



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RENATO ARAUJO DE MELO

**COMPARAÇÃO DE SISTEMA SOLAR RESIDENCIAL PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA QUANTO AO TIPO DE CIRCULAÇÃO.**

Recife
2019

RENATO ARAUJO DE MELO

**COMPARAÇÃO DE SISTEMA SOLAR RESIDENCIAL PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA QUANTO AO TIPO DE CIRCULAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Costa de Araujo.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M528c	<p>Melo, Renato Araujo de. Comparação de sistema solar residencial para aquecimento de água quanto ao tipo de circulação / Renato Araujo de Melo. – 2019. 76 folhas, il., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcus Costa de Araujo. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, 2019. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia Mecânica. 2. Energia Solar. 3. Coletor Solar. 4. Comparação. 5. Circulação de água. I. Araujo, Marcus Costa de. (Orientador). II. Título.</p>	
		UFPE
	621 CDD (22. ed.)	BCTG/2019-258

RENATO ARAUJO DE MELO

**COMPARAÇÃO DE SISTEMA SOLAR RESIDENCIAL PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA QUANTO AO TIPO DE CIRCULAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 04 / 07/ 2019.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcus Costa de Araujo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno de Figueiredo (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Claudino de Lira Junior (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Diante da crescente preocupação com a preservação do meio ambiente através do desenvolvimento econômico sustentável e considerando o grande potencial de energia solar do Brasil, este trabalho apresenta e discute aspectos relacionados ao uso e funcionamento de sistemas solares residenciais de aquecimento de água. Especificamente, busca-se analisar a influência do tipo de circulação de água pelo coletor solar adotada, podendo ser natural ou forçada, na operação do sistema. É desenvolvido um modelo matemático para representar o comportamento do sistema diante de variáveis relativas a aspectos construtivos e a condições de operação ao longo de um dia, a partir do qual são obtidos resultados com os quais se verifica o atendimento ou não de uma demanda energética estabelecida. É constatado que se pode observar diferenças pontuais na operação do sistema com as diferentes configurações quanto à circulação de água pelo coletor solar. Apesar disso, de modo geral, ambos os sistemas apresentam efetividade similar, sendo pequena a diferença na quantidade de energia útil obtida ao final do dia. Diante desses resultados, são feitas considerações a respeito do nível de complexidade das configurações comparadas e da influência das condições de operação do sistema em geral em seu funcionamento, visando proporcionar uma melhor compreensão acerca da viabilidade desse tipo de sistema.

Palavras-chave: Energia solar. Coletor solar. Comparação. Circulação de água.

ABSTRACT

In face of the rising concerns regarding environmental problems expressed through a push for sustainable economic development and considering Brazil's large solar energy potential, this work proposes and discusses aspects related to the usage and behavior of residential solar water heating systems. More specifically, an effort is made to analyze the influence of the type of water circulation, either natural or forced, taking place in the solar collector in the behavior of the system. A mathematical model is developed to represent the behavior of the system against numerous variables related to constructive aspects and operating conditions along the day, from which results are obtained and compared to an established energy demand. Occasional differences are observed in the results produced by the operation of the system with different configurations regarding the water circulation through the solar collector. Despite these differences, however, both configurations show similar effectiveness, with the difference in total useful energy generation by the end of the day being minimal. Upon these results, considerations are made concerning the complexity level of the system when featuring each circulation configuration compared and the influence of external operating conditions on its performance, in order to allow for a better understanding of this kind of system's viability.

Keywords: Comparative. Solar energy. Solar collector. Water circulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nível de irradiação global no Brasil, Média anual	14
Figura 2 - Distribuição do consumo de energia elétrica por setor em Gigawatt-hora.....	15
Figura 3 - Ilustração de Aquecedor Solar	20
Figura 4 - Fenômeno do termossifão	21
Figura 5 - Aquecedor solar com circulação forçada.....	22
Figura 6 - Ilustração do aquecedor solar de baixo custo	23
Figura 7 - Coletor solar de mangueira	24
Figura 8 - Coletor solar metálico com superfície de vidro	25
Figura 9 - Coletor solar a vácuo	25
Figura 10 - Ilustração do fluxo térmico em uma placa plana.	27
Figura 11 - Ilustração do modelo de coletor solar	31
Figura 12 - Circuito térmico do coletor solar	33
Figura 13 - Parâmetros construtivos do coletor, placa absorvedora e tubulação	39
Figura 14 - Representação do reservatório	43
Figura 15 - Fluxograma de cálculos	46
Figura 16 - Valores para irradiação incidente, dia típico	49
Figura 17 - Valores da variação anual da irradiação solar	50
Figura 18 - Ilustração do modelo de coletor solar	51
Figura 19 - Circuito térmico do coletor solar considerado	52
Figura 20 - Circuito térmico no reservatório	59
Figura 21 - Fluxo de água no coletor em circulação natural	63
Figura 22 - Fator de remoção de calor do coletor x fluxo de água. Circulação forçada	64
Figura 23 - Energia útil adicionada ao reservatório. Circulação Natural x Circulação Forçada	65
Figura 24 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada.	67
Figura 25 - Fluxo mássico de água pelo coletor solar. Sistema em circulação natural. Cenário desfavorável.....	69
Figura 26 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada. Cenário desfavorável.	69

Figura 27 - Energia útil adicionada ao reservatório. Comparativo com diferentes valores de fluxo mássico em circulação forçada.....	70
Figura 28 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo com diferentes valores de fluxo mássico em circulação forçada.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial energético teórico, extraível e tecnicamente acessível no mundo e nos Estado Unidos.....	12
Tabela 2 - Referência de consumo para uso racional de água quente	47
Tabela 3 - Características do coletor solar.....	51
Tabela 4 - Variáveis Intermediárias.....	62
Tabela 5 - Energia útil (kJ) adicionada ao reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada.....	66
Tabela 6 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	ENERGIA SOLAR	18
2.1.1	Histórico De Utilização	18
2.1.2	Disponibilidade.....	19
2.1.3	Aquecimento Solar De Água.....	20
2.2	PROCESSOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR	26
2.2.1	Condução	26
2.2.2	Convecção	28
2.2.3	Radiação	29
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECEDOR SOLAR	30
2.3.1	Coletor Solar.....	30
2.3.2	Reservatório.....	42
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	MODELAGEM DO AQUECEDOR SOLAR.....	45
3.1.1	Demanda De Água Quente	47
3.1.2	Energia Solar Incidente	48
3.1.3	Coletor Solar.....	50
3.1.3.1	<i>Coefficiente De Transmissão De Calor Das Perdas</i>	<i>52</i>
3.1.3.2	<i>Fator De Remoção De Calor Do Coletor</i>	<i>55</i>
3.1.3.3	<i>Fluxo No Coletor.....</i>	<i>56</i>
3.1.3.4	<i>Energia Útil Absorvida.....</i>	<i>57</i>
3.1.4	Reservatório De Água Quente	57

4	RESULTADOS	62
4.1	CIRCULAÇÃO DE FLUIDO NO COLETOR SOLAR.....	63
4.2	ENERGIA ÚTIL DO SISTEMA.....	65
4.3	TEMPERATURA DA ÁGUA ARMAZENADA NO RESERVATÓRIO.....	67
4.4	ANÁLISE EM CENÁRIO DESFAVORÁVEL	68
4.5	ANÁLISE DO FLUXO EM CIRCULAÇÃO FORÇADA.....	70
5	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia a nível mundial, em especial nas economias emergentes, associada às preocupações a respeito do desenvolvimento sustentável da atividade econômica e da busca por fontes de energia renovável trazem à tona o debate a respeito do cenário energético atual. As fontes renováveis de energia têm como característica uma grande disponibilidade em potencial, de modo que são consideradas essenciais para a continuidade do desenvolvimento da sociedade em um cenário no qual os combustíveis fósseis, que atualmente ainda fornecem a maioria da energia consumida, tendem a se tornar cada vez mais escassos.

