

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

**PROJETO PARA USO DE ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE BANHO
DE NEUTRALIZAÇÃO NA DECAPAGEM DE FIO MÁQUINA DE INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA**

LUIZ FERNANDO BODANESE

Porto Alegre, 2018.

LUIZ FERNANDO BODANESE

Engenheiro de Processamento Petroquímico

**PROJETO PARA USO DE ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE BANHO
DE NEUTRALIZAÇÃO NA DECAPAGEM DE FIO MÁQUINA DE INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia, modalidade Profissional.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Andréa Moura Bernardes.

Porto Alegre, 2018.

LUIZ FERNANDO BODANESE

**PROJETO PARA USO DE ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE BANHO
DE NEUTRALIZAÇÃO NA DECAPAGEM DE FIO MÁQUINA DE INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade profissional, e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Andréa Moura Bernardes.

Banca examinadora:

Examinador: Prof. Dr. Arno Krenzinger
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Examinador: Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela Doutor
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Examinador: Dr. Clovis Dutra Acosta
Gerente Técnico de Meio Ambiente e Utilidades
Gerdau S.A.

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, 2018.

Dedico este trabalho à minha Esposa Viviane Bodanese e aos meus filhos Andrea e Gabriel pela compreensão e apoio durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos componentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, pela oportunidade e apoio na realização das atividades administrativas para a realização desta dissertação.

À Professora Dra. Andrea Bernardes pela orientação na seleção do tema, nas revisões de conteúdo e na organização de todo o trabalho.

Ao Professor Dr. Arno Krenzinger pela orientação em muitas das atividades técnicas para a realização deste trabalho.

À Gerdau S.A., em especial aos profissionais da área Corporativa e das áreas de Meio Ambiente, Engenharia e Produção que disponibilizaram seu tempo e detalhes do processo para viabilizar este trabalho.

*“O cavaleiro dedica seus esforços às raízes,
pois, uma vez que as raízes estão estabelecidas,
o caminho daí brotará”.*

Confúcio

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 neutralização na decapagem de fio máquina de indústria siderúrgica.

O trabalho contém o dimensionamento de um sistema utilizando 35 conjuntos de coletores solares de tubo evacuado, totalizando uma área de absorção de 84 m², além de um tanque térmico, tubulações e acessórios necessários.

Para a simulação da economia de energia possível, inicialmente foram obtidos valores de referência de irradiação total e temperatura ambiente a cada hora do ano, inserindo-se a irradiação média mensal e a longitude e latitude do local de interesse no software Radiasol (Krenzinger e Bugs, 2010), desenvolvido na UFRGS. Estes dados foram alocados em uma planilha Excel gerando uma tabela com um total de 3760 linhas.

Em seguida foram calculados e inseridos sequencialmente, em cada linha da planilha, os valores de área de coleta, eficiência dos coletores, calor absorvido, potência necessária, acúmulo de energia e temperatura da água no tanque térmico.

Por último foi totalizada a energia absorvida ao longo do ano e calculada a economia resultante para diversos valores de custo de kWh. A análise econômica indicou uma taxa anual de retorno do investimento entre 3,19% e 24,7% quando considerado um período de 10 anos.

Ressalta-se que além dos fatores técnico e econômico, a viabilização de projetos utilizando energia solar também contribui para disseminar uma nova cultura de aproveitamento energético com benefícios ambientais, na medida em que reduz a emissão de gases efeito estufa, que em grande parte são associados a atividade industrial. Este benefício ambiental resulta na melhoria da imagem da empresa.

ABSTRACT

This work presents a study of technical and economic viability of using solar energy for heating water of the neutralizations tank in the pickling process of wire rod in one steel mill when compared to the use of electric energy.

The work contains the design of a system of 35 sets of evacuated solar collectors, with 84 m² of absorption area besides the necessary thermic tank, pipes and accessories. The economic evaluation resulted in a return rate between 3,19% and 24,7% when considering 10 years of operation.

To simulate the possible saving of energy, the first step was to obtain reference values for total irradiation and local temperature filling in the monthly irradiation average, the longitude and latitude of the site of the project, in the software Radasol (Krenzinger e Bugs, 2010), developed in UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). These data were inserted in an Excel spreadsheet generating a table with 3760 lines.

After that, in each line of the table, the values of collecting area, collector efficiency, absorbed heat, energy demand, energy build up and temperature in the thermal tank were calculated and inserted.

Then, the annual absorbed energy and energy saving were calculated for several values of kWh. The economic analysis indicates an annual return rate between 3,19% and 24,7%, when considered a 10 years period.

It is important to highlight that, beyond the technical and economic factors, the implementation of solar energy projects also contributes to disseminate a new culture of energy use with environmental benefits. Among these benefits is the reductions of greenhouse gases that are associated with the industrial activity. This environmental benefit improves the company image.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIORÁFICA	19
2.1	USO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	19
2.2	SISTEMAS DE AQUECIMENTO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR	20
2.2.1	Componentes básicos de um sistema de aquecimento solar	21
2.2.1.1	Dispositivos coletores	22
2.2.1.2	Tubulações	22
2.2.1.3	Reservatório térmico	23
2.2.1.4	Fonte de energia auxiliar	25
2.2.2	Configurações dos sistemas de aquecimento de água com energia solar	25
2.2.2.1	Circulação natural e circulação forçada	25
2.2.2.2	Aquecimento direto e indireto	27
2.2.3	Tipos de coletores	28
2.2.3.1	Coletores de placas planas	28
2.2.3.2	Coletores de tubos à vácuo	30
2.2.3.2.1	<i>Transferência direta (water-in-glass)</i>	31
2.2.3.2.2	<i>Tubo de calor</i>	32
2.2.3.2.3	<i>Tubo em U</i>	33
2.2.4	Eficiência dos coletores solares	34
3	METODOLOGIA	36
4	RESULTADOS: PROJETO DE USO DE AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR PARA BANHO DE NEUTRALIZAÇÃO DE FIO MÁQUINA	38
4.1	A INSTALAÇÃO DE DECAPAGEM	38
4.1.1	Histórico	38
4.1.2	Descrição do processo de decapagem	39
4.2	SELEÇÃO DO BANHO DE REFERÊNCIA PARA O PROJETO	41
4.3	CÁLCULO DA DEMANDA DE ENERGIA NECESSÁRIA	43
4.3.1	Cálculo de Q_A	44
4.3.2	Cálculo de POT_T	44
4.4	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR	47
4.4.1	Radiação solar disponível	47
4.4.2	Dimensionamento preliminar do coletor solar	49

4.4.3	Seleção do coletor solar	49
4.4.4	Cálculo da eficiência horária do coletor	51
4.4.5	Cálculo da energia necessária por hora e total do ano.....	52
4.4.6	Cálculo da energia solar convertida no coletor por hora e durante o ano ..	53
4.4.7	Cálculo da temperatura no tanque térmico	54
4.4.8	Cálculo da serpentina de aquecimento	56
4.4.9	Definição da potência de resistência elétrica de aquecimento.....	57
4.4.10	Cálculo do gasto para instalar o sistema de aquecimento a energia solar ..	57
4.4.11	Cálculo da taxa de retorno anual do sistema de aquecimento a energia solar	58
5	CONCLUSÕES	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de circulação natural.....	26
Figura 2. Sistema passivo utilizando um coletor de tubos à vácuo.....	27
Figura 3. Coletor solar de placas planas.....	28
Figura 4. Coletor solar de tubo à vácuo.....	30
Figura 5. Coletor de transferência direta.	32
Figura 6. Coletor tipo tubo de calor.....	33
Figura 7. Coletor de tipo tubo em “U”.	34
Figura 8. Curvas típicas de eficiência de coletores solares.	35
Figura 9. Metodologia do trabalho.	37
Figura 10. Fluxograma do processo de decapagem de fio máquina.....	40
Figura 11. Fluxograma simplificado do sistema de aquecimento previsto.	43
Figura 12. Demandas de energia consideradas no trabalho.	47
Figura 13. Arranjo do sistema de aquecimento solar.	51
Figura 14. Variação de temperatura no tanque térmico.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Capacidade Instalada de Energia Elétrica no Brasil	17
Tabela 2. Irradiação média diária	48
Tabela 3. Radiação inclinada e temperatura obtidos com o uso do Radiasol.....	48
Tabela 4. Valor de área de coletor solar inserido na tabela Excel.....	50
Tabela 5. Valores de eficiência dos coletores solares na tabela Excel.	52
Tabela 6. Valores de calor absorvido nos coletores e potência necessária.....	53
Tabela 7. Valores de acúmulo de energia e temperatura no tanque de neutralização.	55
Tabela 8. Taxa de retorno anual.	59

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

A_C	Área do coletor solar	m^2
A_L	Área Lateral do tanque	m^2
A_S	Área da Superfície da Água	m^2
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers	
c	Calor específico da água	$J/g\ ^\circ C$
CGH	Central Geradora de Hidroeletricidade	
E	Taxa de evaporação da água	$kg/m^2\ h$
FS	Fração Solar	
FR	Fator de coleta do trocador de calor	
G_T	Radiação Inclinada	$kW\ h/m^2$
h_C	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$W/m^2\ ^\circ C$
h_L	Coefficiente de transferência de calor pelas paredes	$W/m^2\ ^\circ C$
h_I	Coefficiente de transferência de calor do isolamento	$W/m^2\ ^\circ C$
H_E	Calor latente de evaporação da água na temperatura do tanque	kJ/kg
K	Resistência do isolamento	$W/m^2\ ^\circ C$
L	Espessura do isolamento	m
m_T	Massa de água no tanque de neutralização	g
Q_A	Calor necessário para aquecimento inicial do banho	J/h
PCH	Pequena Central Hidroelétrica	
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 de reposição	J/h
POT_T	Potência necessária para manutenção da temperatura do tanque	J/h
P_W	Pressão de vapor saturado na temperatura da água	$mmHg$
P_A	Pressão de vapor saturado no ponto de orvalho do ar ambiente	$mmHg$
Q_u	Potência útil convertida pelo coletor	W
T_A	Temperatura ambiente	$^\circ C$
T_i	Temperatura de entrada	$^\circ C$
T_B	Temperatura do banho de neutralização	$^\circ C$
T_S	Temperatura de Suprimento de água	$^\circ C$

UL	Coefficiente global de perda de calor do coletor	W/m ² k
V	Velocidade do ar na superfície da água	m/s
Y	Calor latente vaporização de água à temperatura do banho	kJ/kg
ρ_w	Densidade do ar saturado a temperatura superficial da água	Kg/m ³
ρ_A	Densidade do ar a temperatura e umidade da sala	Kg/m ³
S _w	Umidade específica do ar saturado à temperatura da água	kg H ₂ O/kg ar
S _A	Umidade específica do ar a temperatura e umidade ambiente	kg H ₂ O/kg ar
α	Absorbância	
T	Transmitância	

1 INTRODUÇÃO

A estrela mais próxima da Terra é o Sol. O Sol é como um reator nuclear de fusão contínua, cuja reação mais importante é a conversão de hidrogênio em hélio. Em decorrência desta permanente atividade de fusão, a superfície do Sol apresenta uma temperatura de corpo negro de 5777 K e emite radiação eletromagnética principalmente entre os comprimentos de onda 0,2 a 2,5 μm , faixa que inclui a luz visível que apresenta comprimentos de onda entre 0,38 e 0,78 μm (Duffie e Beckman, 2013).

O fluxo de energia solar que chega à Terra por unidade de tempo em uma área unitária perpendicular à direção da propagação é denominada de constante solar e possui um valor de 1367 W/m^2 (Duffie e Beckman, 2013). Parte desta energia é perdida por absorção ou reflexão ao passar pelos gases, poeiras, vapor d'água e aerossóis presentes na atmosfera. O valor efetivo da intensidade da irradiação em um determinado ponto da superfície pode ser obtido pelo uso de instrumentos específicos denominados pireliômetro e piranômetro. O pireliômetro mede a radiação solar direta, ou seja, somente dos raios solares que chegam diretamente ao equipamento, sem considerar a irradiação difusa. Já o piranômetro fornece a irradiação total, ou seja, a soma da irradiação direta e da irradiação difusa.

Tendo em vista as variações das condições de incidência da irradiação devido à rotação da Terra e à composição da atmosfera (nebulosidade por exemplo) os valores práticos obtidos podem variar de 0 até um máximo de 1100 W/m^2 (Duffie e Beckman, 2013).

Segundo Kumar, Prakash e Kaviti (2017) o total de energia recebida pela Terra do Sol em uma hora é mais do que a energia consumida em um ano.

As formas básicas de utilização da energia solar são a térmica e a fotovoltaica. A energia térmica baseia-se no aquecimento de água para uso direto no uso doméstico ou industrial ou para acionamento de turbinas para produção de eletricidade. Por outro lado, a energia fotovoltaica é baseada na conversão da irradiação do Sol em eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Segundo Kumar, Prakash e Kaviti (2017), a energia fotovoltaica contribui em 2017 com aproximadamente 177 giga watt (GW) ou 1% da demanda de eletricidade do mundo.

Suresh e Rao (2017) ressaltam que o crescimento socioeconômico de um país depende da disponibilidade de energia e que a fonte de energia é um parâmetro crítico a ser avaliado com relação à segurança energética, sustentabilidade e seu impacto no ambiente. Os autores

citam que a demanda de energia na maioria dos processos de aquecimento na indústria é atendida por combustíveis fósseis. Tendo em vista que a maioria destes processos opera na faixa de temperatura de 50°C a 250°C, o uso de coletores solares como alternativa para suprir esta energia pode reduzir o uso de combustíveis fósseis em valores significativos.

As principais vantagens da Energia Solar são:

- a) Fonte renovável: como a energia do Sol apresenta boa estabilidade e permanecerá disponível por alguns bilhões de anos, para efeitos práticos não há preocupações com o seu esgotamento;
- b) Energia limpa: embora como qualquer atividade humana, mesmo o uso da energia solar gere impactos ambientais, após sua instalação este impacto é minimizado não havendo, por exemplo, geração de gases efeito estufa;
- c) Flexibilidade de adaptação: tendo em vista que a energia solar está disponível de forma distribuída é possível fazer projetos que minimizem alterações ambientais, tais como desmatamentos ou alterações relevantes nos leitos dos rios;
- d) Disponibilidade gratuita e baixa manutenção: os custos da utilização da energia solar são basicamente despendidos na construção e montagem. Durante a fase de operação os gastos são relativamente baixos para manutenção e não há custo com a fonte de energia;
- e) Uso remoto: devido a possibilidade de produzir em pequena escala, o uso de painéis solares é viável para o abastecimento de pequenas vilas ou casas situadas em pontos isolados e de baixa densidade demográfica.

