência para manutenção da temperatura do banho de neutralização em  $50^\circ\text{C}$  durante o período de operação do mesmo. Esta quantidade de energia deve ser suprida diariamente para a reposição das perdas por evaporação e convecção.

Para a obtenção do calor necessário para o aquecimento inicial do banho de neutralização até a temperatura necessária para a atividade utilizou-se a equação 1:

$$Q_A = m_T c (T_B - T_s) \quad (1)$$



## 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

onde,  $m_T$  = massa do banho de neutralização (g);  $c$  = calor específico da água ( $J/g \cdot {}^\circ C$ );  $T_B$  = Temperatura do banho de neutralização ( ${}^\circ C$ );  $T_S$  = Temperatura de suprimento de água ( ${}^\circ C$ ).

Com o uso da equação (1), obtém-se, para  $Q_A$ , o valor de 2.926 MJ, ou seja, 133 MJ a cada hora, considerando o tempo de 22 horas para aquecimento do tanque.

Para o cálculo de  $POT_T$ , foi usada a equação 2:

$$POT_T = POT_E + POT_L + POT_R + POT_C \quad (2)$$

onde,  $POT_T$  = Potência total necessária para manter a temperatura do tanque (J/h),  $POT_E$  = Potência perdida por evaporação pelo topo do tanque (J/h),  $POT_L$  = Potência perdida por convecção pelas laterais do tanque (J/h),  $POT_R$  = Potência para aquecimento da reposição de água (J/h),  $POT_C$  = Potência perdida no tanque térmico e tubulações (J/h).

Os itens da equação (2) foram calculados da seguinte maneira:

- Cálculo de  $POT_E$

Segundo Smith, 1994 o Manual da ASHRAE apresenta a fórmula a seguir:

$$E = \frac{(42,6 + 37,6 V)(P_W - P_{Amb})}{H_E} \quad (3)$$

onde,  $E$  = taxa de evaporação ( $Kg/m^2 \cdot h$ );  $V$  = velocidade do vento na superfície da água (m/s);  $P_W$  = pressão de vapor saturado na temperatura da água (mm Hg);  $P_{AMB}$  = pressão de vapor saturado no ponto de orvalho do ar ambiente (mm Hg);  $H_E$  = calor latente de evaporação da água na temperatura do tanque (KJ/kg). Utilizando-se os valores de 0,1 m/s para a velocidade do ar, 92,51 e 19,23 mm Hg para a pressão de vapor saturado na temperatura de água e no ponto de orvalho do ar ambiente respectivamente, 12,37  $m^2$  para a área superficial e 2.383 KJ/Kg para o calor latente de evaporação da água à temperatura do tanque, obtém-se uma taxa de evaporação  $E = 1,44 Kg/m^2 \cdot h$

A potência perdida pela evaporação diária da água é calculada com a seguinte equação:

$$POT_E = E A_S H_E \quad (4)$$

onde,  $A_S$  = Área da superfície da água ( $m^2$ ). Como a área da superfície do tanque é de 15,37  $m^2$  e o calor latente de evaporação da água na temperatura do tanque é de 2.383 KJ/Kg obtém-se na necessidade de fornecimento de 52,74 MJ/h para suprir este item

- Cálculo de  $POT_L$

A potência perdida por convecção pelas laterais do tanque pode ser calculada utilizando-se as seguintes equações:

$$POT_L = h_L A_L (T_B - T_{amb}) 3600 \quad (5)$$

$$h_L = \frac{1}{\frac{1}{h_C} + \frac{1}{h_I}} \quad (6)$$

$$h_I = \frac{K}{L} \quad (7)$$

$$h_C = 2,8 + 3,0 V \quad (8)$$

onde:  $h_L$  = coeficiente de transferência de calor pelas laterais ( $W/m^2 \cdot {}^\circ C$ );  $h_I$  = coeficiente de transferência de calor pelo isolamento ( $W/m^2 \cdot {}^\circ C$ );  $h_C$  = coeficiente de transferência de calor por convecção pelo vento ( $W/m^2 \cdot {}^\circ C$ ) segundo Wattmuff (1977, apud Duffie, 2013);  $T_B$  = Temperatura do banho ( ${}^\circ C$ );  $T_A$  = Temperatura no ambiente ( ${}^\circ C$ );  $A_L$  = Área das paredes laterais do tanque ( $m^2$ );  $K$  = condutividade térmica ( $W/m \cdot {}^\circ C$ );  $L$  = espessura do isolamento (m);  $V$  = velocidade do vento (m/s).