Atrelado a esse cenário, é importante evidenciar a importância do uso das energias renováveis sob um aspecto de preservação do meio ambiente. É de amplo conhecimento que o impacto da atividade humana, desde a urbanização em massa ao longo dos últimos séculos até o mais recente desenvolvimento tecnológico dos setores agrícola e industrial, pode trazer graves consequências em sentido contrário a preservação da fauna e da flora, bem como na manutenção de fontes de recursos naturais essenciais como as nascentes de rios e os lençóis freáticos.

Diante dessas questões, o uso de energias renováveis se apresentam como uma alternativa de menor impacto ambiental, dentre as quais se destacam a energia solar e eólica, cujo desenvolvimento tecnológico tem se dado ao longo dos últimos anos, fazendo com que essas fontes energéticas tenham assumido importante papel nas matrizes energéticas de importantes países desenvolvidos e tenham começado a se popularizar também, ainda que com certa timidez, em países em desenvolvimento.

A energia solar, apesar de ainda não apresentar custo benefício tão atrativo em diversos casos de aplicação, se apresenta como uma das mais promissoras fontes de energia a serem exploradas, principalmente por ter o maior potencial teórico de energia disponível, estimado em 5600 Terawatts (TW), conforme mostrado na tabela a seguir:

Tabela 1- Potencial energético teórico, extraível e tecnicamente acessível no mundo e nos Estado Unidos.

Fonte Energética	Mundo				EUA
	Potencial Teórico (TW)	Potencial Extraível (TW)	Potencial Técnico (TW)	Disponibilidade em 2001 (TW)	Disponibilidade em 2001 (TW)
Hidrelétrico	12	3,5	1,2	0,23	0,056
Ondomotriz	34	8,5	0,62	0	0
Correntes marítimas	8,1	2	0,012	0	0
Gradiente térmico marítimo	3,9	0,033	0,0033	0	0
Gradiente salino marítimo	3	0,74	0,074	0	0
Maremotriz	2,4	0,9	0,037	0,00005	
Eólica	1000	250	14	0,005	0,0023
Geotérmica	44	2,8	1,9	0,005	0,0016
Solar Elétrica	89000	58000	7500	0,00015	0,000025
Solar química	89000	61000	2500	0,19	0,088
Solar térmica	89000	19000	5600	0,0006	0,0018

Fonte: Adaptado de TSAO, LEWIS e CRABTREE (2006).

Atualmente, um dos principais usos da energia solar se dá na geração de energia elétrica fotovoltaica, feita em sua grande maioria com o uso de placas solares a base de silício com eficiência entre 20 e 30% (VANDENBOSCH e MA, 2012). No entanto, espera-se que com o avanço das tecnologias relacionadas ao campo da energia solar, esse potencial possa ser explorado cada vez mais, não só na geração elétrica fotovoltaica, mas também de outras formas.

Uma dessas outras formas é a aplicação da energia solar para sistemas de aquecimento de água, que pode promover uma grande redução no consumo residencial de energia oriundas de matrizes energéticas convencionais, trazendo benefícios ecológicos e econômicos diretamente ao consumidor.

A aplicação da energia solar para sistemas de aquecimento de água também se dá de forma direta no aquecimento de piscinas, cujo número total estimado passa de 2,5 milhões no Brasil (BOIMEL, 2017). Principalmente nas regiões menos quentes do país, se faz necessário o uso de aquecedores para manter a temperatura da água e níveis confortáveis para o banho ao longo de todo o ano, e é nesse cenário que a energia solar apresenta também um grande potencial de uso.

De fato, em 2010 o Brasil já era o 3º colocado em capacidade instalada de coletores solares planos, cuja aplicação é ideal para o aquecimento de piscinas (MATTOS, 2014), de modo que é possível potencializar os avanços neste setor com o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e que possam ser amplamente difundidas.

Diante do imenso potencial que a energia solar apresenta como uma fonte praticamente inesgotável e tecnicamente possível de ser explorada desde já e com grande margem para o melhoramento das tecnologias e aumento da eficiência na sua exploração, é natural que este tema seja objeto de diversos projetos relacionados a engenharia em geral.

Desse modo, voltando a atenção para o consumo de energia elétrica residencial, em especial no Brasil, mas também aplicável a outros lugares do mundo, percebe-se que existe grande oportunidade para a exploração da energia solar, especialmente em sistemas de aquecimento de água, que é responsável por considerável parte do consumo de energia das residências.

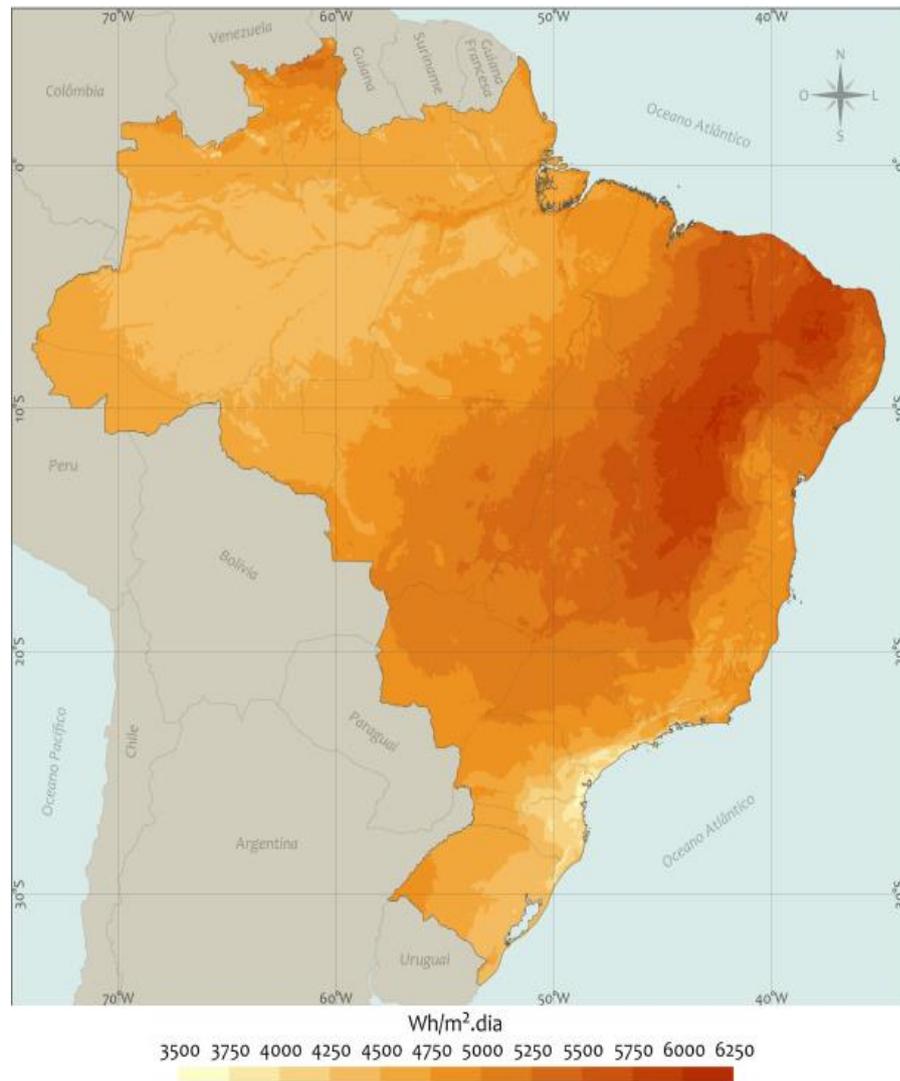
A aplicação da energia solar concede maior robustez a matriz energética que compõe, à medida que diminui a sua dependência das fontes convencionais e em especial no Brasil, da fonte hidrelétrica, a qual, por depender diretamente dos níveis pluviométricos, pode gerar cenários de escassez de energia.