Os pontos de atenção mais relevantes para o planejamento do uso da energia solar são:

- a) Indisponibilidade noturna: naturalmente, por depender do Sol, não há possibilidade de gerar energia por esta forma nos períodos noturnos.
- b) Variação ao longo do ano: a incidência solar varia fortemente ao longo do ano nas regiões localizadas em maiores latitudes. Próximo ao Equador, esta variação é menos intensa.
- c) Dependência climática: a incidência solar é fortemente influenciada pelas condições climáticas tais como nebulosidade, nevoeiro, etc.

Considerando que o Brasil possui uma grande área territorial e toda ela com boa incidência de radiação solar, a utilização desta fonte, tanto para geração de energia elétrica como para aquecimento de água para uso residencial ou industrial, deveria ser uma decorrência

natural. O aproveitamento da energia solar, uma energia renovável, para estes usos reduziria o problema elétrico e ambiental.

Em relação ao uso da irradiação solar para geração de energia elétrica, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016, da Empresa de Pesquisa Energética (tabela 1), a capacidade instalada de geração de energia solar no Brasil em 2015 estava em 21 MW. Embora isto signifique um aumento de 40% em relação à capacidade instalada de 2014, representa apenas 0,015% do total da capacidade instalada que neste ano foi de 140.272 MW.

Tabela 1. Capacidade Instalada de Energia Elétrica no Brasil (MW)

	2011	2012	2013	2014	2015	$\Delta\%$ (2015/2014)	Part. % 2015
Usinas Hidrelétricas	78.347,00	79.956,00	81.132,00	84.095,00	86.002,00	2,30	61,30
Usinas Termelétricas	31.243,00	32.778,00	36.528,00	37.827,00	39.393,00	4,10	28,10
PCH	3.896,00	4.101,00	4.620,00	4.790,00	4.840,00	1,00	3,50
CGH	216,00	236,00	266,00	308,00	395,00	28,30	0,30
Usinas Nucleares	2.007,00	2.007,00	1.990,00	1.990,00	1.990,00	-	1,40
Usinas Eólicas	1.426,00	1.894,00	2.202,00	4.888,00	7.630,00	56,10	5,40
Solar	1,00	2,00	5,00	15,00	21,00	40,00	-
Total	117.136,00	120.974,00	126.743,00	133.913,00	140.272,00	4,70	100,00

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – Anuário Estatístico (p 57., 2016)

PCH = Pequenas Centrais Hidroelétricas

CGH = Central Geradora de Hidroeletricidade

Em relação ao uso da irradiação solar para aquecimento de água, o Brasil tem apresentado um crescimento significativo.

Segundo Pottmaier et al. (2013):

“Enquanto a produção de energia elétrica utilizando a irradiação solar tem um significado muito pequeno no Brasil, a energia solar a partir de coletores térmicos tem se expandido e contribuído significativamente para a redução do consumo de energia no aquecimento de água. Atualmente, há em torno de 6 milhões de m² de Coletores Térmicos instalados para aquecimento de água, gerando 4.000 MW de energia térmica, o que significa duas vezes a capacidade de energia de Angra I e II somadas”.

Para viabilizar um crescimento mais acelerado da utilização da irradiação solar disponível é necessário, principalmente em usos em atividades industriais, conhecer as características desta alternativa de modo a desenvolver projetos que aproveitem suas vantagens

e contornem suas restrições através de suplementação eventual com outras formas de geração de energia.

Projetos relacionados a atividade industrial exigem um cuidado específico pois normalmente envolvem maiores volumes de água e temperaturas mais elevadas. Isto implica a necessidade de utilização de grandes áreas e equipamentos diferenciados para suprir a demanda. Também é importante uma avaliação cuidadosa da atividade a ser atendida, tendo em vista as peculiaridades que cada instalação industrial apresenta, diferentemente do uso doméstico que tende a ser mais facilmente padronizável.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto de uso de energia solar para aquecimento de um dos banhos de decapagem de fio máquina em empresa siderúrgica. O projeto aproveita as vantagens da geração solar para fornecer parte da demanda e uma fonte alternativa para complementar as necessidades decorrentes de suas limitações nos momentos em que a irradiação solar não está disponível ou é insuficiente.

A energia solar pode aquecer outros fluidos além da água. No entanto, para simplificação dos textos ao longo deste trabalho, sempre será utilizada a água como fluido de referência para o aproveitamento da energia solar.

2 REVISÃO BIBLIORÁFICA

2.1 USO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Segundo Farjana et al. (2017), a tendência recente de produção e consumo de energia na indústria são notoriamente insustentáveis devido ao significativo aumento das emissões de gás de efeito estufa. Como fonte renovável abundante, os sistemas de energia solar podem ser uma solução para um futuro sustentável para consumidores industriais. A maior restrição para que as indústrias de pequeno e médio porte integrem sistemas de energia renovável em seus processos produtivos é o alto custo de capital e o maior benefício é a garantia de um suprimento contínuo de calor através destas fontes de energia. Os processos típicos onde o calor é utilizado são o aquecimento de água, secagem, pré-aquecimento, aquecimento de vapor, pasteurização, esterilização e lavagem.

Conforme Manea (2012), coletores solares que utilizam superfícies seletivas no seu elemento absorvedor e vácuo para melhorar o isolamento térmico já são conhecidos há décadas, mas seu alto custo deixou reservada sua utilização para os casos em que realmente esta tecnologia fosse imprescindível, como para aquecimento industrial de média temperatura (entre 80°C e 150°C).

Adicionalmente, Farjana et al. (2017), comentam que o setor industrial onde processos de aquecimento solar são mais amplamente utilizados é o de alimentação e bebida, incluindo aquecimento de água, lavagem, pasteurização, aquecimento, secagem, etc. Outro setor representativo é o da indústria têxtil, no qual as operações mais significativas de uso de processos solares são lavagem, secagem, limpeza e prensagem. O levantamento realizado por estes autores mostra que as temperaturas dos processos industriais onde o aquecimento solar é utilizado podem variar entre 10°C e 220°C.

De acordo com Sharma et al. (2017), do total de demanda de energia térmica na indústria, uma fração de 60% situa-se na faixa de temperatura de 30°C a 250°C. Em decorrência disto, os processos de aquecimento industrial usando energia solar (*SHIP – solar heat for industrial processes*) estão sendo considerados como uma opção de energia limpa e renovável em muitos países do mundo. Os principais fatores que direcionam a seleção do coletor solar mais apropriado para atender à demanda de processos são: (i) temperatura de operação; (ii) eficiência do coletor solar; (iii) rendimento anual de energia; (iv) custo e (v) espaço disponível.

Em relação às perspectivas de utilização da energia solar na indústria, Lauterbach et al. (2012), informam que o potencial técnico de uso de aquecimento solar para processos industriais na Alemanha é de 16 TWh por ano, o que representa 3,4% da demanda total de calor da indústria. No entanto, sistemas de aquecimento solar são quase que exclusivamente usados para suprimento de água quente, aquecimento de ambiente e piscinas. Apenas poucos sistemas foram instalados em indústrias na Alemanha e ao redor do mundo, de modo que sistemas de aquecimento solar na indústria representam uma fração ínfima de 0,02% em relação ao total de capacidade instalada. Adicionalmente, os processos de lavagem, limpeza e tratamento de superfícies de metais também são citados como de bom potencial para uso de energia solar.

2.2 SISTEMAS DE AQUECIMENTO 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 que pode aquecer um fluido para ser usado para fins industriais ou residenciais. O coletor solar é o equipamento central do sistema. Conforme Duffie e Beckman (2013), o coletor solar é um trocador de calor que transforma energia radiante solar em calor. Adicionalmente, Lafay (2005) diz que o coletor solar é um tipo de trocador de calor, pois a maioria dos trocadores de calor realiza a transferência de calor de fluido para fluido, com alta taxa de transferência, pouco importando a parcela irradiante. Já no coletor solar a transferência de energia ocorre entre uma distante fonte de energia radiante e um fluido.

Para captar a energia solar e transformá-la em calor útil, o sistema de aquecimento solar utiliza os três processos de transferência de energia por diferença de temperatura: radiação, condução e convecção.

A radiação é a forma pelo qual a energia de uma fonte distante, no caso o sol, incide e é captada nos dispositivos coletores, causando o aquecimento dos mesmos. Pelo processo de condução o calor captado nos dispositivos coletores é transmitido para um fluido de interesse. A convecção é utilizada adicionalmente em diversas situações no circuito hidráulico, tais como para propiciar o deslocamento do fluido em sistemas de circulação natural e no interior de tubos coletores à vácuo.

Em cada etapa deste processo uma fração da energia é perdida nos diversos componentes do sistema pelos mesmos processos – radiação, convecção e condução. As

principais perdas são decorrentes da radiação das próprias placas e por condução e convecção entre os dispositivos coletores e o meio.

A proporção entre a quantidade de energia transmitida para a água e a quantidade total de energia incidente indica a eficiência do coletor. Conforme Lafay (2005), a eficiência dos coletores solares é função da radiação solar, temperatura ambiente e da entrada da água no coletor. Quanto menor for a temperatura de entrada da água no coletor, maior será a eficiência deste e, conseqüentemente, do sistema de aquecimento solar. O correto dimensionamento dos equipamentos é fundamental para assegurar a maior parcela possível de conversão da energia incidente em calor útil. Com isto se consegue otimizar a taxa de retorno do investimento ao utilizar os equipamentos coletores no máximo de sua capacidade e com o mínimo de gasto com a instalação.

Algumas alternativas utilizadas para aumentar a eficiência dos sistemas de aquecimento de água utilizando coletores solares são:

- a) Utilização de placas metálicas pintadas de preto na construção dos absorvedores, pois a cor preta facilita a absorção da radiação incidente;
- b) Instalação de vidro duplo ou tubos a vácuo que minimizam as perdas para o meio;
- c) Previsão de isolamento nos equipamentos da instalação para evitar perdas por condução para o meio.

Rosa (2012) ressalta que um sistema de aquecimento de água não deve, por questões econômicas, suprir toda a energia necessária para o consumo, devido a ocorrência de significativa variação entre os valores de irradiação em diferentes dias. Um sistema que fosse dimensionado para suprir toda a demanda de um caso concreto provavelmente ficaria excessivamente caro. O mesmo autor cita como um padrão de mercado o valor de 70% como a parcela de aquecimento oriunda da energia solar em relação a demanda total do processo a ser atendido.

2.2.1 Componentes básicos de um sistema de aquecimento solar

Manea (2012) cita que sistemas de aquecimento de água para consumo doméstico (temperatura inferior à 80°C) que utilizam energia solar possuem como principais componentes os seguintes: coletor solar, reservatório térmico, fonte auxiliar de energia, tubulações isoladas termicamente e fonte auxiliar de energia.

Além disso, também podem conter diversos acessórios tais com bombas de circulação, válvulas de bloqueio e de retenção e controladores de fluxo de água em casos de sistemas mais complexos. A seguir descrevem-se os equipamentos básicos dos sistemas de aquecimento solar.

2.2.1.1 Dispositivos coletores

Os dispositivos coletores são a parte central e diferenciadora desta instalação.

Suresh e Rao (2017) classificam os coletores como de baixa (<80°C), média (80°C até 250°C) e alta (>250°C) temperatura. Os coletores de baixa temperatura são usados principalmente para aquecimento de água e ambientes, já os coletores de média temperatura são usados para gerar água quente, vapor e ar quente em processos de aquecimento industrial e os coletores de alta temperatura são usados, principalmente para geração de energia e para suprir água quente e vapor.

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. Segundo Duffie e Beckman (2013), coletores de placas planas podem ser projetados para aplicações requerendo fornecimento de energia a temperaturas moderadas.

Outro tipo de coletor que está ganhando espaço em função da possibilidade de obter maiores temperaturas da água é o composto por tubos evacuados. Conforme Manea (2012), este tipo de coletor minimiza a troca de calor por convecção e condução colocando a superfície absorvedora em um ambiente quase totalmente evacuado de matéria. 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.

Considerando a diversidade e especificidade de cada tipo de coletor uma descrição mais detalhada das alternativas será apresentada no item 2.2.3.

2.2.1.2 Tubulações

Segundo Rosa (2012), os coletores solares de placas planas possuem tubos do cabeçote e tubos elevadores. Os tubos do cabeçote são os tubos de entrada e saída do coletor e são localizados na parte inferior e superior respectivamente. Os tubos elevadores são os que interligam os tubos cabeçotes inferior e superior.

As tubulações também conduzem o fluido entre o tanque de armazenamento e o dispositivo coletor e posteriormente ao reservatório térmico. Conforme Lafay (2005), o mais usual é conectar a saída para os coletores no fundo do reservatório e o retorno no topo do mesmo.

Rosa (2012) ressalta que para a utilização de circulação natural, o coletor deve estar mais baixo que o tanque térmico. Este cuidado evita a formação de bolsões de ar que comprometem a circulação da água. O mesmo autor também cita que a distância das tubulações também é um fator importante, pois se a distância percorrida pela água quente for muito grande, a perda de carga pode prejudicar a circulação do sistema.

2.2.1.3 Reservatório térmico

Conforme Rosa (2012), para aplicações de aquecimento de água é necessário armazenar a energia acumulada durante o dia ou durante vários dias de forma a poder utilizar em momentos diversos. Para isto é necessário um reservatório térmico com capacidade para atender à demanda de água quente.

O reservatório térmico permite a utilização de água aquecida em qualquer horário do dia, inclusive à noite e em momentos em que haja nebulosidade, utilizando a energia acumulada durante os períodos de incidência solar.

Lafay (2005) cita que os reservatórios podem ser fechados ou abertos. Os reservatórios fechados, também denominados pressurizados, trabalham sob pressão acima da atmosférica, geralmente pressurizados por uma caixa de água mais elevada, que proporciona a alimentação do sistema. Os reservatórios abertos trabalham em pressão atmosférica. Neste caso, recebem alimentação de outra caixa d'água instalada no mesmo nível, pelo princípio de vasos comunicantes. Os reservatórios abertos também podem, através de um sistema de boia, receber alimentação de outra caixa em nível superior ou diretamente da rua.