Neste exemplo está sendo considerada a utilização de isolamento de 0,05 m de poliuretano ( $K = 0,028 W/m$ ). Utilizando-se a velocidade de 0,1 m/s na equação (8), obtém-se o valor de  $h_C$  de  $3,1 W/{}^\circ C \cdot m^2$ . Com isto o  $h_I$  resulta em  $0,56 W/{}^\circ C \cdot m^2$  e o  $h_L$  em  $0,47 W/{}^\circ C \cdot m^2$ . A área lateral do tanque de neutralização é de  $37,48 m^2$ .



## 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

Isto resulta na necessidade de fornecimento de 1,59 MJ/h para suprir este item.

- Cálculo de  $POT_R$

Neste item é calculada a potência necessária para aquecer a água que é reposta para suprir as perdas decorrentes da evaporação, calculadas no item 4.2.2.1 que são de 22,13 Kg/h, somadas às perdas por arraste de 4,17Kg/h totalizando 26,3 Kg/h.

Utilizando-se a equação (1) obtém-se o valor de 2,73 MJ/h,

- Cálculo de  $POT_C$

Nas simulações prévias definiu-se que o tanque térmico deve ter um volume de 12 m<sup>3</sup>. Considerou-se que o tanque térmico terá dimensões de 3 m X 2m X 2 m e a tubulação de circulação terá 30 metros de comprimento e diâmetro de 4 polegadas. Tanto o tanque quanto as tubulações terão um revestimento de poliuretano de 5 cm. Com estas premissas foi obtido o valor de 3,86 MJ/h como a perda de energia neste item.

- Potência total para manter o banho aquecido

Somando-se os valores obtidos nos itens  $POT_E$ ;  $POT_L$ ;  $POT_R$ ;  $POT_C$  obtém-se um total de 60,92 MJ/h como a potência necessária de ser suprida pelo sistema de aquecimento dos banhos de neutralização.

Utilizando-se o Atlas de Radiação Solar do Brasil (PEREIRA et al, 2017) foi determinada a radiação média diária do local em que está instalada a usina siderúrgica (latitude -29,77; longitude 51,540) conforme indicado na Tabela 1.

Inserindo-se a radiação média mensal o programa Radiasol (KRENZINGER, A., BUGS, R.C. 2010) fornece uma tabela, que pode ser utilizada em uma planilha Excell, contendo uma sequência de prováveis valores de radiação total inclinada para cada hora de um ano. A planilha gerada pelo Radiasol com os valores da Tabela 1 fornece a irradiação média diária no plano inclinado. A média diária destes valores foram calculados como sendo 4,61 KWh/dia·m<sup>2</sup>.

**Tabela 1 – Radiação média diária**

Mês	Radiação (KWh/m <sup>2</sup> ·dia)
Janeiro	6,51
Fevereiro	5,9
Março	4,87
Abril	3,79
Maio	2,78
Junho	2,29
Julho	2,51
Agosto	3,19
Setembro	3,61
Outubro	4,83
Novembro	6,22
Dezembro	6,99

Foi realizado um cálculo preliminar de área de coletor necessária para obter fração solar de 60% da demanda para manter o banho de neutralização em 80 °C. Foi considerado um valor inicial de eficiência do coletor de 0,65.



## 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

A estimativa inicial de área necessária foi calculada com a equação:

$$A_C = \frac{POT_T \cdot 0,60 \cdot 24}{E_d \cdot \eta \cdot 3600 \cdot 1000} \quad (9)$$

onde,  $E_d$  = irradiação média diária no plano inclinado ( $\text{kWh/dia} \cdot \text{m}^2$ );  $A_C$  = área do coletor ;  $\eta$  = eficiência do coletor

O valor da potência média necessária para manter o banho de neutralização aquecido ( $POT_T$ ), foi calculado no item 2.2.5 como sendo 60,92 MJ/h. Com as definições acima o coletor deveria ter uma área de 81,32  $\text{m}^2$ .