De fato, pode-se observar no período de 2011 a 2015, marcado por baixos índices pluviométricos e escassez de água, expressiva queda na geração hidrelétrica e o aumento da geração de energia por fontes não-renováveis em usinas térmicas, com consequente aumento nas emissões de CO₂ por Megawatt (MW) de energia gerado no Brasil (MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 1970 - 2016). Desse modo, o uso da energia solar pode representar também um fortalecimento da matriz energética brasileira, possibilitando a diminuição das incertezas quanto a capacidade de atendimento da demanda e da possibilidade de colapso do sistema.

Do ponto de vista geográfico, sabe-se que a disponibilidade de energia solar é afetada por condições meteorológicas como a cobertura de nuvens, concentração de gases atmosféricos e condições astronômicas associadas ao movimento do planeta (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

Contudo, mesmo levando em consideração todas estas possíveis adversidades, o Brasil se mostra como um dos mais privilegiados países no que se relaciona ao potencial de aproveitamento de energia solar devido às altas taxas de irradiação, representada adiante:

Figura 1 - Nível de irradiação global no Brasil, Média anual



Fonte: PEREIRA, MARTINS (2017).

É possível verificar de acordo com a figura 1 valores médios de irradiação global altos, acima de 3500 Wh/m², ao longo de todo o território nacional, com destaque para as regiões Nordeste e Centro-Oeste, as quais apresentam valores médios superiores a 5000 Wh/m² em boa parte de sua área, chegando a picos de mais de 6000 Wh/m².

Sob ponto de vista mais prático, a utilização de energia solar para o aquecimento de água, em detrimento do uso de sistemas à gás ou a eletricidade, pode gerar grande economia. Moraes (2015, p.82) cita que o aquecimento de água corresponde a 24% do consumo de eletricidade no setor residencial.

Desse modo, a economia gerada por esse tipo de sistema atingiria grande fatia do consumo total de energia elétrica nacional, tendo em vista que 28% deste se compõe do setor residencial, conforme mostrado a seguir:

Figura 2 - Distribuição do consumo de energia elétrica por setor em Gigawatt-hora

Brasil	2013	2014	2015	2016	2017	Δ% (2017/2016)	Part. % (2017)	
Consumo (GWh)	463.142	474.823	465.708	461.780	467.161	1,2	100,0	Consumption (GWh)
Residencial	124.908	132.302	131.190	132.872	134.368	1,1	28,8	Residential
Industrial	184.685	179.106	169.289	165.314	167.398	1,3	35,8	Industrial
Comercial	83.704	89.840	90.768	87.873	88.292	0,5	18,9	Commercial
Rural	23.455	25.671	25.899	27.266	28.136	3,2	6,0	Rural
Poder público	14.653	15.355	15.196	15.096	15.052	-0,3	3,2	Public Sector
Iluminação pública	13.512	14.043	15.333	15.035	15.443	2,7	3,3	Public lighting
Serviço público	14.847	15.242	14.730	14.969	15.196	1,5	3,3	Public service
Consumo próprio	3.379	3.265	3.304	3.355	3.277	-2,3	0,7	Own Use
Consumidores (mil)	74.814	77.171	79.107	80.624	82.464	2,3	100,0	Consumers (thousand)
Residencial	63.862	66.007	67.746	69.277	70.907	2,4	86,0	Residential
Industrial	584	574	549	536	528	-1,4	0,6	Industrial
Comercial	5.445	5.566	5.689	5.689	5.754	1,1	7,0	Commercial
Rural	4.200	4.279	4.366	4.365	4.499	3,1	5,5	Rural
Poder público	544	561	568	560	573	2,5	0,7	Public Sector
Iluminação pública	87	88	93	96	99	3,2	0,1	Public lighting
Serviço público	79	84	87	91	95	4,5	0,1	Public service
Consumo próprio	12	14	10	9	9	2,4	0,0	Own Use

Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica (2018).

Assim, o emprego de sistemas solares de aquecimento de água pode gerar uma redução de aproximadamente 6% no consumo total de energia elétrica nacional.

De acordo com o Censo 2010, 97,8% dos domicílios nacionais têm acesso a energia elétrica, de modo que, se promovida uma redução significativa no consumo de energia por parte dos aquecedores elétricos com a implantação de sistemas de aquecimento solares, grande parte da população poderá ser beneficiada diretamente no médio prazo do ponto de vista social, com a diminuição do valor das contas de luz residenciais, proporcionando um alívio no orçamento familiar.

As soluções comerciais disponíveis de sistemas de aquecimento de água com energia solar, apesar de estarem cada vez mais se popularizando, ainda representam um investimento cujo retorno se dá a médio e longo prazo, muitas vezes com a necessidade de um aporte inicial de valor ainda alto para a realidade da sociedade brasileira.

Este fato pode ser mitigado através de estímulos estatais para a ampliação do uso de sistemas de aquecimento de água com energia solar. O estabelecimento da resolução normativa 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o lançamento do Plano de Nacionalização Progressiva do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), são medidas que diminuem a burocratização no uso da energia solar e geração de energia elétrica e fornecem linhas de crédito para acesso à tecnologia, contudo, apesar de indicarem o início do estímulo à inovação e desenvolvimento tecnológico no setor de energia solar no país, é preciso algo mais para promover de fato o rápido desenvolvimento do mercado de energia solar (NETO, 2017).

Do ponto de vista técnico, as soluções usuais de sistemas solares de aquecimento de água por circulação natural oferecidas no mercado apresentam limitações físicas na sua instalação, de modo que o reservatório obrigatoriamente deve ficar em uma altura superior à dos coletores. Esse fator muitas vezes limita a aplicação do sistema, como por exemplo, no aquecimento de piscinas localizadas no piso térreo de residências ou estabelecimentos, obrigando o usuário a procurar por sistemas de maior complexidade, com o uso de bombas para a circulação forçada, bem como de controles eletrônicos para realizar o seu acionamento.

Entende-se assim que o estudo e aprimoramento de sistemas de aquecimento solar de água podem contribuir para a diversificação da matriz energética nacional, bem como trazer ganhos econômicos, sociais e ambientais na utilização destes tipos de sistema em detrimento das opções usuais, como o aquecimento elétrico ou a gás. Desse modo, pode-se afirmar que o estudo de diferentes tipos de sistema de natureza solar representa válida contribuição para a difusão do uso da energia solar no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização de um sistema de aquecimento de água solar em aplicação residencial, desenvolvendo um modelo matemático que possa representar o comportamento prático do sistema, verificando a influência de parâmetros referentes ao sistema em si e ao seu meio de operação e observando sua efetividade no atendimento de uma demanda estabelecida.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Construir um modelo matemático capaz de representar adequadamente o funcionamento de um sistema de aquecimento solar de água.
2. Avaliar a influência de parâmetros de funcionamento relacionados a utilização de sistemas de circulação natural e circulação forçada, de modo a verificar a efetividade do sistema nesses diferentes modos de operação.
3. Analisar o emprego de sistemas solares de aquecimento de água, baseado nos dados colhidos com o uso dos modelos construídos, verificando sua viabilidade sob as circunstâncias consideradas e a capacidade de atendimento à uma demanda estabelecida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica do trabalho.

2.1 ENERGIA SOLAR

Nesta seção sé tratada a fundamentação teórica relacionada a energia solar.