O correto dimensionamento do reservatório térmico é um ponto relevante para a melhor eficiência do uso da energia solar. Segundo Ashrae¹ (1996, apud Lafay, 2005) o projeto e seleção do equipamento de armazenamento é um dos elementos mais negligenciados nos sistemas de energia Solar.

¹ASHRAE. **ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment**. New York, NY: ASHRAE, 2016. v. 1.

Como exemplos de pontos a serem avaliados cuidadosamente podem ser citados os seguintes:

- a) Temperatura de armazenagem da água: Este item condiciona o tipo de material a ser usado na fabricação do reservatório térmico. O material do reservatório deve ser resistente à água com temperatura elevada e ao mesmo tempo reduzir as perdas térmicas. Conforme Lafay (2005), em situações típicas de uso para banho, por exemplo, a temperatura de consumo é de aproximadamente 38°C. Considerando as perdas térmicas, a maioria dos projetos utiliza uma temperatura superior a 60°C para garantir a qualidade da água de consumo. Em outros usos, como na indústria, muitas vezes a água pode ser utilizada acima de 80°C. Em função disto, os reservatórios em sua maioria são construídos em aço inoxidável, cobre ou polímero resistente a altas temperaturas e possuem revestimento com material de baixa condutividade térmica como poliuretano expandido ou lã de vidro;
- b) Grau de estratificação: de acordo com Manea (2012), estratificação térmica é a distribuição natural de temperatura no interior do tanque que ocorre em virtude das diferenças de massas especificadas da água no seu interior. Devido a isto, nos pontos altos do reservatório o fluido está a maior temperatura. Duffie e Beckman (2013) ressaltam que o grau de estratificação de um tanque depende de características de projeto tais como: (i) tamanho, localização e dimensionamento das entradas e saídas; e (ii) fluxos das correntes de entrada e saída;
- c) Volume de reservatório: normalmente utiliza-se um reservatório de volume proporcional à área de coletores solares utilizada. Esta proporção, para uso residencial, está entre 50 e 100 l/m² de coletor;
- d) Perfil de consumo: é representado pela sequência de vazões de demanda de água quente ao longo do tempo. Segundo Lafay (2005), o perfil de consumo influencia a eficiência dos sistemas de aquecimento de água com energia solar, pois desloca camadas de água no interior do reservatório, tanto pela retirada de água quente através do consumo propriamente dito, como pela reposição de água fria. Este deslocamento de camadas modifica a temperatura de entrada da água no coletor solar e esta afeta consideravelmente a eficiência dos coletores;
- e) Formato do tanque: reservatórios na vertical propiciam melhor estratificação térmica.

2.2.1.4 Fonte de energia auxiliar

Tendo em vista que inevitavelmente há períodos prolongados de baixa ou nenhuma irradiação solar, sistemas de aquecimento de água utilizando este tipo de energia necessitam possuir uma fonte de energia auxiliar para suprir a demanda sempre que necessário. Conforme Rosa (2012), a fonte auxiliar pode ser de diversas formas, sendo a mais comum a energia elétrica, com o uso de uma resistência elétrica instalada no interior do tanque. Também pode ser uma fonte externa como uma bomba de calor ou um aquecedor a gás.

Um importante parâmetro para o dimensionamento de um sistema de aquecimento com energia solar é a Fração Solar (FS). Segundo Manea (2012), a FS representa a parcela de energia térmica anual adicionada pelo sistema de aquecimento solar em relação à energia total consumida.

Normalmente deve-se procurar que o projeto atinja uma fração solar anual elevada para otimizar o uso da instalação e reduzir os custos da energia de apoio, como a eletricidade. Duffie e Beckman (2013), por exemplo, sugerem um valor de FS de 75%. No entanto, caso haja disponibilidade de energia a baixo custo, a situação pode se alterar. Neste caso, no dimensionamento pode ser adotada uma fração solar menor, otimizando os gastos através de um menor número de coletores (menos investimento) com um maior uso dos mesmos (menor desperdício).

Por seu lado, Lafay (2005) comenta que, quando se usa eletricidade, normalmente se busca uma fração solar anual elevada devido ao alto custo deste tipo de energia. No entanto, no caso de apoio a gás, a situação deve ser avaliada mais detalhadamente, considerando que em alguns casos o custo do uso do gás pode ser menor em relação ao uso da energia solar.

2.2.2 Configurações dos sistemas de aquecimento de água com energia solar

2.2.2.1 Circulação natural e circulação forçada

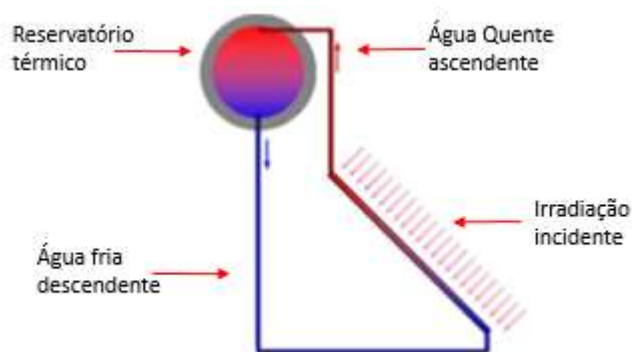
A circulação de água nos sistemas de aquecimento com uso de coletores solares pode ser realizada de forma natural ou forçada.

Segundo Lafay (2005), a circulação natural ocorre pelo fato de a água aquecida ficar com massa específica mais baixa e conseqüentemente ocupar posições mais elevadas no circuito hidráulico. Este gradiente de temperatura e conseqüente gradiente de massas

específicas causam uma circulação natural através dos coletores que é chamada de circulação por termosifão. Este processo se dá de forma contínua enquanto houver a incidência de radiação nas placas coletoras. Neste caso, o sistema é denominado de passivo. O autor referido cita que o sistema passivo é o mais utilizado no Brasil devido à sua simplicidade.

A principal vantagem deste sistema é a independência da eletricidade. Isto permite que os sistemas passivos tenham o coletor acoplado diretamente ao reservatório como indicado na figura 1. Por outro lado, conforme Rosa (2012), no projeto e instalação é necessário cuidado especial em relação à posição relativa dos componentes do sistema de aquecimento, pois deve ser observada uma diferença de altura entre o coletor e o tanque, sendo que o coletor deve estar mais baixo, permitindo a água quente subir.

Figura 1. Sistema de circulação natural.

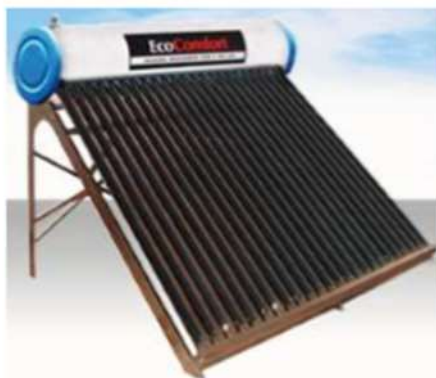


Fonte: Adaptado de Manea (2012)

Os sistemas passivos podem ter o coletor acoplado diretamente ao reservatório como é o caso do coletor da figura 2, a qual mostra um coletor de tubos a vácuo acoplados ao reservatório.

Em muitas situações, as condições de instalação não permitem o aproveitamento do sistema de termosifão. Segundo Manea (2012), os principais motivos desta situação são: alta perda de carga do sistema devido às distâncias ou ao número de coletores, impossibilidade da instalação do reservatório térmico acima do coletor ou devido as condições climáticas poderem resultar em congelamento do fluido. Nestes casos se adota o sistema de aquecimento em circulação forçada.

Figura 2. Sistema passivo utilizando um coletor de tubos à vácuo.



Fonte: www.ecocomfort.com.br/aquecedores, apud Manea (2012)

Segundo Duffie e Beckman (2013), o sistema de aquecimento é denominado de circulação forçada, ou ativo, quando uma bomba é necessária para a circulação entre o reservatório térmico e o coletor. Usualmente, esta bomba é controlada por um termostato diferencial que desliga a mesma quando a temperatura no reservatório térmico acima do valor desejado. O uso deste sistema evita a operação contínua do sistema de bombeamento, com consequente gasto desnecessário de energia. Este tipo de sistema permite uma maior flexibilidade na posição relativa entre os reservatórios, pois o uso de sistema de bombeamento permite que a água flua mesmo em sentido descendente. Por outro lado, esta alternativa apresenta custos adicionais, tanto para instalação quanto operação, pelo fato de utilizar maior número de dispositivos tais como bomba, sensores e controles de diferenciais de temperatura.

2.2.2.2 Aquecimento direto e indireto

A maneira pelo qual a energia captada nas placas coletoras é transmitida para o fluido a ser utilizado permite classificar as instalações como de aquecimento direto ou indireto.

Manea (2012) descreve os sistemas de aquecimento direto como sendo aqueles que aquecem diretamente a água que será utilizada como fluido de transferência de calor, ou seja, os tubos de aquecimento da água estão em contato direto com as placas coletoras. Por outro lado, sistemas de aquecimento indireto são aqueles em que num primeiro momento é aquecido um fluido intermediário que depois troca calor com água que será utilizada através de um trocador de calor.

Segundo Lafay (2005), a principal razão para o uso de sistemas indiretos é a proteção ao congelamento. O etilenoglicol juntamente com o propilenoglicol são os fluidos refrigerantes

mais utilizados podendo variar o percentual de diluição em função do clima. Outro motivo para o uso de sistema de aquecimento indireto é permitir o aquecimento do fluido intermediário acima de 100°C em situações que exigem temperaturas mais elevadas. Neste caso, o fluido intermediário mais utilizado é o óleo térmico.

2.2.3 Tipos de coletores

Os dois tipos mais tradicionais de coletores solares são os coletores de placas planas e os coletores de tubo à vácuo.

2.2.3.1 Coletores de placas planas

É o tipo de coletor mais comum (figura 3). O seu interior é preenchido com ar, ou seja, não está submetido a vácuo. Isto permite que seja construído em formato de caixa retangular, pois não fica submetido à diferença de pressão entre o exterior e o interior.

Duffie e Beckman (2013) citam que os coletores de placas planas são usados para aplicações que demandem fornecimento de energia a temperaturas moderadas, de até 100°C. As principais aplicações deste tipo de unidade são para aquecimento de água, aquecimento de ambientes e em processos industriais.

Figura 3. Coletor solar de placas planas.



Fonte: Manea (2012)

Segundo Rosa (2012), um coletor solar plano com cobertura é composto basicamente dos seguintes componentes: placa absorvedora, cobertura, isolamento térmico e tubulação.

As placas absorvedoras ou aletas, são os componentes nas quais a energia solar é absorvida. De modo a otimizar a absorção da energia radiante incidente, em geral, para a confecção das placas absorvedoras é utilizado cobre ou alumínio pintado de preto. O material utilizado, a área e a espessura das placas metálicas são fatores determinantes da capacidade de aquecimento do equipamento. Estas placas absorvedoras são conectadas às tubulações que conduzem a água. Normalmente a conexão entre as placas absorvedoras e as tubulações é realizada por soldagem o que garante uma boa transferência de calor das aletas para o tubo e conseqüentemente para a água.

As placas possuem na sua parte superior uma cobertura com alta transmitância (geralmente vidro com baixo teor de ferro) para separar as placas absorvedoras (aletas) do meio externo. O vidro é bastante utilizado tendo em vista que apresenta boa transmitância nas faixas de comprimentos de onda da radiação solar, permitindo que a maior parte da radiação incidente atinja as placas coletoras. Esta cobertura, além de permitir a passagem da maior parte da energia solar, possui também outros objetivos entre os quais evitar que o calor acumulado seja arrastado pelo vento por convecção e diminuir a perda de calor emitida por radiação pelas placas coletoras (efeito estufa). Com isto, uma parte do calor que seria perdido pela atmosfera por convecção e radiação é retida no interior do coletor aumentando a eficiência do equipamento.

Entre as placas coletoras e a cobertura transparente há um espaço, com espessura em torno de 5 cm e normalmente preenchido com ar.

As partes laterais e posterior do absorvedor são compostos de material isolante, normalmente de espuma de poliuretano expandido. Eventualmente também são utilizadas fibras minerais como lã de vidro, lã de rocha e fibra de vidro. Este material isolante tem o objetivo de evitar perdas de calor para o meio ambiente.

Segundo Lafay (2005), os coletores de placas planas apresentam como vantagens a simplicidade de construção, relativo baixo custo, baixa manutenção, alta durabilidade e facilidade de operação em dias nublados. Por outro lado, estes apresentam uma menor capacidade de absorção da energia solar, motivo pelo qual é mais usado para situações em que a temperatura desejada não seja muito elevada.

Todos os componentes do dispositivo coletor – placas coletoras, cobertura, tubulação e material isolante – são integrados através de uma moldura, normalmente de alumínio ou aço galvanizado com o fim de dar consistência mecânica às partes individuais.

2.2.3.2 Coletores de tubos à vácuo

Os coletores solares de tubo à vácuo (figura 4) foram desenvolvidos para situações em que seja necessário atingir maiores temperaturas (acima de 80°C). Neste tipo de coletor as placas de absorção são instaladas no interior de tubos de vidro evacuado e resistente à pressão. Para garantir a manutenção do vácuo nos tubos é necessário que estes sejam eficientemente selados.

Segundo Li et al. (2010), coletores tubulares de vidro à vácuo são largamente utilizados na China devido a seu baixo preço e bom desempenho anticongelante, sendo que sua produção foi de 15 milhões de m² no ano de 2005. Estes autores complementam que, considerando a baixa perda de calor por convecção devido ao envelope de vácuo ao redor da superfície de absorção, se este tipo de coletor puder ser aplicado em sistemas de aquecimento de águas com circulação forçada, ele terá um melhor desempenho do que coletores planos de placas.

Figura 4. Coletor solar de tubo à vácuo.



Fonte: Rosa (2012)

O objetivo do vácuo é melhorar o isolamento entre a área de captação e transformação de energia – placas coletoras, tubos e fluido de aquecimento – e o meio ambiente. Para assegurar a manutenção do vácuo por maior período adota-se a inserção de uma pastilha de material reativo, denominada “getter” no sistema de vácuo. A troca de calor por radiação nestes coletores também é minimizada devido a superfície absorvedora ter baixa emissividade. Estas características põem este tipo de coletor em vantagem em relação aos coletores planos quanto às perdas térmicas.