Para este trabalho foi usado como referência um coletor da Apricus com as seguintes características, conforme fornecido pelo fabricante: Modelo: ETC -30 (30 tubos a vácuo); Área do Absorvedor: 2,4  $\text{m}^2$ ;  $F_R(\tau\alpha) = \eta_0 = 0,845$ ;  $a = 1,47$ ;  $b = 0,01$

Esta seleção indicaria a uso de 34 conjuntos de tubos, equivalente a 81,6  $\text{m}^2$ . Em contatos com o fornecedor dos coletores solares (conforme SONG, 2017) definiu-se utilizar um arranjo com 7 filas de 5 conjuntos de tubos em cada fila, totalizando 35 conjuntos de tubos. Neste arranjo, a área total de absorção é 84,0  $\text{m}^2$ . A Figura 3 apresenta o arranjo previsto.

Conforme Duffie e Beckman (2013), a eficiência de um coletor pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - a \frac{(T_i - T_a)}{G_T} - b \left[ \frac{T_i - T_a}{G_T} \right]^2 \quad (10)$$

onde,  $F_R$  = Fator de Remoção de Calor;  $\tau$  = transmitância do vidro;  $\alpha$  = absorância da camada absorvedora ;  $T_i$  = temperatura de entrada da água ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_a$  = temperatura Ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ );  $G_T$ =Radiação inclinada ( $\text{W/m}^2$ )

Um valor de referência estatístico para a radiação inclinada e para temperatura ambiente ( $T_a$ ) em cada hora do ano é fornecido pelo programa Radiasol.

A temperatura de entrada dos coletores solares, que é a temperatura da água no tanque térmico foi calculada para cada hora considerando que a resistência elétrica sempre fornecerá energia complementar quando a temperatura estiver abaixo de 80 $^{\circ}\text{C}$ . Estes valores variaram ao longo do tempo entre 80,0 $^{\circ}\text{C}$  e 96,5 $^{\circ}\text{C}$ .

Na planilha Excel gerada a partir pelo Radiasol foi inserida a energia necessária em cada hora do ano, conforme a condição operacional considerada que prevê: troca semanal do banho de neutralização entre 06:00 h e 08:00 h de cada domingo; aquecimento do banho entre 08:00 h de cada domingo e 06:00 h do dia seguinte; manutenção da temperatura do banho entre 06:00 h de cada segunda-feira até às 06:00 h de cada domingo seguinte.

Como resultado a planilha fornece que o total da energia necessária ao longo do ano é de 603,02 GJ.

Para o cálculo de energia convertida por hora foi usada a equação:

$$POT_A = G_T \cdot \eta \cdot A_C \quad (11)$$

A Equação 11 foi aplicada em cada hora da planilha Excel gerada utilizando-se o programa Radiasol. O total de energia convertida ao longo do ano foi calculada como sendo 326,08 GJ, o que representa 54,0% do total de energia necessária para esta operação.

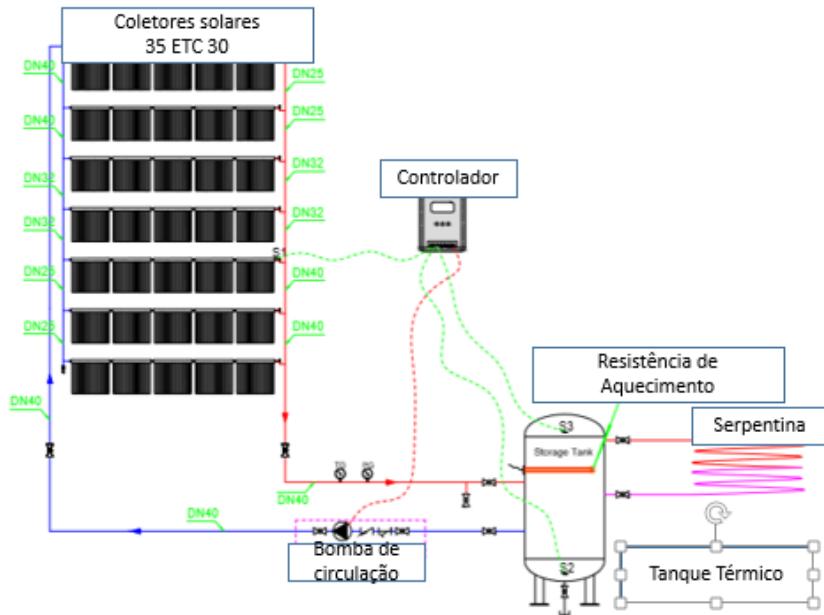
Foi realizada uma cotação para aquisição de 35 conjuntos de tubos e conexões Apricus ETC 30, uma bomba de circulação de 4.200 l/h, um controlador de fluxo, válvulas de bloqueio, válvula de retenção, indicador de temperatura, uniões, tubulações e sobressalentes. O custo total dos materiais do sistema de aquecimento solar foi orçado em US\$ 23.526,00 (preço na origem) (SONG 2017).