2.1.1 Histórico de Utilização

O início do uso direto da energia solar pelo homem se deu há mais de dois mil anos com a construção de edificações que pudessem ser melhor aquecidas pelo sol, a utilização de lentes de vidro concentradoras de raios solares para o acendimento de tochas e de fogueiras e a utilização de escudos de bronze na Grécia antiga para direcionar o calor e queimar embarcações de madeira inimigas (The History of Solar, s.d.).

Os usos da energia solar apresentaram, contudo, expressivo desenvolvimento tecnológico a partir de 1767, ano em que se acredita que tenha sido construído o primeiro coletor solar pelo cientista suíço Horace de Saussure. Em 1816, Robert Stirling solicitou o registro da patente de seu economizador, um de seus motores térmicos que fazia uso de energia solar como fonte de energia. (The History of Solar, s.d.).

No ano de 1839, o francês Edmond Becquerel descobre o efeito fotovoltaico, que mais tarde foi verificado em placas de selênio, que foram usadas na tentativa de construir as primeiras placas solares no final do século XIX e no início do século XX. Nesta época também começam a surgir os primeiros coletores solares para aquecimento de água.

A partir de meados da década de 50, os primeiros painéis fotovoltaicos são desenvolvidos e comercializados nos Estados Unidos, com uma eficiência de conversão inicial da ordem de 4% e que rapidamente evoluiu para 14% no início da década de 60 através do trabalho da Hoffman Industries. A partir daí, diversos projetos com utilização de energia solar começam a ser desenvolvidos, com a participação da NASA, do Japão e de diversos países da Europa.

A produção de energia solar mundial começa a crescer expressivamente e chega em 1983 a ultrapassar a barreira de 21,3 MW de energia, com valor comercial de mais de 250 milhões de dólares. O aprimoramento da tecnologia continua e a expansão no seu uso fez com que a capacidade instalada de energia fotovoltaica ultrapasse a marca de 1000 MW em 1999, com destaque também para as diversas utilizações da tecnologia em programas aeroespaciais como fonte de energia para estações e naves espaciais (The History of Solar, s.d.).

Ao longo dos últimos anos, finalmente a energia solar começa a se tornar uma alternativa competitiva para geração de energia a nível global, voltada para o consumidor comum. Com o surgimento de sistemas comerciais voltados para a geração direta de energia elétrica por painéis fotovoltaicos de uso doméstico e com o investimento de empresas em fazendas de painéis solares para geração em larga escala e o emprego de diversos tipos de sistemas de aquecimento de água, o grande potencial energético da fonte solar começa a ser melhor aproveitado e espera-se que em um futuro não tão distante, a energia solar se torne protagonista na matriz energética mundial.

2.1.2 Disponibilidade

A disponibilidade de energia solar na superfície do planeta Terra é influenciada diretamente por fatores astronômicos e climáticos. A respeito daqueles, sabe-se que a posição da Terra em relação ao Sol está em constante mudança à medida que o planeta desenvolve sua órbita em torno deste. Dessa forma, a irradiância solar oscila entre os valores de 1.325 a 1.412 W/m², sendo a média desse intervalo, 1.366 W/m² um valor de referência chamado de constante solar (NREL, 2017). A mudança das estações do ano, definidas pela variação na inclinação da terra em relação ao plano orbital do planeta em torno do sol, também afeta diretamente a irradiação que chega aos diversos locais do planeta, de modo que em determinadas épocas, regiões chegam a passar semanas sem ver a luz do dia.

Além dos fatores astronômicos, fatores climáticos como o efeito estufa, a atuação da camada de ozônio e o desenvolvimento de sistemas meteorológicos diversos também influenciam na capacidade de aproveitamento da energia solar que se pode atingir de acordo com a localidade. Todos esses fatores podem atuar de maneiras bastante complexas de modo a promover mudanças nos níveis de aerossóis, nebulosidade, índices pluviométricos e umidade, afetando diretamente a utilização da energia solar. (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017)

O fato de que a energia solar só pode ser aproveitada durante os horários do dia em que há insolação, traz à tona um dos grandes desafios no que diz respeito à difusão massiva dessa fonte energética. Sistemas isolados, ou seja, que não estão conectados diretamente a rede elétrica usual, dependem de sistemas auxiliares de armazenamento de energia para garantir o abastecimento da demanda durante todos os períodos do dia. Desse modo, se faz necessário também o avanço nas tecnologias de armazenamento de energia, principalmente na forma de baterias, que são os meios de armazenamento mais comuns atualmente, e na forma de novas tecnologias como células de combustível. (SINGH, 2013)

Contudo, apesar da grande variação de disponibilidade de energia solar ao longo da superfície terrestre e da vasta quantidade de fatores que podem influenciá-la, diversos usos da energia solar têm se tornado viáveis e se difundido pelos países, tanto em aplicações de uso doméstico quando de maior escala, como processos industriais e geração de eletricidade em larga escala.

2.1.3 Aquecimento Solar De Água

Especialmente no Brasil, uma aplicação de destaque da energia solar se dá em sistemas residenciais de aquecimento de água a baixas temperaturas, em torno de 100 graus. Devido a simplicidade dos sistemas, compostos por não mais de 4 ou 5 componentes, e seu custo relativamente baixo, com uma crescente gama de fabricantes e pontos de comercialização e assistência, essas soluções têm ganhado cada vez mais espaço em razão de conseguirem apresentar viabilidade econômica em um número crescente de projetos. Estímulos oriundos de políticas públicas como isenção de impostos, obrigatoriedade de uso em determinados casos e oferta gratuita de equipamentos associados a programas de moradias populares, como o Minha Casa Minha Vida, contribuem para a popularização do uso desse tipo de sistema em substituição aos sistemas de aquecimento comuns, como o uso de chuveiros elétricos, acarretando também em um alívio no orçamento dessas famílias, além é claro de todos os benefícios associados ao uso da energia solar, como energia renovável e limpa. (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017)

Os principais componentes desses sistemas são o coletor solar, o reservatório de água quente e as tubulações e acessórios, conforme mostrado abaixo:

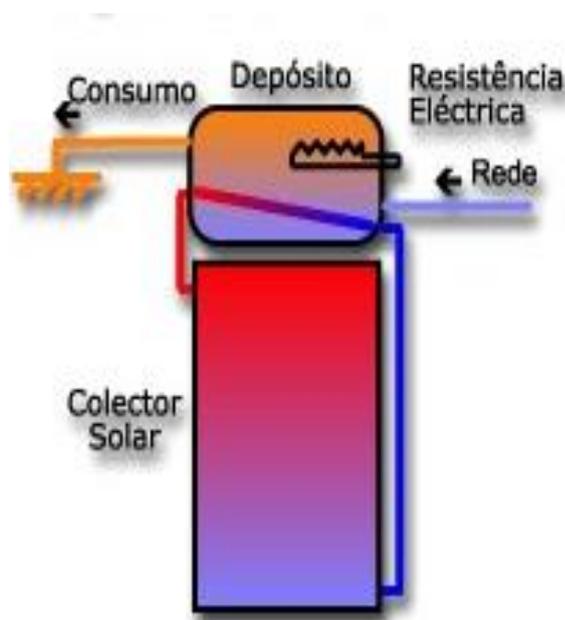
Figura 3 - Ilustração de Aquecedor Solar



Fonte: Solar Water Heating (2017).