Da mesma forma os coletores de tubos evacuados, tendem a ter melhor desempenho em ambientes menos favoráveis como, por exemplo, em climas mais frios ou em procedimentos

que exijam temperatura mais alta do fluido de trabalho. Sharma et al.² (2005, apud Manea, 2012), assim como Di Lalla³ (2011, apud Manea, 2012) utilizaram coletores de tubos para construir equipamentos de cozer alimentos que atingem temperaturas acima de 100°C utilizando eritritol e óleo de soja, como fluidos de transferência de calor.

Um coletor solar de tubo evacuado tipicamente é constituído de tubos e placa seletiva. 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.

Os tubos são em número de dois e construídos de forma concêntrica com um espaçamento entre eles, sendo este espaço evacuado durante o processo de fabricação. Este espaço evacuado tem o objetivo de reduzir as perdas térmicas por condução e convecção.

A superfície seletiva recobre a parte externa do tubo interno e tem o objetivo de absorver a radiação solar incidente e transmitir o calor para o fluido intermediário ou diretamente para a água a ser utilizada.

Nos casos em que é utilizado um fluido intermediário este fluido é utilizado como uma ligação para a transferência de calor entre a placa seletiva e a água a ser aquecida. Neste caso também é utilizado um dispositivo denominado cabeçote. O cabeçote é o ponto de interligação onde ocorre a troca de calor entre o fluido intermediário e a água a ser aquecida.

Os coletores de tubo a vácuo podem utilizar diferentes formas para a extração do calor de dentro dos tubos a vácuo. Segundo Manea (2012), algumas das formas mais comuns são a utilização de tubos de calor (*heatpipe*), tubo em U e por transferência direta. A seguir estão descritas estas formas de extração.

2.2.3.2.1 *Transferência direta (water-in-glass)*

Neste caso não há uso de fluido intermediário de trabalho. Os tubos são conectados diretamente ao reservatório térmico onde se encontra a água a ser aquecida. Quando há incidência de radiação solar, ocorre aquecimento de água no interior do tubo, fazendo a água ascender ao reservatório pela parte superior do tubo, enquanto acontece a reposição desta pela

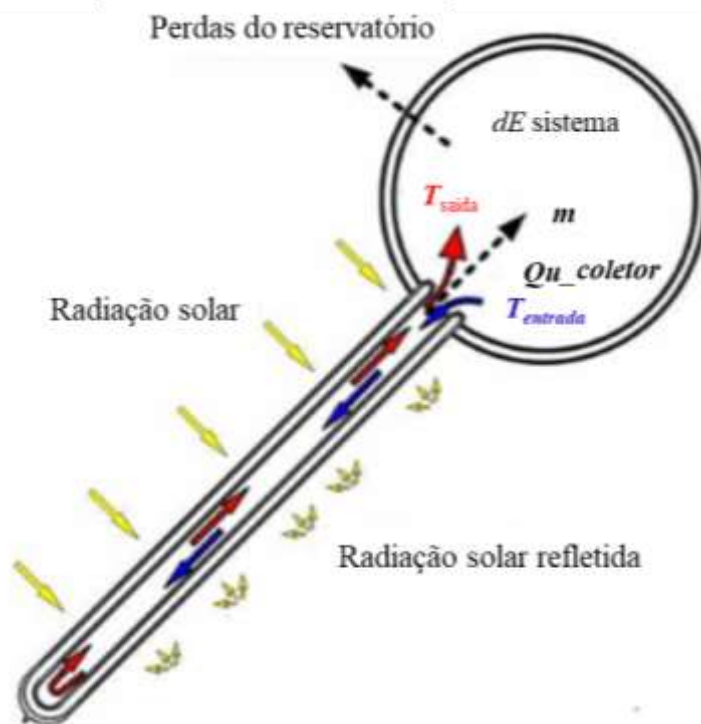
² SHARMA, S. D.; KITANO, H.; SAGARA, K. **Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit.** Solar Energy, [s. l.], v. 78, n. 3, p. 416–426, 2005.

³ DI LALLA, N. **Cocina solar de alto rendimiento con aplicación de tubo evacuado selectivo y concentrador CPC.** Avances en energías renovables y medio ambiente, [s. l.], v. 15, p. 309–315, 2011.

parte inferior (Manea, 2012). O método de extração de calor tipo transferência direta (*water-in-glass*) é o mais utilizado dentre os citados devido à sua simplicidade e seu baixo custo de fabricação.

A figura 5 ilustra o que ocorre no interior de um tubo conectado a um reservatório horizontal quando há incidência de radiação solar (Morrison, Budihardjo e Behnia, 2004).

Figura 5. Coletor de transferência direta.



Fonte: Morrison et al.⁴ (2004, apud Manea, 2012).

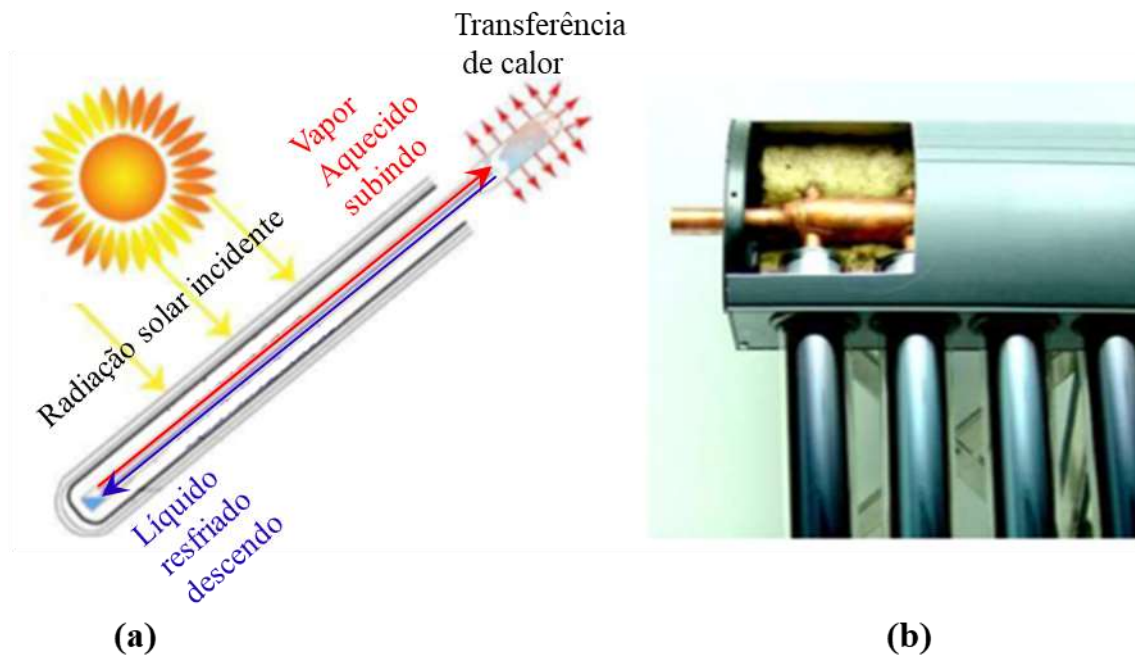
2.2.3.2.2 Tubo de calor

De acordo com Manea (2012), neste tipo de coletor é utilizado um tubo metálico com ambos extremos fechados e em cujo interior colocado um fluido em uma pressão adequada, que troca de fase evaporando e condensando em uma faixa de temperatura específica. Este tubo, denominado tubo de calor ou “*heatpipe*” é instalado no interior do tubo de vácuo e ambos têm contato através de uma aleta entre o vidro e o “*heatpipe*”. Ao incidir a radiação solar, como mostra a figura 6(a), o líquido evapora, deslocando-se para parte mais elevada onde troca calor com a água circundante no cabeçote, representado na figura 6. Ligeiramente mais frio, o fluido

⁴ MORRISON, G. L.; BUDIARDJO, I.; BEHNIA, M. **Water-in-glass evacuated tube solar water heaters.** Solar Energy, [s. l.], v. 76, n. 1–3, p. 135–140, 2004.

condensa e retorna por gravidade à parte inferior do tubo de calor. Este tipo de extração apresenta como vantagem sobre os demais o fato de ter uma baixa capacidade térmica, tendo assim uma resposta rápida à incidência solar.

Figura 6. Coletor tipo tubo de calor, onde (a) mostra o processo de aquecimento e (b) apresenta uma vista do equipamento.



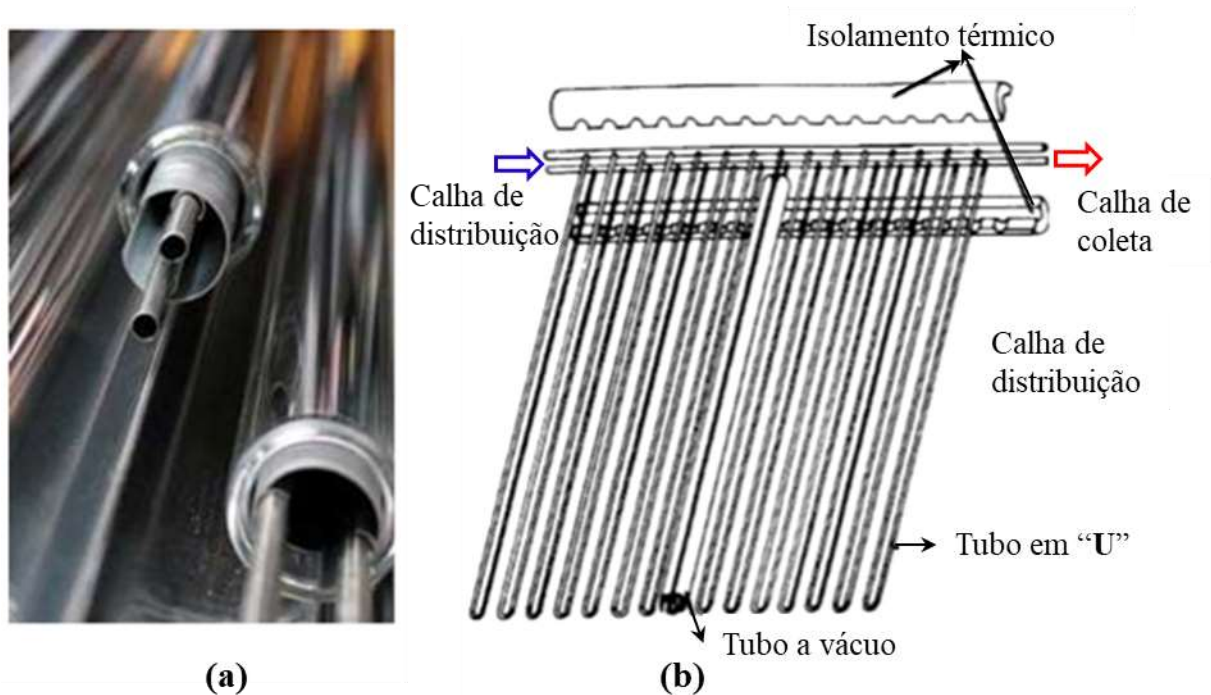
Fonte: www.apricus.com (APRICUS SOLAR CO. LTD., 2003)

2.2.3.2.3 Tubo em U

Manea (2012) descreve que este tipo de coletor possui um tubo de metal em forma de “U”, com uma aleta circular, montado no interior do tubo a vácuo como mostra a figura 7(a). A figura 7(b) exemplifica o funcionamento deste tipo de coletor, em que uma extremidade do tubo em “U” está conectada à calha de distribuição de água “fria”, a qual percorre o tubo até a parte inferior e retorna aquecida à calha de coleta. Estas calhas são envolvidas por um isolamento térmico.

Necessariamente, este tipo de coletor tem de ser utilizado em um sistema ativo, ou seja, com circulação forçada por uma bomba hidráulica. Por não haver água no tubo à vácuo, a avaria de um único ou poucos tubos não afeta significativamente o funcionamento do sistema.

Figura 7. Coletor de tipo tubo em “U”, onde (a) apresenta uma vista do tubo em “U” e (b) mostra o fluxo e principais dispositivos de uma instalação.



Fonte: Morrison et al⁴ (2004, apud Manea 2012)

2.2.4 Eficiência dos coletores solares

O tipo de coletor solar a ser utilizado depende da aplicação e da temperatura de operação a que se destina. Para baixas temperaturas, como o uso para aquecimento de piscinas, os coletores podem ser do tipo plano sem cobertura. Para aquecimento para banho doméstico, os coletores já devem ser com cobertura. Em aplicação industriais, em que as temperaturas utilizadas podem ser superiores a 80°C os coletores planos de alto desempenho ou os coletores de tubo evacuado podem ser os mais indicados.

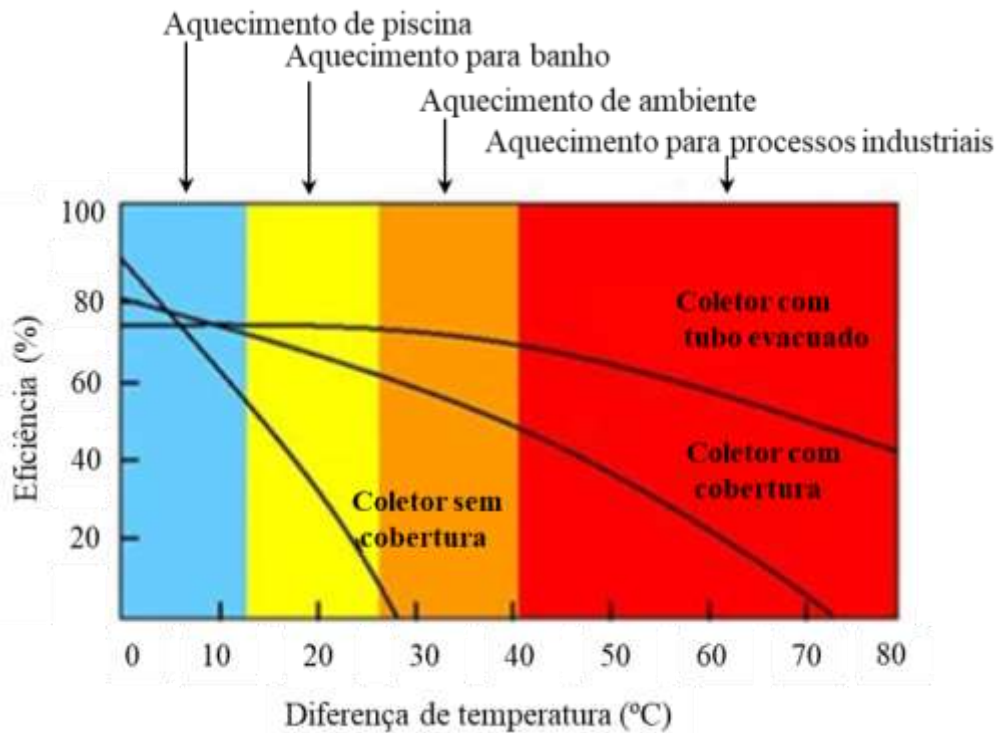
Conforme Duffie e Beckman (2013), a eficiência de um coletor de energia solar é a razão entre a energia utilizada pela disponível conforme indicado na equação 1.

$$\eta = \frac{Q_u}{G_T \cdot A_c} = F_R \cdot (\tau\alpha) - a \cdot \frac{(T_i - T_a)}{G_T} - b \cdot \left[\frac{T_i - T_a}{G_T} \right]^2 \quad 1$$

onde Q_u é a potência útil convertida pelo coletor, G_T é a irradiância no plano inclinado, A_c é a área do coletor solar, η é a eficiência do coletor, F_R é o fator de remoção de calor, τ é a transmitância do vidro, α é a absorvância da camada absorvedora, T_i é a temperatura de entrada da água, T_a é a temperatura ambiente e G_T é a radiação inclinada, “a” e “b” são parâmetros específicos para cada tipo de coletor..