## 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

**Figura 3 – Arranjo previsto de equipamentos do sistema de aquecimento solar**



**Fonte:** Adaptado de Song (2017)

Foram considerados os seguintes fatores para definir o valor final em reais: Frete = US\$ 1,500,00 (CHEAP2SHIP, 2017); Imposto de Importação = 20%; PIS = 2,1%; COFINS = 10,65%; ICMS = 18%; Projeto e Instalação = 20% sobre o total dos gastos de aquisição e importação; Taxa de cambio= R\$ 3,25/ US\$.

O resultado de custo do sistema de aquecimento solar instalado atingiria um valor de R\$ 157.880,00.

No item 4.3.4 foi calculada a energia anual absorvida pelo sistema definido como sendo 326,08 GJ ou seja 90,56 MWh.

A tarifa média de consumidor industrial na Região Sul em 2017 conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2017) foi de R\$ 0,388/KWh.

Considerando, de forma conservadora, a possibilidade de a empresa possuir acordo comercial com redução do custo de energia, foi utilizado no cálculo do montante economizado o valor de R\$ 0,30/kWh. Com esta consideração, a economia seria de R\$ 27.168,00 por ano. Em um período de 20 anos a empresa obteria uma taxa de retorno anual de 20,0%. (Em um período de 10 anos a taxa de retorno anual seria 14,7 %).

## 5 Conclusões

Este trabalho confirmou a possibilidade técnica e viabilidade econômica, em relação à alternativa de uso de energia elétrica, de utilizar a energia solar no aquecimento de banho de tratamento de fio máquina na indústria siderúrgica.

Foi elaborado um projeto que permite que 54% da demanda de energia para aquecer e manter a temperatura do banho de neutralização do processo de decapagem química seja fornecida energia solar captada pelo uso de coletores solares de tubo evacuado. O restante da energia poderia ser fornecida por fonte auxiliar, que neste caso foi o uso de resistência elétrica instalada no tanque térmico do sistema de aquecimento solar.



## 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 10 a 12 de Abril de 2018

Quanto a questão econômica foi calculada uma taxa anual de retorno do investimento de 14,7% em um período de 10 anos pela redução do consumo de energia elétrica. Se for considerado um período de 20 anos a taxa anual de retorno aumentaria para 20%.

### Agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

### Referências

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifa Mensal por Classe de Consumo e por Região.** Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550>. Acesso em 31 de dezembro de 2017.

CHEAP2SHIP. **Site de afretamento marítimo.** Disponível em <https://cheap2ship.com/pre-auction/maritime>. Acesso em 20 de dezembro de 2017.

DUFFIE, J. A; BECKMAN W. A.; **Solar Engineering of Thermal Process**, ed. 2, p.174, 2013.

KRENZINGER, A., BUGS, R.C. **Radiasol2: Software para sintetizar dados de radiação solar.** IV Conferência Latino Americana de Energia Solar (IV ISES CLA) e XVII Simpósio Peruano de energia Solar (XVII SPES), Cuzco. 2010.

PEREIRA, E.B, MARTINS, F.R., GONÇALVES, A. R. , COSTA, R.S., LIMA, F.J.L, RUTHER, R., ABREU, S.L., TIEPOLO, G. M., PEREIRA, S.V., SOUZA, J.G.. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** INPE, São José dos Campos. 2ª. Ed, 2017.

PERRY, R. H.; **Chemical Engineers Handbook**, Ed. 7, 1997, p. 11.21

SONG, Jason, Quotationof ETC-30 Apricus [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por [luiz.bodanese@hotmail.com](mailto:luiz.bodanese@hotmail.com) em 29 dez 2017.