Esse tipo de sistema apresenta o coletor solar em um nível inferior ao reservatório, de modo que é possível, nesta configuração, que se tenha a circulação natural da água, através de um fenômeno chamado termossifão. Este fenômeno consiste na circulação natural da água apenas por diferença de densidade, sendo esta gerada por uma diferença de temperatura que é criada quando a água é aquecida dentro do coletor solar. Desse modo, a água que está mais quente tende a subir rumo ao reservatório devido a pressão exercida pela coluna de água fria na entrada do coletor, que se torna maior que a pressão da coluna de água quente na saída do coletor. Abaixo segue ilustração:

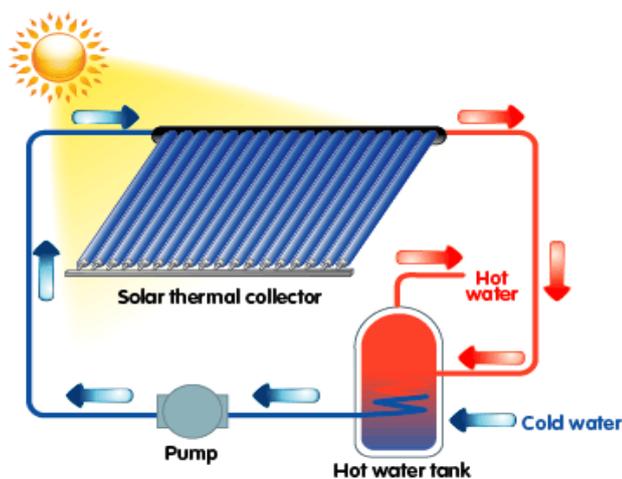
Figura 4 - Fenômeno do termossifão



Fonte: Termossifão (2017).

No caso de sistemas em que não seja viável a instalação do reservatório em um nível superior ao coletor, como no caso de piscinas localizadas em pavimento térreo, uma solução fácil de ser implementada é a instalação de uma bomba de água, fazendo com que o fluxo do fluido deixe de ser natural e passe a ser forçado, conforme ilustrado a seguir:

Figura 5 - Aquecedor solar com circulação forçada



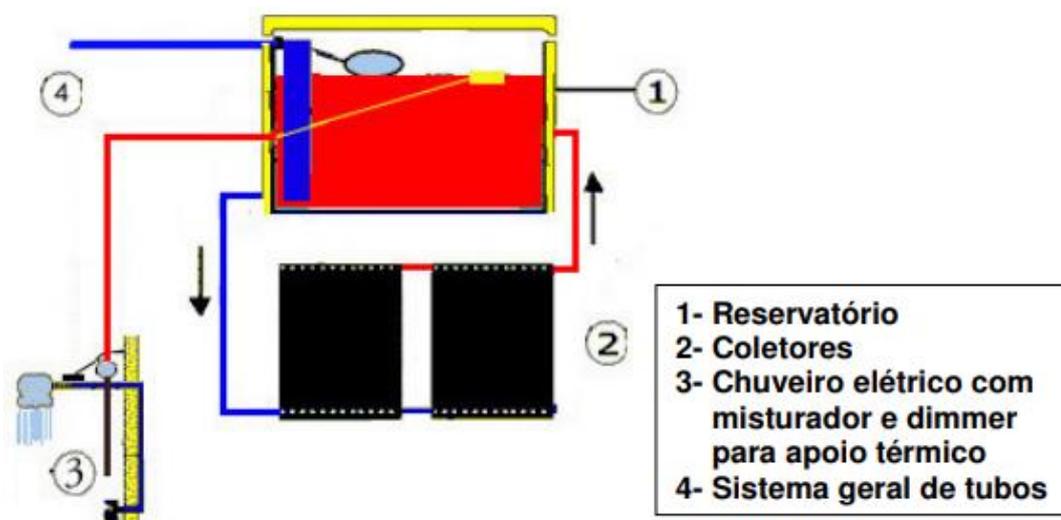
Fonte: Solar Panel on roof (2015).

Os sistemas com circulação forçada têm a vantagem de não depender do calor gerado pelo sol para promover o funcionamento do sistema, ou seja, mesmo em dias em que a temperatura do coletor não seja alta o suficiente para desencadear o termostato o sistema ainda vai apresentar um aquecimento, mesmo que reduzido, da água. Contudo, a presença da bomba nesse sistema faz com que seja necessária maior frequência de manutenção e aumenta o risco de falha do sistema, podendo torná-lo inoperante. Além disso, o funcionamento da bomba gera um gasto extra de energia, de modo que a eficiência geral do sistema pode ser reduzida em comparação com o sistema de circulação natural.

Ainda há também exemplos de soluções de aquecedores desenvolvidas de maneira casual em projetos simples e práticos com uso de mangueiras e outros materiais, visando uma alternativa de custo reduzido se comparada às soluções industriais.

Uma dessas soluções é o Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC) desenvolvido pela Sociedade do Sol, uma organização sem fins lucrativos que trabalha em prol do desenvolvimento de tecnologias sociais de energia solar e renovável e de educação ambiental. (SOL, 2009) Este projeto se caracteriza por ser não patenteável e de acesso livre, justamente pelo objetivo de atingir o maior número de pessoas possível e propõe a construção de instalação de um sistema de aquecimento de água com energia solar de manufatura própria, com componentes facilmente encontrados no mercado de materiais para construção, conforme ilustrado adiante:

Figura 6 - Ilustração do aquecedor solar de baixo custo



Fonte: SOL (2009).

O projeto ASBC dispõe de um completo manual instrutivo, com um passo a passo de todos os procedimentos necessários para a compra dos componentes, a construção e a montagem final deles. Este sistema busca atingir uma redução de até 30% no consumo da energia das residências, parcela essa geralmente gasta pelos sistemas de aquecimento usuais, como o chuveiro elétrico. Apesar disso, o sistema solar atua de maneira integrada com o aquecimento elétrico usual, de modo que caso ele não possa suprir toda a demanda de água aquecida, o usuário poderá complementá-lo com o aquecimento elétrico tradicional.

Projetos como o ASBC e similares já foram objeto de estudo de diversos trabalhos de análise e simulação, com o objetivo de avaliar a viabilidade desses sistemas principalmente no que tange a relação custo x benefício desses sistemas comparado a sistemas comerciais tradicionais e avaliar o tempo de retorno de investimento desses sistemas. Pode-se afirmar que os aquecedores solares de baixo custo apresentam desempenho térmico satisfatório, sendo capazes de fornecer grande parte da energia necessária para o aquecimento de água e apresentando uma solução mais ecologicamente correta se comparada a energia de fontes termoelétricas (OLIVEIRA, DAMASCENO e VIEIRA, 2009).

A eficiência desse tipo de sistema de aquecedor solar, em geral, está diretamente atrelada a qualidade do coletor solar utilizado no projeto. Os coletores caseiros utilizam-se de materiais simples, como mangueiras de jardinagem, forros e tubulações de PVC, que nem

sempre apresentam características ideais de resistência a altas temperaturas e ao desgaste promovido pela radiação solar.

Como exemplo, tem-se o coletor mostrado abaixo, construído com mangueira de PVC comum enrolada em espiral.

Figura 7 - Coletor solar de mangueira



Fonte: DIY Solar Heater (2017).

Esse tipo de solução é de custo relativamente baixo, contudo apresenta limitações no sentido de temperatura máxima que a água pode atingir e durabilidade. A partir desse tipo de coletor, pode-se também utilizar uma solução um pouco mais complexa, que envolve a mangueira, ou a tubulação, em uma estrutura fechada, com teto de vidro e interior com pintura preta, que tem o objetivo de criar um efeito estufa localizado, elevando a temperatura dentro da estrutura e aquecendo ainda mais a água por dentro da tubulação. Devido ao maior grau de complexidade tanto em termos de recursos quanto em termos de construção, esta solução exige maior investimento inicial, inviabilizando sua aplicação em alguns casos, apesar de conseguir resultados que podem ser sensivelmente melhores que os coletores mais comuns, se aproximando das soluções profissionais disponíveis no mercado. O incremento no custo deste tipo de projeto mais avançado, em comparação com as soluções de baixo custo, se dá principalmente pela presença de maiores temperaturas, alcançadas com a ajuda da estrutura em torno da tubulação, sendo necessário o uso de materiais mais nobres, como cobre ou alumínio, para a sua construção, o que associado ao custo extra da própria estrutura, encarece o valor inicial a ser investido e amplia o tempo de retorno do investimento.