A figura 8 mostra as curvas de eficiência típicas para ajudar na seleção do melhor coletor em função da diferença entre a temperatura da água quente desejada e a temperatura ambiente. Uma verificação preliminar nestas curvas de eficiência indica a adequação de uso de coletores com tubo evacuado para sistemas em que haja necessidade de temperaturas mais elevadas (diferença entre entrada e saída do coletor acima de 40°C).

Figura 8. Curvas típicas de eficiência de coletores solares.



Fonte: www.aquakent.com.br (Aquakent, 2015)

3 METODOLOGIA

Inicialmente foram realizadas reuniões com colaboradores da empresa que atuam nas áreas corporativa, engenharia, produção e meio ambiente para identificar uma parte do processo da unidade industrial de interesse para o desenvolvimento do trabalho. Profissionais do setor de engenharia e produção informaram que havia interesse da unidade industrial de voltar a operar a área de beneficiamento de fio máquina que havia sido desativada há alguns anos por questões de mercado. Tendo em vista que o antigo sistema de aquecimento baseado em vapor não está mais disponível, foi decidido por um estudo de uso de energia solar para aquecimento de banho de tratamento de fio máquina.

Posteriormente foram realizadas visitas à unidade industrial para levantamento dos equipamentos, etapas e parâmetros de processo da área de interesse.

Com os dados obtidos nas visitas à unidade industrial, foi realizado o cálculo da demanda de calor do processo e dimensionado um sistema de aquecimento com uma Fração Solar que permite um adequado aproveitamento da irradiação solar disponível ao mesmo tempo que minimiza o dispêndio econômico.

Foi feita uma simulação do perfil de captação de energia solar e de uso da energia térmica no processo de interesse. Para esta simulação, inicialmente foram inseridos os dados de localização e irradiação média diária no software Radiasol. Com estes dados o software Radiasol gerou uma lista representativa de dados de irradiação horária e temperatura no local de interesse. Estes dados foram transferidos para uma planilha Excel. Nesta tabela foram inseridos valores calculados de área de coleta bem como de eficiência dos coletores e energia absorvida por hora que permitiram determinar o total de energia absorvida ao longo do ano.

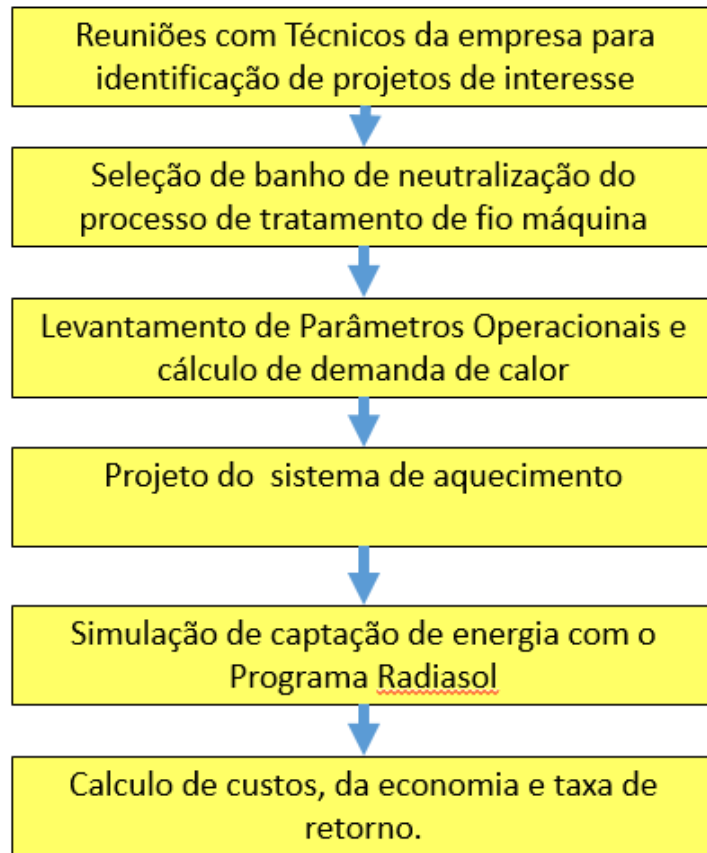
Para o dimensionamento do sistema de aquecimento houve interação com fornecedor de equipamentos solares, que verificou a consistência do sistema projetado e forneceu detalhamento de equipamentos e custos necessários.

Em seguida foram agregados nos custos os valores de impostos e estimativas de mão de obra, gerando um valor global de investimento.

Por último foi dimensionada a economia gerada pelo uso da energia solar em comparação com o custo da energia elétrica e calculada a taxa de retorno do investimento do projeto.

As etapas deste trabalho estão apresentadas na figura 9.

Figura 9. Metodologia do trabalho.



4 RESULTADOS: PROJETO DE USO DE AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR PARA BANHO DE NEUTRALIZAÇÃO DE FIO MÁQUINA

4.1 A INSTALAÇÃO DE DECAPAGEM

4.1.1 Histórico

A Unidade Siderúrgica em estudo entrou em operação em 1973. A produção de fio máquina, incluindo o processo de decapagem deste produto, iniciou no ano de 1975 e operou até o ano de 2014.

O fio máquina é um produto obtido por laminação a quente de tarugos e possui seção transversal circular de diferentes diâmetros. Normalmente é um produto fornecido na forma de bobinas. É utilizado em geral para produção de arames ou barras nas trefilarias.

O aquecimento dos banhos de decapagem de fio máquina sempre foi obtido através do uso de vapor a 8 Kg/cm^2 e 180°C , fornecido por outra empresa situada nas proximidades. Os tanques que necessitavam aquecimento possuíam serpentinas de aço inox 310 com 06 polegadas de diâmetro.

A partir de 2014, por questões de mercado, não foi mais produzido fio máquina nesta unidade. O processo de decapagem parou de ser utilizado, porém as instalações foram mantidas em seu local original.

No ano de 2016 a empresa que fornecia o vapor foi desativada. A Unidade Siderúrgica chegou a contar com um sistema próprio de geração de vapor para outros processos que não a decapagem. No entanto, este sistema de geração de vapor está sendo desativado por questões de segurança, motivo pelo qual esta utilidade, vapor, não está mais disponível.

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. Tendo em vista que não há mais disponibilidade de vapor para aquecimento dos banhos, 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. Tendo em vista se tratar de uma atividade industrial, que possui

processo contínuo de produção e que requer disponibilidade da fonte de aquecimento para isto, foi prevista a instalação de um sistema auxiliar de fornecimento de energia elétrica.

Adicionalmente à ideia de reduzir o consumo de energia elétrica, também é almejada uma valorização da unidade industrial pela iniciativa inovadora de viabilizar a utilização de uma energia alternativa em processos em que este uso ainda não é muito difundido.

Não foram identificados outros usos de energia solar em processos industriais na indústria siderúrgica no Brasil.

4.1.2 Descrição do processo de decapagem

O objetivo da decapagem é a remoção de produtos de corrosão formados sobre a superfície de metais. É um processo obrigatório na produção de fio máquina sendo uma etapa posterior à laminação a quente, que produz óxidos de elevada dureza. Caso estes óxidos não fossem removidos, provocariam desgaste excessivo durante o processo posterior de trefilação além de defeitos superficiais nos produtos.

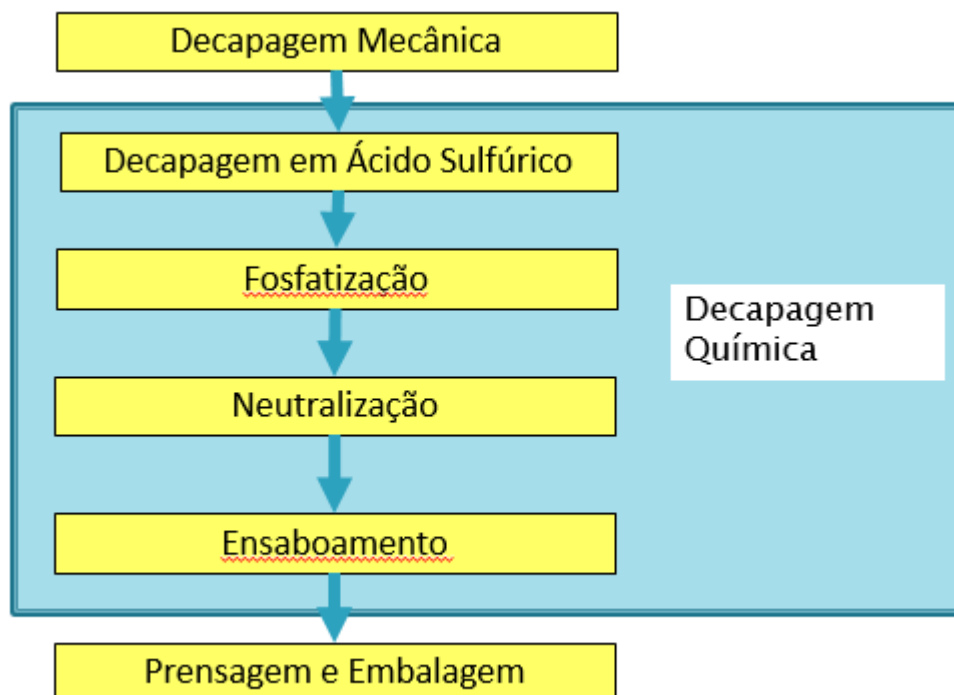
O processo de decapagem química do fio máquina na unidade siderúrgica, objeto deste trabalho, é realizado após a etapa de decapagem mecânica. A decapagem mecânica é obtida por jateamento com granalha de aço dos rolos de fio máquina e o jateamento é realizado no decapador mecânico.

O fluxo de tratamento químico mais usual 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) Decapagem em Ácido Sulfúrico;
- b) Fosfatização;
- c) Neutralização;
- d) Ensaboamento.

O fluxograma do processo de decapagem de fio máquina é apresentado na figura 10.

Figura 10. Fluxograma do processo de decapagem de fio máquina.



Na instalação em estudo, este processo era realizado utilizando-se banhos de ácido sulfúrico. O tanque utilizado possuía um volume útil de 21.770 L, e o banho tinha uma concentração de 12% de ácido sulfúrico.

Quando estava em operação, este tanque era aquecido a 70°C por vapor direto aplicado ao banho, ou seja, sem o uso de serpentina. O motivo de não ser utilizada serpentina era para permitir que a própria adição de vapor ao banho movimentasse continuamente o banho para mantê-lo homogêneo.

Após a decapagem com ácido sulfúrico ocorria a fosfatização, que é uma técnica de revestimento não metálico usado com a finalidade de adequar a superfície metálica ao uso, servindo de base para a pintura. A camada formada de fosfato (sal insolúvel do íon metálico) é o resultado da reação química entre uma solução ácida aquosa diluída, contendo metais solúveis, e um substrato metálico. Esta reação pode ser obtida de diferentes formas tais como: em sistema de imersão da peça na solução, aspersão (ação mecânica) da solução ou aplicação manual da solução no substrato a ser tratado.

Os objetivos da fosfatização são:

- a) Preparar o metal para receber e reter a pintura e proteger a superfície de corrosão entre o substrato e a pintura;

- b) Preparar a superfície metálica para receber agente adesivo tais como metal/borracha ou vários tipos de camadas plásticas existentes;
- c) Preparar o metal para sofrer deformações e para minimizar a fricção causada, agindo como base de aderência para os óleos e lubrificantes;
- d) Melhorar a resistência à corrosão de partes metálicas, aumentando a aderência de óleos e ceras protetivas.

Na instalação em estudo, a fosfatização era realizado utilizando-se um tanque com volume útil de 21.770 L a uma temperatura de 80°C.

Após a fosfatização, o fio máquina era encaminhado para um tanque de neutralização. Para isto, as bobinas fio de máquina eram imersas em uma solução de hidróxido de cálcio (Cal) diluído. A concentração da solução era mantida na faixa de 12 a 15 mg/L de CaO. Esta etapa era realizada em um tanque com volume de 27.666 L a uma temperatura de 50°C.

As bobinas eram então encaminhadas para a etapa de ensaboamento para preparar o material para o processo de trefilação. O sabão que ficava aderido às bobinas servia como lubrificante para a etapa de trefila. Para isto, as bobinas eram imersas em um tanque contendo 2,0 a 3,0% de sabão reativo de marca comercial misturado com água. Esta etapa era realizada em um tanque com volume de 7.630 L a uma temperatura de 90°C. Após esta etapa, as bobinas de fio máquina eram prensadas, embaladas, pesadas e disponibilizadas para expedição aos clientes.

4.2 SELEÇÃO DO BANHO DE REFERÊNCIA PARA O PROJETO

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 tanque foi selecionado tendo em vista que opera a temperatura mais baixa que os demais o que torna mais provável a viabilização de um projeto inicial de aproveitamento de energia solar.

Foram levantados ou definidos os seguintes itens em relação às instalações já existentes:

- a) Tanque do banho de neutralização com volume útil de 28.000 L (volume real é de 27.666 L) o que equivale a uma massa de 28.106 g de água;

- b) Dimensões do tanque do banho de neutralização: comprimento de 7,25 m, largura de 2,12 m e profundidade de 1,8 m. Com isto a área da superfície da água é de 15,37 m² e a área das laterais do tanque 33,73 m²;
- c) Temperatura de operação do banho de neutralização igual a 50°C;
- d) Atividade de tratamento de fio máquina prevista para ser realizada ao longo de todo o ano;
- e) A água a ser utilizada para abastecimento do tanque de neutralização será considerada a uma temperatura constante de 25°C;
- f) A temperatura ambiente no interior do prédio onde está instalado o banho de neutralização será considerado constante de 25°C;
- g) As bobinas em tratamento não demandam energia adicional para aquecimento no banho de neutralização, tendo em vista que anteriormente passam pelo banho de fosfatização que opera a uma temperatura superior (80°C) à do banho de neutralização (50°C);
- h) O tanque de neutralização não possui tampa de cobertura. As paredes laterais do tanque de neutralização tem uma camada isolante de 5,0 cm de poliuretano. As perdas de energia pelo fundo do tanque foram consideradas desprezíveis;
- i) Devido as perdas por arraste de água causada pela movimentação das bobinas estima-se a necessidade de reposição de 100 L de água por dia;
- j) Velocidade do vento no interior do prédio da decapagem de 0,1 m/s, que equivale a mínima movimentação de ar.

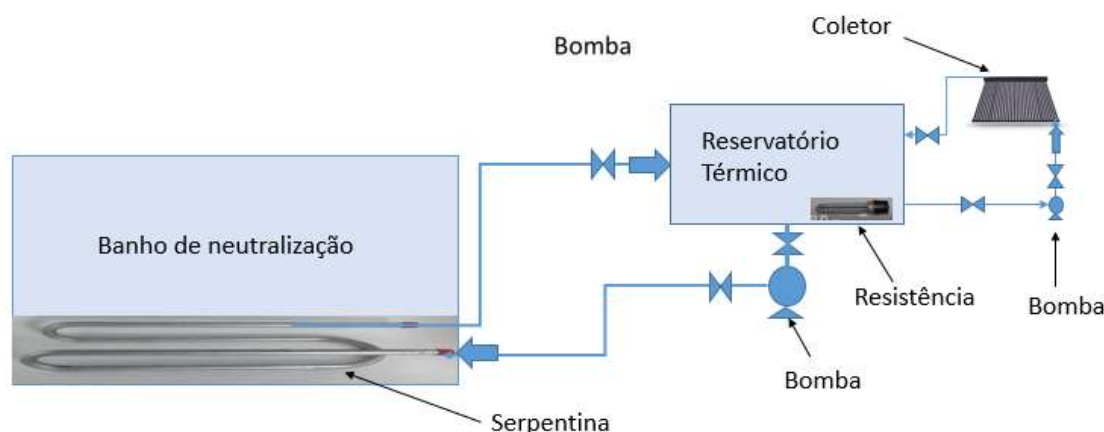
Adicionalmente foram considerados as seguintes instalações e parâmetros operacionais para o projeto:

- a) O sistema de aquecimento solar se baseará em coletores solares de tubos evacuados ligados a um tanque térmico com água mantida a temperatura mínima de 80°C;
- b) No interior do tanque térmico haverá uma resistência elétrica para suprir a energia necessária para manutenção da temperatura do banho de neutralização quando não houver disponibilidade suficiente de energia solar;
- c) Todo o tanque térmico e as linhas entre este tanque e o tanque de neutralização terão uma camada isolante de 5,0 cm de poliuretano;
- d) A transferência de calor para o banho de neutralização será realizada através de um circuito fechado em que água aquecida é bombeada do tanque térmico, passa por uma serpentina no interior do banho de neutralização e retorna para o tanque térmico;

- e) O dimensionamento do circuito de aquecimento considera um suprimento a 80°C e retorno a 65°C;
- f) Haverá operação contínua do banho de neutralização entre as 06:00 horas de cada segunda-feira até às 06:00 h do domingo seguinte;
- g) Entre 06:00 h e 08:00 h de cada domingo será trocada a água do banho de neutralização e recolocados os produtos de tratamento;
- h) Entre as 08:00 h de cada domingo e as 06:00 h da segunda-feira seguinte o banho será aquecido até a temperatura de operação;
- i) A energia necessária para o bombeamento entre o tanque térmico e o banho de neutralização não foi incluída no cálculo devido a que esta demanda será necessária independentemente da instalação ou não sistema de aquecimento solar.

Um fluxograma simplificado do sistema previsto neste trabalho está apresentado na figura 11.

Figura 11. Fluxograma simplificado do sistema de aquecimento previsto.



4.3 CÁLCULO DA DEMANDA DE ENERGIA NECESSÁRIA

O primeiro passo para dimensionamento de um sistema de aquecimento solar é o cálculo da energia necessária para a atividade em estudo. No processo, foco deste trabalho, foram identificadas duas demandas de energia durante os ciclos de operação:

- a) Q_A : Calor necessário para aquecimento inicial do banho de neutralização da temperatura da água de suprimento (25°C) até a temperatura de operação do banho (50°C). Este aquecimento será realizado semanalmente quando da troca total do banho devido a necessidades operacionais;

- b) POT_T : Potência para manutenção da temperatura do banho de neutralização em 50°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.

4.3.1 Cálculo de Q_A

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:

$$Q_A = m_T \cdot c \cdot (T_B - T_S) \quad 2$$

onde m_T é a massa do banho de neutralização (g), c é o calor específico da água (J/g °C), T_B é a temperatura do banho de neutralização (°C) e T_S é a temperatura de suprimento de água (°C).

Com o uso da equação 2, obtém-se que a quantidade de calor necessária para o aquecimento inicial do banho de neutralização, Q_A , é de 2.926 MJ, ou seja, 133 MJ a cada hora, considerando o tempo de 22 horas para aquecimento do tanque.

Não foram consideradas neste primeiro dimensionamento as perdas de energia por evaporação durante a fase de aquecimento.

4.3.2 Cálculo de POT_T

Após o aquecimento inicial do tanque é necessário repor continuamente uma quantidade de calor de modo que a temperatura do banho de neutralização seja mantida no valor desejado. A potência necessária para esta reposição é:

$$POT_T = POT_E + POT_L + POT_R + POT_C \quad 3$$

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

Tendo em vista que as perdas por evaporação (POT_E) sabidamente são as mais significativas em um tanque de água nas temperaturas utilizadas neste trabalho, foram verificadas duas referências para validar um valor a ser utilizado.

Segundo Smith, Löff e Jones (1994), o manual da ASHRAE apresenta a seguinte fórmula para determinar a taxa de evaporação:

$$E = \frac{(42,6 + 37,6 \cdot V)(P_W - P_{Amb})}{H_E} \quad 4$$

onde E é a taxa de evaporação ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), V é a velocidade do vento na superfície da água (m/s), P_W é a pressão de vapor saturado na temperatura da água (mm Hg), P_{Amb} é a pressão de vapor saturado no ponto de orvalho do ar ambiente (mm Hg) e H_E é o calor latente de evaporação da água na temperatura do tanque (kJ/kg).

Utilizando-se os valores de $0,1 \text{ m/s}$ para a velocidade do ar, $92,51$ e $19,23 \text{ mm Hg}$ para a pressão de vapor saturado na temperatura de água e no ponto de orvalho do ar ambiente respectivamente, $12,37 \text{ m}^2$ para a área superficial e $2.383 \text{ kJ}/\text{kg}$ para o calor latente de evaporação da água à temperatura do tanque, obtém-se uma taxa de evaporação E foi de $1,44 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.

Por sua vez, Shah, (2013) pelo uso de analogia entre transferência de calor e massa por convecção natural, derivou a seguinte fórmula para evaporação de piscinas não ocupadas:

$$E = 35 \cdot r_W \cdot (r_R - r_W)^{1/3} (S_W - S_A) \quad 5$$

onde r_w é a densidade do ar saturado a temperatura superficial da água (kg/m^3), r_R é a densidade do ar a temperatura e umidade da sala (kg/m^3), S_W é a umidade específica do ar saturado a temperatura da água ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg ar}$) e S_A é a umidade específica do ar a temperatura e umidade da sala ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg ar}$).

Considerando como $1,042$ e $1,180 \text{ kg}/\text{m}^3$ a densidade do ar saturado a superfície da água e na temperatura e umidade da sala respectivamente e $0,087$ e $0,014 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ de ar a umidade específica do ar saturado à temperatura da água e a umidade específica do ar na temperatura e umidade da sala, respectivamente, obtém-se um valor de E igual a $1,38 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ h}$, que é similar ao valor anteriormente calculado. Neste trabalho foi utilizado o valor mais conservador de $1,44 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.

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

$$POT_E = E \cdot A_s \cdot H_E \quad 6$$

onde A_s é a área da superfície da água (m^2).

Tendo em vista que a área da superfície do tanque é de $15,37 \text{ m}^2$ e o calor latente de evaporação da água na temperatura do tanque é de $2.383 \text{ kJ}/\text{kg}$ obtém-se que a perda total de água por evaporação é de $22,13 \text{ kg}/\text{h}$ e a necessidade de fornecimento de energia é de $52,74 \text{ MJ}/\text{h}$ para suprir este item.

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

$$POT_L = h_L \cdot A_L \cdot (T_B - T_{Amb}) \cdot 3600 \quad 7$$

$$h_L = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_I}} \quad 8$$

$$h_I = \frac{K}{L} \quad 9$$

$$h_c = 2,8 + 3,0 \cdot V \quad 10$$

onde h_L é o coeficiente de transferência de calor pelas laterais ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), h_I é o coeficiente de transferência de calor pelo isolamento ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_A é a temperatura no ambiente ($^\circ C$), A_L é a área das paredes laterais do tanque (m^2), K é a condutividade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$), V é a velocidade do vento (m/s) e L é a espessura do isolamento (m).

A equação 10 foi apresentada por Watmuff, Charters e Proctor⁵ (1977, apud Duffie, 2013). Neste trabalho está sendo considerada a utilização de isolamento de poliuretano ($K = 0,028 W/m$) com uma espessura de 0,05 m. Utilizando-se a velocidade de 0,1 m/s na equação 9, obtém-se um valor de h_c de 3,1 $W/m^2 \cdot ^\circ C$. Com isto, o h_I resulta em 0,56 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ e o h_L em 0,47 $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

A área lateral do tanque de neutralização é de 37,48 m^2 , o que numa taxa de fornecimento de 1,59 MJ/h para repor as perdas por convecção, POT_L .

A POT_r , considera a potência necessária para aquecer a água de reposição devido à evaporação e respingos causados pela movimentação das bobinas. Em visita técnica foi estimada uma perda de 100 L/dia, o que equivale a 4,17 kg/h, devido a respingos. Neste mesmo item já foi calculado que as perdas por evaporação serão de 22,13 kg/h. Isto totaliza um valor de 26,3 kg/h de água a ser aquecida. Utilizando-se a equação 2, obtém-se o valor de 2,73 MJ/h para POT_r .

Durante a realização das simulações utilizando a planilha gerada a partir do software Radiasol verificou-se que, se o tanque térmico tiver menos de 10 m^3 de volume, em alguns momentos de maior intensidade de radiação solar a temperatura da água neste tanque pode ultrapassar 100 $^\circ C$, o que causaria ebulição. Em vista disso utilizou-se um volume de 12 m^3 , com o que a temperatura máxima fornecida pelos cálculos foi de 96,5 $^\circ C$. Além disso, foi

⁵ WATMUFF, J. H.; CHARTERS, W. W. S.; PROCTOR, D. Solar and wind induced external coefficients: Solar collectors. *Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire*, [s. l.], v. 1, p. 56, 1977.

considerado que tanto o tanque térmico quanto as tubulações teriam um revestimento de poliuretano de 5 cm.

Considerando que o tanque térmico tenha as dimensões de 3 m de comprimento por 2 m de largura por 2 m de altura e que a tubulação de circulação tenha 30 m de comprimento com diâmetro de 4 pol, a área total sujeita a perda de calor neste sistema é de 41,57 m². Utilizando esta área, o valor de h_L será de 0,47 W/m².°C, e as temperaturas do líquido de 80°C e do ambiente 25°C na equação (7) obtém-se o valor de perda de energia de 3,86 MJ/h.

Somando-se os valores obtidos da perda de potência por evaporação, convecção no tanque de neutralização, para aquecimento da reposição de água e no tanque térmico e tubulações, obtém-se um total de 60,92 MJ/h como a potência necessária de ser suprida pelo sistema de aquecimento dos banhos de neutralização.

A figura 12 apresenta a consolidação das demandas de energia consideradas neste trabalho.

Figura 12. Demandas de energia consideradas no trabalho.

Demandas de Energia	
- Calor para aquecimento inicial do banho	$Q_A = 2.926,0 \text{ MJ}$
- Potência para manter temperatura do banho em 50°C	$POT_T = 60,9 \text{ MJ/h}$
$POT_T = POT_E + POT_L + POT_R + POT_C$	
$POT_E = 52,7 \text{ MJ/h}$	(Perdas por evaporação)
$POT_L = 1,6 \text{ MJ/h}$	(Perdas por convecção no Tanque)
$POT_R = 2,7 \text{ MJ/h}$	(Perdas para reposição água)
$POT_C = 3,9 \text{ MJ/h}$	(Perdas no tanque térmico e tubulações)

4.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR

4.4.1 Radiação solar disponível

Utilizando-se o Atlas de Radiação Solar do Brasil (Pereira et al., 2017) foi determinada a irradiação média diária do local em que está instalada a usina siderúrgica (latitude -29,77; longitude 51,540) conforme indicado na tabela 2.

Tabela 2. Irradiação média diária (Pereira et al., 2017).

Mês	Irradiação (kWh/m ² dia)
Janeiro	6,51
Fevereiro	5,9
Março	4,87
Abril	3,79
Mai	2,78
Junho	2,29
Julho	2,51
Agosto	3,19
Setembro	3,61
Outubro	4,83
Novembro	6,22
Dezembro	6,99

Com a longitude e latitude do local de interesse e inserindo-se a irradiação média mensal no software Radiasol, este fornece uma sequência de prováveis valores de irradiação total inclinada e temperatura para cada hora de um ano.

Estes dados foram transferidos para uma planilha Excel. A tabela gerada na planilha Excel possui um total de 3760 linhas. As primeiras 18 horas desta sequência são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Radiação inclinada e temperatura obtidos com o uso do Radiasol.