A seguir, mostra-se um coletor solar feito com tubulação metálica, enquadrada dentro de uma armação para produção do efeito estufa:

Figura 8 - Coletor solar metálico com superfície de vidro



Fonte: AHSAN (2015).

Os sistemas profissionais utilizam-se de tecnologias mais avançadas e processos de produção de escala industrial para a fabricação dos seus componentes, de modo que geralmente apresentam soluções de maior eficiência e também maior custo. Um exemplo dessa tecnologia são os coletores a vácuo, que são compostos de tubos de vidro de parede dupla, com vácuo entre si, contendo camadas de materiais com boas propriedades térmicas em sua superfície interna (Coletor Solar - Tubo de Vácuo, s.d), conforme ilustrado abaixo:

Figura 9 - Coletor solar a vácuo



Fonte: SOLARSIST (2017).

Outro ponto chave para a eficiência desses sistemas é o desenvolvimento do fluxo adequado da água nos coletores. Nos sistemas de circulação forçada pode-se exercer o controle eletrônico da bomba e assim define-se com precisão o fluxo de água pelo sistema relacionando com variáveis como a temperatura ambiente, nível de irradiação e temperatura da água em diferentes pontos.

Assim, estabelecido o grande potencial energético que representa a fonte solar, em especial no Brasil, bem como a ampla capacidade de utilização de diversas soluções relacionadas ao aquecimento de água, é de grande valia a avaliação da aplicabilidade dos diferentes tipos de sistemas de acordo com a demanda, seja esta residencial de pequena ou larga escala, industrial ou comercial.

2.2 PROCESSOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

Existem diversos tipos de energia associadas a um sistema ou objeto na natureza e que compõe a sua energia total, como a energia elétrica, mecânica, química e magnética. Em se tratando da estrutura molecular da matéria, a soma de todas as energias a nível microscópico resulta na sua energia interna, que pode ser entendida também como a resultante da soma de toda a energia cinética e potencial das moléculas do sistema em análise. A energia interna do sistema pode ser separada em calor sensível, relacionado a energia cinética das moléculas, calor latente, relacionado as forças de ligação entre as moléculas em seus possíveis arranjos, ou fases, energia química, relacionada a energia de ligação entre os átomos que compõe as moléculas e finalmente energia nuclear, relacionada a ligação dos componentes dos núcleos atômicos (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

As diversas interações entre os sistemas e suas vizinhanças resultam em transferência de energia entre eles através da realização de trabalho ou da transferência de calor. Esta última, está relacionada a diferença de temperatura e se dá através de 3 processos principais os quais são a condução, convecção e radiação (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2008).

2.2.1 Condução

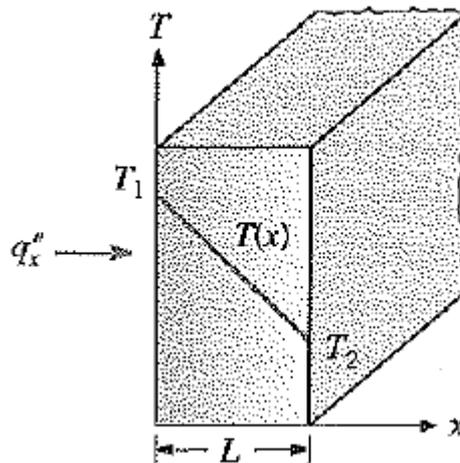
A condução está associada a atividade atômica e molecular a medida que decorre da movimentação e do choque entre partículas de maior temperatura, de energia molecular mais alta, com partículas de menor temperatura, resultando em uma transferência de energia

sempre na direção do maior para o menor nível energético, ou seja, no sentido da diminuição da temperatura (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2008).

Em termos numéricos, a quantificação da energia transferida através da condução, se expressa através da lei de Fourier, que expressa o fluxo térmico em uma determinada direção, através de uma área.

Considerando o exemplo de uma placa plana, ilustrada abaixo:

Figura 10 - Ilustração do fluxo térmico em uma placa plana.



Fonte: INCROPERA, DEWITT (2008).

A transferência de energia na direção em que ocorre o gradiente de temperatura indicado, perpendicularmente a área de placa, é representada pela lei de Fourier na seguinte forma:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

Onde L é a espessura da placa alinhada a direção de fluxo de calor, T_1 e T_2 são as temperaturas nos lados mais quente e mais frio da placa, e $\frac{dT}{dx}$ é a variação de temperatura ao longo da placa.

A taxa de transferência de energia, ou fluxo térmico, é diretamente proporcional ao diferencial de temperatura, multiplicada por um parâmetro relacionado as propriedades do material em questão, a condutividade térmica.

A fórmula, como mostrada a seguir, apresenta o sinal negativo devido ao fato de o fluxo acontecer sempre no sentido da maior para a menor temperatura, nesse caso, de T_1 para T_2 :

$$q''_x = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

Onde k é a condutividade térmica do material.

2.2.2 Convecção

A convecção é outra forma de transferência de calor que envolve a ocorrência de dois mecanismos simultaneamente, sendo eles a própria condução que é relacionada a movimentação molecular aleatória e a um mecanismo de movimentação global, chamado de advecção. Além da movimentação aleatória, a movimentação de grupos maiores de moléculas agregadamente em uma direção comum também contribui para a transferência de energia, de modo que se pode constatar a atuação dos dois mecanismos de transmissão de energia, um a caráter mais localizado, e outro de forma global (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2008).

A convecção pode ser vista nas trocas de calor envolvendo fluidos de maneira geral e uma superfície qualquer aquecida. A camada do fluido diretamente em contato com a superfície, a camada limite térmica, executa a troca de energia através de mecanismos relacionados exclusivamente a condução, sendo a energia então levada pela camada limite na direção do escoamento do fluido e posteriormente sendo transferida para as regiões do fluido externas a camada limite através da movimentação dos aglomerados de moléculas de forma global, se configurando assim a transmissão de energia por convecção (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

Se classifica a convecção de acordo com a natureza do escoamento do fluido, podendo esta ser natural, forçada ou mista. Na convecção natural, o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo relacionadas as diferenças de densidade causadas pela diferença de temperatura em diversas regiões do fluido. Já a convecção forçada é causada devido a atuação de algum meio externo, o qual modifica as características físicas do fluido, como por exemplo o uso de ventiladores ou bombas (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2008)

Numericamente, a convecção pode ser descrita pela lei do resfriamento de newton, a qual estabelece que o fluxo de calor é diretamente proporcional a diferença de temperatura

entre os meios, multiplicado de um parâmetro o qual está relacionado a propriedades térmicas e de escoamento do fluido, bem como a geometria sobre a qual este ocorre, chamada de coeficiente de transferência de calor por convecção. A fórmula da lei do resfriamento segue:

$$q'' = h(T_s - T_f) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_s é a temperatura da superfície em contato com o fluido, e T_f é a temperatura do fluido.

2.2.3 Radiação

A radiação é uma forma de transmissão de calor que ocorre em toda a matéria de temperatura não nula. Ela está associada a mudanças na configuração de átomos e moléculas que constituem a matéria e é dada através de fótons e de ondas eletromagnéticas, de modo que não se faz necessário um meio material para que a energia seja transmitida através da radiação. Toda matéria com temperatura superior ao zero absoluto emite radiação, e esta emissão está diretamente relacionada a taxa de emissão de energia por área, ou poder emissivo, e a superfície emissora.

O poder emissivo pode ser descrito pela lei de Stefan-Boltzmann, conforme segue:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

Onde ε é a emissividade do corpo em questão, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é de $5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$ e T_s é a temperatura da superfície.

A emissividade de um corpo é a medida da eficiência na qual uma superfície emite radiação, em relação ao um parâmetro estabelecido em que o valor da emissividade é unitário. Esse parâmetro é chamado de corpo negro, ou radiador ideal, e seu poder emissivo é o limite máximo de emissão a determinada temperatura. Na natureza, nenhum corpo apresenta a característica de um corpo negro, sendo este um referencial teórico.

Além da emissividade, outra característica importante é a absorvidade de radiação de um corpo, relacionada a quantidade de radiação efetivamente absorvida pelo corpo, em relação a radiação total incidente sobre ele. Deste modo, um corpo pode ter um balanço

positivo ou negativo de energia transmitida por radiação, à medida que emita mais ou menos radiação que absorva.

O fluxo de energia por radiação, portanto, considera tanto a radiação emitida como absorvida, sendo representada matematicamente pela equação a seguir:

$$q'' = \varepsilon\sigma T_s^4 - \alpha G \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

Onde, α é a absorvidade da superfície e G é a radiação incidente sobre a superfície, ou irradiação.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO AQUECEDOR SOLAR

O aquecedor solar, conforme descrito anteriormente, é formado por alguns componentes principais, os quais possibilitam o aproveitamento da energia solar e o seu armazenamento na forma de energia térmica na água. Esses componentes apresentam características termodinâmicas específicas, e a correta descrição de seu comportamento através das equações termodinâmicas adequadas são essenciais para o estudo de sua aplicabilidade, bem como de outros aspectos a ele relacionados.

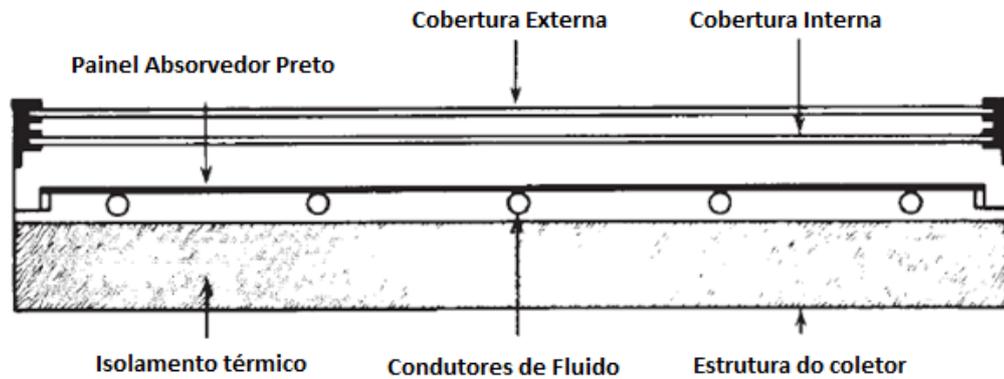
Desse modo, se faz necessária a modelagem matemática dos principais componentes do sistema, sendo eles o coletor solar, o reservatório de armazenamento, a bomba e os componentes hidráulicos da instalação.

2.3.1 Coletor Solar

O coletor solar considerado a nível do presente trabalho será um coletor solar de placa plana. Este tipo de coletor é bastante usado em instalações de baixo nível de complexidade, devido a simplicidade do seu princípio de funcionamento e os menores custos associados se comparado a outros tipos de coletores mais complexos.

Um esquema de um típico coletor solar de placas planas pode ser visto adiante:

Figura 11 - Ilustração do modelo de coletor solar



Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2013).

O princípio básico de funcionamento desse tipo de coletor se dá pelo ganho de energia através da absorção da radiação solar pelo painel absorvedor, o qual transmite calor para os condutores de fluido que por sua vez, transmitem calor para o fluido. As coberturas interna e externa, geralmente feitas de vidro, servem para proteger os componentes internos e tem como função secundária a criação de um efeito estufa localizado na região interna do coletor, contribuindo para o aumento de sua temperatura média. Além disso tem-se o isolamento, que diminui as perdas de calor do coletor solar para o ambiente externo (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

O desempenho do coletor em termos de transmissão de calor se dá através do balanço da energia recebida pela radiação solar menos a energia perdida pelo coletor para o ambiente ao seu redor. Essa energia útil do coletor, pode ser definida pela equação abaixo:

$$Q = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] [W] \quad (6)$$

Onde, A_c é a área da superfície do coletor, S é a irradiação solar, U_L é o coeficiente de transmissão de calor associado às perdas de energia, T_{pm} é a temperatura média da superfície do coletor e T_a é a temperatura ambiente. Desse modo, deve ser determinado o coeficiente de transmissão de calor equivalente à soma de todos os diversos coeficientes relativos aos processos de perda de energia pelo coletor.

A partir disto, pode-se definir também a eficiência do coletor solar, que pode ser representada pela razão entre a energia aproveitada pelo coletor, sobre a energia total nele incidente, mostrada na equação a seguir:

$$\eta = \frac{\int Q dt}{A_c \int S dt} \quad (7)$$

Onde, S é a irradiação solar considerada ao longo de um determinado período de tempo, geralmente de 1 hora.

Levando em consideração o fato de que a radiação solar é usualmente expressa como uma média de um intervalo de uma hora de duração, se faz necessário também levar esse período em consideração no cálculo da energia perdida pelo coletor. Em se considerando a média da radiação observada durante um intervalo de tempo, S_m , pode-se simplificar a equação a seguinte forma:

$$\eta = \frac{Q}{A_c S_m} \quad (8)$$

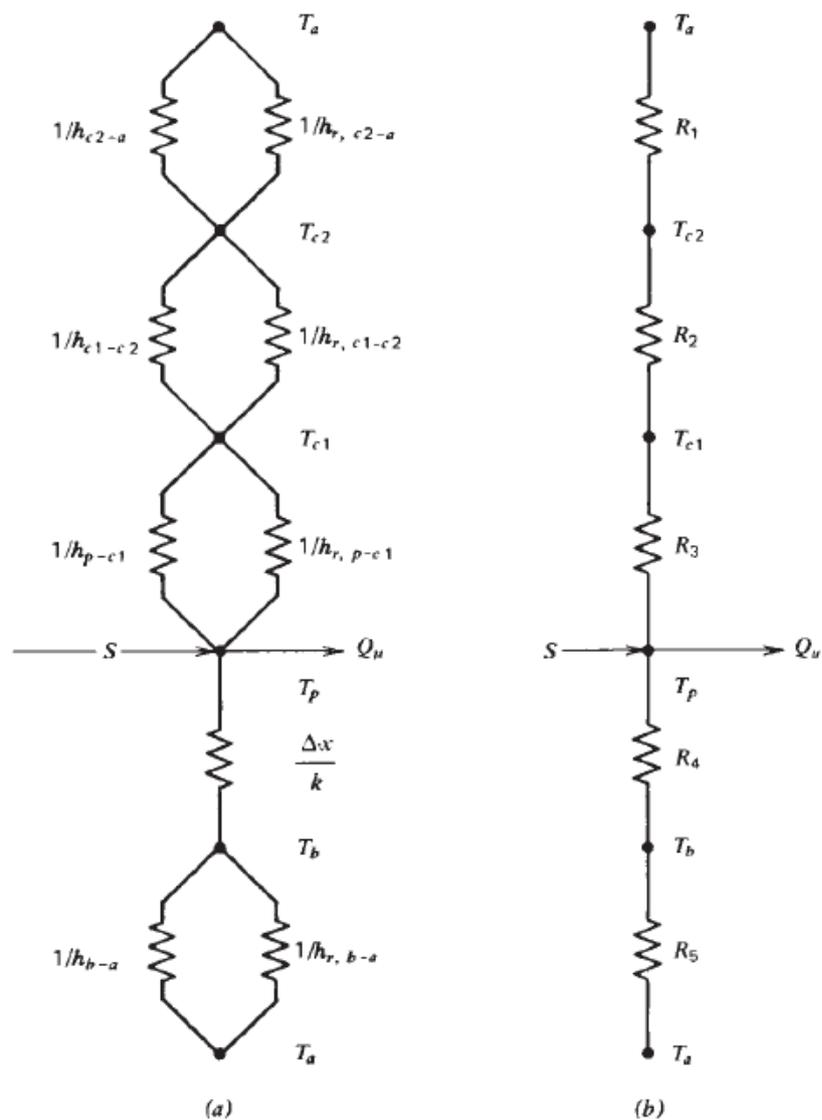
O cálculo da energia ganha pelo coletor mostrado anteriormente nessa seção apresenta uma dificuldade prática de utilização devido à necessidade de se conhecer a temperatura média da superfície do coletor, cuja medida pode ser muitas vezes difícil de ser obtida de forma confiável (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Isto posto, são consideradas alternativas para se calcular a energia útil do coletor como, por exemplo, o uso de um parâmetro chamado fator de remoção de calor do coletor. Esse parâmetro expressa a razão entre a energia de fato absorvida pelo coletor e a energia que seria absorvida pelo coletor caso a temperatura média deste fosse igual a temperatura de entrada do fluido, situação teórica na qual a absorção de energia se daria a uma taxa máxima devido a ocorrência da taxa mínima de perdas. Desse modo, evita-se o uso da temperatura média do coletor no cálculo da energia gasta, facilitando-o à medida que a temperatura de entrada do fluido no coletor é um dado mais facilmente registrado e verificado.