Ano	Mês	Dia	Hora	Radiação inclinada (W/m ²)	Temperatura °C
1	1	1	0	0	174
1	1	1	1	0	172
1	1	1	2	0	177
1	1	1	3	0	173
1	1	1	4	0	176
1	1	1	5	37	170
1	1	1	6	111	176
1	1	1	7	264	191
1	1	1	8	368	203
1	1	1	9	556	207
1	1	1	10	709	227
1	1	1	11	714	233
1	1	1	12	725	234
1	1	1	13	672	231
1	1	1	14	508	235
1	1	1	15	469	225
1	1	1	16	267	238
1	1	1	17	73	217
1	1	1	18	38	207

4.4.2 Dimensionamento preliminar do coletor solar

De modo a definir uma ordem de grandeza da área necessária de coletor solar, foi realizado um cálculo preliminar arbitrando valores iniciais de fração solar e eficiência utilizando a seguinte fórmula:

A área de coletor necessária pode ser calculada com a fórmula:

$$A_c = \frac{POT_T \cdot FS \cdot 24}{E_d \cdot \eta \cdot 3600 \cdot 1000} \quad 11$$

Onde, FS é a fração solar, A_c é a área do coletor solar, η é a eficiência do coletor e E_d é a irradiação média diária no plano inclinado (kWh/m² dia)

Conforme indicado em 2.2.1.4, Duffie e Beckman (2013), sugerem um valor de fração solar de 75%. Neste trabalho foi adotado inicialmente o valor de 60% para este parâmetro. Usando como referência a curva de Tubos Evacuados apresentada na figura 8, foi considerado um valor inicial de eficiência do coletor de 0,65. A estimativa inicial de área necessária foi calculada com a equação. A planilha gerada pelo Radiasol com os valores da tabela 2 fornece, entre outros dados, a irradiação horária no plano inclinado, conforme indicado na tabela 3. A média diária destes valores foram calculados como sendo 4,61 kWh/m² dia.

O valor da potência média necessária para manter o banho de neutralização aquecido (POT_T), foi calculado no item 4.3.2 como sendo 60,92 MJ/h.

Com as definições acima o coletor deveria ter uma área de 81,32 m².

4.4.3 Seleção do coletor solar

Para este trabalho foi usado como referência um coletor da marca Apricus com as seguintes características, conforme fornecido pelo fabricante:

Modelo: ETC -30 (30 tubos a vácuo)

Área do Absorvedor: 2,4 m²

$F_R(\tau\alpha) = \eta_0 = 0,845$

$a = 1,47$

$b = 0,01$

onde $FR(\tau\alpha)$, “a” e “b”, são parâmetros utilizados no cálculo da eficiência dos coletores solares (Equação 1).

Com esta seleção o valor da área de absorvedor a ser utilizada neste trabalho seria 81,6 m², o que indicaria um total de 34 conjuntos de tubos.

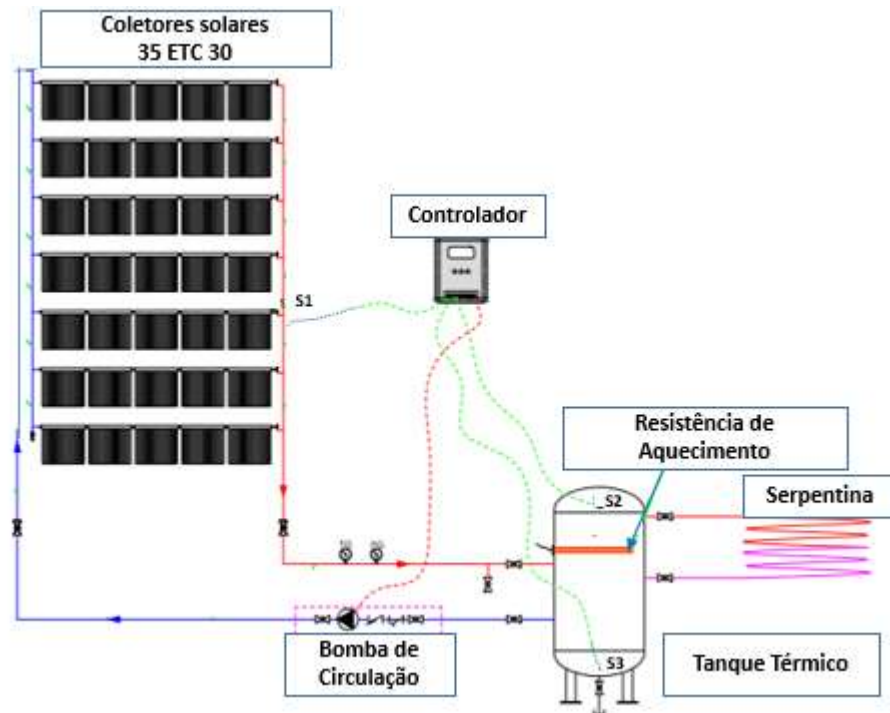
Em tratativas realizadas com o fornecedor dos coletores solares (Song, 2017) definiu-se utilizar um arranjo com 7 filas de 5 conjuntos de tubos em cada fila, totalizando 35 conjuntos de tubos. Neste arranjo, a área total de absorção é 84,0 m². Este valor também foi inserido na tabela Excel (tabela 4).

Tabela 4. Valor de área de coletor solar inserido na tabela Excel.

Ano	Mês	Dia	Hora	Radiação inclinada (W/m ²)	Temperatura °C	Área do coletor
1	1	1	0	0	174	84
1	1	1	1	0	172	84
1	1	1	2	0	177	84
1	1	1	3	0	173	84
1	1	1	4	0	176	84
1	1	1	5	37	170	84
1	1	1	6	111	176	84
1	1	1	7	264	191	84
1	1	1	8	368	203	84
1	1	1	9	556	207	84
1	1	1	10	709	227	84
1	1	1	11	714	233	84
1	1	1	12	725	234	84
1	1	1	13	672	231	84
1	1	1	14	508	235	84
1	1	1	15	469	225	84
1	1	1	16	267	238	84
1	1	1	17	73	217	84
1	1	1	18	38	207	84

Adicionalmente, devido a significativa perda de carga decorrente da grande quantidade de equipamentos o sistema conta com uma bomba de circulação de água entre o tanque térmico e o conjunto de tubos coletores. Também foi considerada a utilização de um sistema de controle de temperatura e fluxo. A figura 13 apresenta o arranjo previsto.

Figura 13. Arranjo do sistema de aquecimento solar.



Fonte: Adaptado de Song (2017).

4.4.4 Cálculo da eficiência horária do coletor

O cálculo da eficiência horária foi realizado com o uso da equação 1.

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, associada a cada dado de radiação horária.

A temperatura de entrada dos coletores solares será a temperatura da água que estiver no tanque térmico. No início da operação a temperatura no tanque térmico será de 80 °C. Este valor é utilizado até o momento em que a energia absorvida é superior à demanda para manutenção da temperatura do tanque. A amostra dos 18 primeiros dados calculados de eficiência é apresentada na tabela 5.

Tabela 5. Valores de eficiência dos coletores solares na tabela Excel.

Ano	Mês	Dia	Hora	Radiação inclinada (W/m ²)	Temperatura °C	Área do coletor	Eficiência
1	1	1	0	0	174	84	
1	1	1	1	0	172	84	
1	1	1	2	0	177	84	
1	1	1	3	0	173	84	
1	1	1	4	0	176	84	
1	1	1	5	37	170	84	
1	1	1	6	111	176	84	0,2154
1	1	1	7	264	191	84	0,5054
1	1	1	8	368	203	84	0,6063
1	1	1	9	556	207	84	0,6881
1	1	1	10	709	227	84	0,7261
1	1	1	11	714	233	84	0,7282
1	1	1	12	725	234	84	0,7302
1	1	1	13	672	231	84	0,7205
1	1	1	14	508	235	84	0,6814
1	1	1	15	469	225	84	0,6646
1	1	1	16	267	238	84	0,5351
1	1	1	17	73	217	84	
1	1	1	18	38	207	84	

4.4.5 Cálculo da energia necessária por hora e total do ano

Na planilha Excel gerada pelo software Radiasol, foi inserida a energia necessária em cada hora do ano, conforme segue:

- No período das 06:00 h às 08:00 h de cada domingo foi considerado sem consumo de energia tendo em vista que neste espaço de tempo será realizada a substituição da água e produtos necessários para o banho de neutralização;
- No período das 08:00 h de cada domingo até às 06:00 h de cada segunda-feira seguinte uma potência de 133,0 MJ/h, para suprir a energia para aquecer o banho de 25°C até 80°C, conforme calculado no item 4.3.1;
- No período das 06:00 h de cada segunda-feira até às 06:00 h de cada domingo seguinte uma potência de 60,92 MJ/h para manter a temperatura do banho em 50°C, conforme calculado no item 4.3.2;
- Foi considerado que o sistema começa a ser utilizado, com o banho já previamente aquecido, à 00:00 h do dia 01 de janeiro de 2018, que é uma segunda feira.

A amostra dos 18 primeiros valores de potência necessária para manutenção da temperatura do banho de neutralização é apresentada na tabela 6.

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

4.4.6 Cálculo da energia solar convertida no coletor por hora e durante o ano

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

$$POT_A = G_I \cdot \eta \cdot A_C \quad 12$$

onde POT_A é a potência convertida (MJ/h) e A_C é a área do coletor (m^2) e G_I é a irradiação inclinada (W/m^2)

A equação 12 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% do total de energia necessária para esta operação.

A amostra dos 18 primeiros valores de calor absorvido nos coletores solares é apresentada na tabela 6.

Tabela 6. Valores de calor absorvido nos coletores e potência necessária.

Ano	Mês	Dia	Hora	Radiação inclinada (W/m^2)	Temperatura $^{\circ}C$	Área do coletor	Eficiência	Calor absorvido (MJ/h)	Potência necessária (MJ/h)
1	1	1	0	0	174	84			60,06
1	1	1	1	0	172	84			60,06
1	1	1	2	0	177	84			60,06
1	1	1	3	0	173	84			60,06
1	1	1	4	0	176	84			60,06
1	1	1	5	37	170	84			60,06
1	1	1	6	111	176	84	0,2154	7,23	60,06
1	1	1	7	264	191	84	0,5054	40,35	60,06
1	1	1	8	368	203	84	0,6063	67,47	60,06
1	1	1	9	556	207	84	0,6881	115,69	60,06
1	1	1	10	709	227	84	0,7261	155,68	60,06
1	1	1	11	714	233	84	0,7282	157,23	60,06
1	1	1	12	725	234	84	0,7302	160,08	60,06
1	1	1	13	672	231	84	0,7205	146,41	60,06
1	1	1	14	508	235	84	0,6814	104,67	60,06
1	1	1	15	469	225	84	0,6646	94,26	60,06
1	1	1	16	267	238	84	0,5351	43,21	60,06
1	1	1	17	73	217	84			60,06
1	1	1	18	38	207	84			60,06

4.4.7 Cálculo da temperatura no tanque térmico

A temperatura do tanque térmico foi calculada para cada hora utilizando a Equação 2, considerando que a resistência elétrica sempre fornecerá energia complementar quando a temperatura estiver abaixo de 80°C. Quando a radiação horária ultrapassar a demanda para suprir a necessidade de energia total calculada, ocorrerá um acúmulo de energia e consequentemente a temperatura da água neste tanque aumentará. Este aumento de temperatura foi calculado para cada hora com o uso da equação 2.

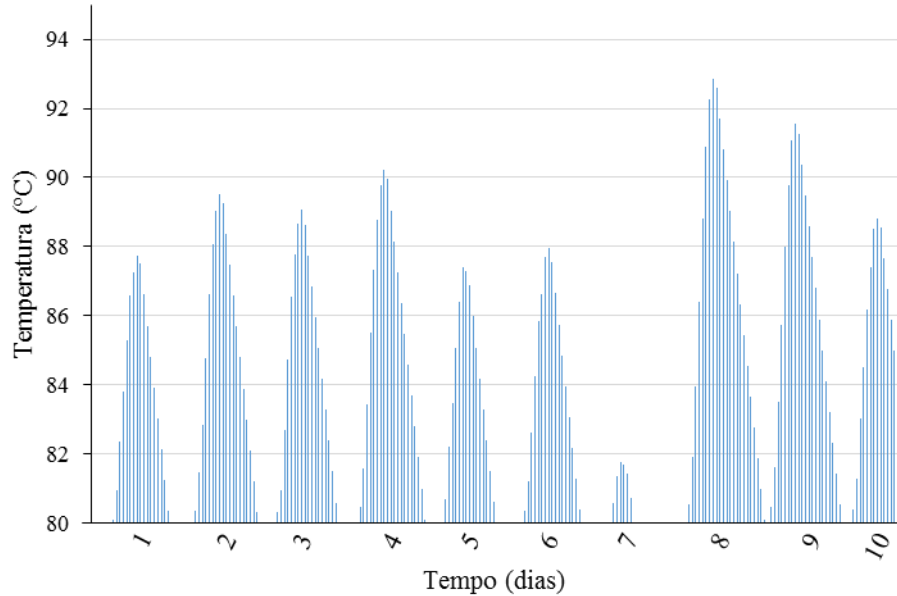
A amostra dos 18 primeiros valores de acúmulo horário de energia e temperatura no tanque de neutralização é apresentada na tabela 7.

Tabela 7. Valores de acúmulo de energia e temperatura no tanque de neutralização.

Ano	Mês	Dia	Hora	Radiação inclinada (W/m ²)	Temperatura °C	Eficiência	Área do coletor	Calor absorvido (MJ/h)	Potência necessária (MJ/h)	Fonte Externa (MJ/h)	Acúmulo (MJ)	T
1	1	1	0	0	174		84		60,06	-60,06	0,0	80,0
1	1	1	1	0	172		84		60,06	-60,06	0,0	80,0
1	1	1	2	0	177		84		60,06	-60,06	0,0	80,0
1	1	1	3	0	173		84		60,06	-60,06	0,0	80,0
1	1	1	4	0	176		84		60,06	-60,06	0,0	80,0
1	1	1	5	37	170		84		60,06	-60,06	0,0	80,0
1	1	1	6	111	176	0,2154	84	7,23	60,06	-52,83	0,0	80,0
1	1	1	7	264	191	0,5054	84	40,35	60,06	-19,71	0,0	80,0
1	1	1	8	368	203	0,6063	84	67,47	60,06		7,4	80,11
1	1	1	9	556	207	0,6881	84	115,69	60,06		63,0	80,94
1	1	1	10	709	227	0,7261	84	155,68	60,06		158,7	82,36
1	1	1	11	714	233	0,7282	84	157,23	60,06		255,8	83,81
1	1	1	12	725	234	0,7302	84	160,08	60,06		355,9	85,30
1	1	1	13	672	231	0,7205	84	146,41	60,06		442,2	86,58
1	1	1	14	508	235	0,6814	84	104,67	60,06		486,8	87,24
1	1	1	15	469	225	0,6646	84	94,26	60,06		521,0	87,75
1	1	1	16	267	238	0,5351	84	43,21	60,06		504,2	87,50
1	1	1	17	73	217		84		60,06		444,1	86,61
1	1	1	18	38	207		84		60,06		384,0	85,71

Estes valores variaram ao longo do tempo entre 80,0°C e 96,5°C. Na figura 14 estão apresentados os valores de temperatura ao longo dos dez primeiros dias de operação.

Figura 14. Variação de temperatura no tanque térmico.



Pode-se observar uma variação da temperatura máxima da água em cada dia. Em geral isto é decorrente da variação natural da irradiação incidente. Em especial, no dia 07, a variação foi mais significativa porque corresponde a um domingo, dia em que ocorre a troca da solução de banho no tanque de neutralização.

4.4.8 Cálculo da serpentina de aquecimento

A área de troca térmica necessária para realizar a transferência de calor entre fluidos quente e frio num trocador de calor pode ser calculada com:

$$A_{te} = \frac{Q}{U \cdot (T_Q - T_F)} \quad 13$$

onde Q é a taxa global de transferência de calor (W), U é o coeficiente global de transferência de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A_{te} é a área de troca de calor da superfície externa dos tubos (m^2), T_Q é a temperatura do fluido quente ($^\circ C$) e T_F é a temperatura do fluido frio ($^\circ C$).

Perry, Green e Maloney (1997) fornecem a faixa de 105 a 180 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ como referência para o coeficiente global de transferência de calor para serpentinas de cobre imersas em água e com água igualmente circulando em seu interior. Para este trabalho foi usado o valor de 140 $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Considerando que a potência necessária no momento de maior demanda, que é a fase de aquecimento do banho de neutralização, é 133 MJ/h, que a temperatura no banho é de 50°C e a temperatura da água circulando na serpentina é de 80°C, obtém-se que a área de troca térmica necessária é de 8,59 m².

O comprimento da tubulação a ser utilizada pode ser calculado pela fórmula

$$L = \frac{A_{te}}{\pi \cdot D} \quad 14$$

onde D é o tubo externo do tubo (m).

Considerando o uso de tubos de cobre de 54 mm obtém-se que serão necessários 50,7 m de tubulação.

Tendo em vista que o tanque de neutralização tem um comprimento de 7,25 m, seria viável dimensionar uma serpentina com 7 passes para obter a transferência de calor necessária para o processo estudado.

4.4.9 Definição da potência de resistência elétrica de aquecimento

O período com maior demanda de energia a ser fornecida pela resistência elétrica será durante a fase de aquecimento do banho de neutralização aos domingos. Neste período a demanda será de 133 MJ/h. Esta demanda pode ser atendida com uma resistência elétrica que fornece uma potência de 36,9 kW. Considerando a conveniência de assegurar um fator de segurança no cálculo deste item crítico para a operação do sistema foi definido o uso de uma resistência elétrica com potência de 40,0 kW.

4.4.10 Cálculo do gasto para instalar o sistema de aquecimento a energia solar

Um conjunto de tubos e conexões Apricus ETC 30, conforme informação do fabricante recebida de Song (2017) custa na origem (China) US\$ 546,00. No item 4.4.3, foi definido o uso de 35 destes conjuntos o que totaliza US\$ 19.110,00.

Na mesma informação de um representante do fabricante, Song (2017), os demais itens necessários para instalação foram orçados em US\$ 4.416,00. Nestes itens estão incluídos os apoios para os conjuntos coletores, 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.

Somando o valor dos coletores com os demais acessórios, o custo total dos materiais do sistema de aquecimento solar foi orçado em US\$ 23.526,00 pelo fabricante (preço na origem).

Conforme consulta realizada em site de afretamento marítimo (Cheap2Ship, 2017) o valor do frete foi orçado em US\$ 1.500.

Com isto o valor aduaneiro (materiais mais despesas de transporte) que serve como base para o cálculo de impostos fica sendo US\$ 25.026,00.

Foram considerados neste trabalho os seguintes impostos federais para a importação do produto, fornecidos pelo simulador do tratamento tributário e administrativo das importações da Receita Federal e aplicado sobre o valor aduaneiro:

Imposto de importação = 20%

PIS = 2,1%

COFINS = 10,65%

Também foi considerado o ICMS com alíquota de 18% aplicada sobre o valor total da mercadoria, ou seja, dividindo por 0,82 o resultado do valor aduaneiro acrescido dos impostos federais.

Foi considerado gasto adicional de 20% para as despesas de projeto e instalação dos equipamentos, com o que o resultado de custo do sistema de aquecimento solar instalado atingiria um valor de R\$ 157.880,00.

Ressalta-se que, como o objetivo deste trabalho foi verificar a viabilidade de suprir parte da demanda de energia com o uso de um conjunto de coletores solares, não foram computados os gastos que seriam necessários mesmo no caso de uso exclusivo de energia elétrica. Entre estes gastos não computados pode-se citar o tanque térmico, a resistência de aquecimento, a serpentina do tanque de neutralização e as tubulações entre o tanque térmico e o tanque de neutralização

4.4.11 Cálculo da taxa de retorno anual do sistema de aquecimento a energia solar

Foi realizada uma simulação de sensibilidade da taxa de retorno anual pelo uso do sistema de aquecimento de água por coletores solares em relação ao custo da energia elétrica.

A fórmula usada para o cálculo da taxa de retorno foi:

$$VPL = Investimento\ inicial + \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} \quad 15$$

onde *VPL* é o valor presente líquido, *N* é o número de períodos (parcelas), *F_t* é a economia obtida em cada período (fluxo no tempo *t*), *t* é o número sequencial de períodos (parcelas), *TIR* é a taxa interna de retorno.

Nos cálculos foram feitas as seguintes considerações:

- Para obter a taxa interna de retorno: $VPL = 0$;
- A energia anual absorvida pelo sistema é de 326,08 GJ ou seja 90.560 MWh, conforme calculado no item 4.3.2;
- 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 foram feitas simulações com valores variando entre R\$ 0,20/kWh e R\$ 0,388/kWh.

Os Resultados da simulação de sensibilidade da taxa de retorno anual estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8. Taxa de retorno anual.

Custo total (R\$)	Energia convertida (kWh/ano)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Economia (R\$/ano)	Tempo (anos)	Taxa de retorno anual (%)
PV	-	-	PMT	n	i
157.880,00	90.560,00	0,388	35.137,28	10	24,7
		0,300	27.168,00		14,76
		0,250	22.640,00		9,08
		0,200	18.112,00		3,19
157.880,00	90.560,00	0,388	35.137,00	20	28,37
		0,300	27.128,00		20,14
		0,250	22.640,00		15,69
		0,200	18.112,00		11,24

PV = Valor Presente

PMT = Valor da Parcela

Os valores obtidos da economia anual se situam numa faixa entre R\$ 18.112,00 e R\$ 35.137,28. A tabela indica que, considerando um período de 10 anos, haverá uma taxa de retorno adequada, acima de 14,0% ao ano, caso o custo de energia seja igual ou superior a R\$ 0,30/kWh. Para um período de 20 anos, haverá uma taxa de retorno anual acima de 14% ao ano, já a partir de um custo de energia elétrica igual ou superior a R\$ 0,25/kWh.

Além do potencial de redução de custo no suprimento da energia necessária para o aquecimento da água do tanque de neutralização, a empresa terá um ganho na imagem de sustentabilidade, por estar incentivando o uso de uma energia renovável e de baixo impacto ambiental.

Adicionalmente, o fato de viabilizar o uso da energia solar em um projeto de escala reduzida permitirá que a empresa adquira familiaridade com a tecnologia e identifique outros potenciais usos que poderão se tornar significativos e até estratégicos em um futuro próximo.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho confirmou a possibilidade técnica 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 por energia solar captada pelo uso de coletores solares de tubo evacuado. O restante da energia poderia ser fornecido por fonte auxiliar, que neste caso foi o uso de resistência elétrica instalada no tanque térmico do sistema de aquecimento solar.

Quanto à questão econômica, considerando um período de 10 anos, haverá uma taxa de retorno adequada, acima de 14,0% ao ano, caso o custo de energia seja igual ou superior a R\$ 0,30/kWh. Para um período de 20 anos, haverá uma taxa de retorno acima de 14% ao ano, já a partir de um custo de energia elétrica igual ou superior a R\$ 0,25/kWh.

Ao optar por implantar este projeto a empresa poderá dar um passo significativo para o domínio da tecnologia de uso de energia solar e ser incentivada a ampliar o uso deste tipo de sistemas de aquecimento para aumentar sua segurança energética.

Adicionalmente, o potencial usuário poderá também considerar benefícios adicionais de imagem pelo uso de energia renovável e a redução de dependência de energia externa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foram identificadas as seguintes oportunidades de trabalhos complementares em relação à esta dissertação:

- a) Instalar coletores solares diretamente na linha de circulação de água entre os tanques de neutralização e térmico. Como neste caso a temperatura da água de entrada dos coletores é significativamente menor do que a considerada neste trabalho seria obtida uma maior eficiência de coleta de energia.
- b) Refinar o cálculo da serpentina de aquecimento do tanque de neutralização para verificar se é possível que a temperatura de armazenamento de água no tanque térmico possa ser reduzida para 70 ou 75°C. Com isto pode ser viável que o tanque térmico tenha menores dimensões, sem que a temperatura ultrapasse os 100°C nos momentos de maior insolação.
- c) Calcular a taxa de retorno do projeto se a alternativa fosse o uso de gás natural ou GLP ao invés da energia elétrica.
- d) Avaliar o uso da energia solar para aquecimento dos demais tanques da área de tratamento fio de máquina.
- e) Avaliar o uso da energia solar para aquecimento de água no refeitório industrial e vestiários.
- f) Avaliar viabilidade técnica e econômica de instalação de tampa para cobrir o tanque de neutralização.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APRICUS SOLAR CO. LTD. **Apricus - Solar Hot Water Solutions by Apricus**. 2003.

Disponível em: <<http://www.apricus.com/>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

AQUAKENT. **Curvas de eficiência de coletores solares**. 2015. Disponível em:

<<http://www.aquakent.com.br/>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

ANEEL. **Relatórios aneel**, acesso em 2018, disponível em:

[http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=ANO 2017](http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=ANO%202017)

ASHRAE. **ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment**. New York, NY:

ASHRAE, 2016. v. 1

CHEAP2SHIP. **Cheap2Ship - Frete internacional descomplicado!** 2017. Disponível em:

<<https://cheap2ship.com/pre-auction/maritime>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

DI LALLA, N. Cocina solar de alto rendimiento con aplicación de tubo evacuado selectivo y concentrador CPC. **Avances en energías renovables y medio ambiente**, [s. l.], v. 15, p. 309–315, 2011.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**.

Fourth Ed. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118671603>>

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016 - Ano Base 2015 [Statistical Yearbook of Electrical Energy 2016 - 2015 baseline year]**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuário%20Estatístico%20de%20Energia%20Elétrica%202016.pdf)>. Acesso em: 21 abr. 2018.

FARJANA, Shahjadi Hisan et al. Solar process heat in industrial systems – A global review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], 2017. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117312108>>

KRENZINGER, A.; BUGS, R. C. Radiasol2: Software para sintetizar dados de radiação solar.

In: (APES et al., Eds.)IV CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE ENERGIA SOLAR E XVII SIMPÓSIO PERUANO DE ENERGIA SOLAR 2010, Cusco. **Anais...** Cusco

- KUMAR, Anil; PRAKASH, Om; KAVITI, Ajay Kumar. A comprehensive review of Scheffler solar collector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 77, p. 890–898, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117303751>>
- LAFAY, Jean-Marc Stephane. **Análise energética de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás**. 2005. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5911>>. Acesso em: 18 abr. 2018.
- LAUTERBACH, C. et al. The potential of solar heat for industrial processes in Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 5121–5130, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112003073>>
- LI, Zhiyong et al. All-glass vacuum tube collector heat transfer model used in forced-circulation solar water heating system. **Solar Energy**, [s. l.], v. 84, n. 8, p. 1413–1421, 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X10001829>>
- MANEA, TF. **Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo**. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/56592>>. Acesso em: 18 abr. 2018.
- MORRISON, G. L.; BUDIHardjo, I.; BEHNIA, M. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. **Solar Energy**, [s. l.], v. 76, n. 1–3, p. 135–140, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-49KGVC3-1/2/b918fce47fd8bdc2612b1b14734f3eb8>>
- PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. ed. São José dos Campos: DMA, 2017. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2018.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7, ilustra. ed. Oklahoma: McGraw-Hill Education, 1997. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed027p533.1%5Cnhttp://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?ouvrage=1037804>>
- POTTMAIER, D.; MELO, C.R.; SARTOR, M.N.; KUESTER, S., AMADIO, T. M.; FERNANDES, C.A.H.; MARINHA, D.; ALARCON, O.E.. The Brazilian energy matrix: From a materials science and engineering perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 19, p. 678–691, 2013. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112006776>>

ROSA, Fabio Niemezewski Da. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/62073>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

SHAH, M. **New Correlation for Prediction of Evaporation from Occupied Swimming Pools (DE-13-040)**. [s.l: s.n.]. v. 119

SHARMA, Ashish K. et al. Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 78, p. 124–137, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117305610>>

SHARMA, S. D. et al. Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. **Solar Energy**, [s. l.], v. 78, n. 3, p. 416–426, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04001987>>

SMITH, Charles C.; LÖF, George; JONES, Randy. Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool. **Solar Energy**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 3–7, 1994.

SONG, Jason. **Quotation of ETC-30 Apricius (mensagem pessoal)**, 2017. Disponível em: <luiz.bodanese@hotmail.com>

SURESH, N. S.; RAO, Badri S. Solar energy for process heating: A case study of select Indian industries. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 151, p. 439–451, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261730416X>>

WATMUFF, J. H.; CHARTERS, W. W. S.; PROCTOR, D. Solar and wind induced external coefficients: Solar collectors. **Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire**, [s. l.], v. 1, p. 56, 1977.