Para o cálculo do fator de remoção, antes se faz necessário definir alguns parâmetros relacionados à configuração do coletor em questão, sendo um deles o coeficiente de transmissão de calor para as perdas de energia nas placas. Pode-se chegar a esse coeficiente de perdas global através da análise do circuito térmico do modelo de coletor solar adotado.

Esse modelo considera 5 resistências térmicas, R1 a R5, no coletor solar, sendo elas a resistência térmica entre a cobertura superior e o ambiente, a resistência térmica entre as duas coberturas, a resistência entre a cobertura interna e a placa absorvedora, a resistência entre a placa absorvedora e a estrutura do coletor, ao longo do isolamento, e a resistência entre a superfície inferior do coletor e o ambiente. As perdas pelas laterais são simplificadaamente calculadas devido a seu baixo valor relativo as perdas totais, bem como as perdas devido à resistência entre a superfície inferior do coletor e o ambiente externo. O modelo do circuito térmico pode ser visto abaixo:

Figura 12 - Circuito térmico do coletor solar



Fonte: DUFFIE e BECKMAN (2013).

A resistência R1, entre a superfície superior e o ambiente externo é dada pela fórmula:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right] \quad (9)$$

Onde h_w é o coeficiente de convecção com a atmosfera e $h_{r,c2-a}$ é o coeficiente de radiação entre a cobertura superior e a atmosfera.

Segundo DUFFIE e BECKMAN (2013, p. 165) “De acordo com a discussão prévia, é aparente que o cálculo de coeficientes de transmissão de calor induzidos pelo vento não está devidamente estabelecido”. Com isso, se leva em consideração, dentre os diversos estudos desenvolvidos acerca do tema, a equação reportada por McAdams (1954), a qual segue:

$$h_w = 5,7 + 3,8 V \quad (10)$$

Onde V é a velocidade do vento incidente sobre a superfície superior.

Já o coeficiente de radiação, é dado através da equação seguinte:

$$h_{r,c2-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_{c2} + T_s)(T_{c2}^2 + T_s^2)(T_{c2} - T_s)}{T_{c2} - T_a} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (11)$$

Onde, T_{c2} é a temperatura da cobertura externa, T_s é a temperatura da atmosfera, T_a a temperatura ambiente, ε_c é a emissividade da cobertura externa e σ é a constante de Stefan-Boltzmann. Vale salientar que, por conveniência, se estabelece que T_s tem o mesmo valor de T_a por se considerar a temperatura da atmosfera local a mesma do ambiente ao redor do coletor (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

As resistências R2 e R3 representam a soma das resistências de convecção e radiação entre as coberturas no caso de R2, e entre a cobertura interna e a placa absorvedora, no caso de R3, sendo a fórmula para o cálculo desta a seguinte:

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right] \quad (12)$$

Para a transferência de calor entre duas superfícies, levando-se em conta a troca de calor por radiação e o fator de forma dado entre elas, têm-se a solução geral, mostrada a seguir (DUFFIE e BECKMAN, 2013):

$$Q_1 = -Q_2 = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (13)$$

Considerando o caso de placas paralelas de mesma área, que ocorre no coletor solar, a equação para o calor trocado entre as placas, se torna, então:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (14)$$

A partir daí, pode-se definir um coeficiente de transferência de calor por radiação, h_r , relativo à superfície 1, como mostrado a seguir:

$$Q = Ah_r(T_2 - T_1) \quad (15)$$

De modo que, combinando as equações, têm-se:

$$A_1 h_r (T_2 - T_1) = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (16)$$

Notando que as áreas A_1 e A_2 para o caso em questão são iguais, e que por isso o Fator de forma entre elas é unitário, chega-se a:

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 - T_1^2)(T_2 + T_1)(T_2 - T_1)}{(T_2 - T_1) \left[\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 + 1 + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]} \quad (17)$$

E, finalmente:

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 - T_1^2)(T_2 + T_1)}{\left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right]} \quad (18)$$

Usando essa definição para o coeficiente de radiação relativo à resistência R3, chega-se então a:

$$h_{r,p-c1} = \frac{\sigma(T_p^2 - T_{c1}^2)(T_p + T_{c1})}{\left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1\right]} \quad (19)$$

Em que: T_p é a temperatura da placa absorvedora, T_{c1} é a temperatura da cobertura interna, ε_p é a emissividade da placa absorvedora e ε_{c1} é a emissividade da cobertura interna.

E sendo o coeficiente de convecção, determinado pela fórmula para o caso de convecção entre duas placas planas paralelas:

$$h_{c,p-c1} = Nu \cdot \frac{k}{l} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (20)$$

$$h_{c,p-c1} = \frac{k}{l} \cdot \left(1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708 (\text{sen}1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos\beta} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos\beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos\beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right) \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (21)$$

Em que Ra, o número de Rayleigh, se dá por:

$$Ra = \frac{g\beta' \Delta T l^3}{\nu \alpha} \quad (22)$$

Onde: g é a aceleração gravitacional, β é o ângulo de inclinação do coletor em relação a horizontal, β' é o coeficiente de expansão volumétrico do fluido, ΔT é a diferença de temperatura entre as placas, l é a distância entre as placas, ν é a viscosidade do fluido e α é a difusividade térmica do fluido.

Vale salientar que para o cálculo do coeficiente de radiação entre duas placas planas, é necessário o uso de um método iterativo, no qual se admite um valor inicial para a temperatura da cobertura de vidro desconhecida, chega-se ao valor do coeficiente e com este dado, se calcula novamente o valor da temperatura de vidro para o coeficiente determinado, o que pode ser feito, considerando a placa absorvedora e a camada de vidro interna, usando a fórmula abaixo:

$$T_{c1} = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (23)$$

Caso o valor resultante desta fórmula seja muito próximo ao estimado inicialmente, pode-se seguir com os cálculos, do contrário, utiliza-se o valor obtido para refazer o cálculo inicial até que o valor estimado e o valor recalculado para a temperatura desconhecida sejam praticamente o mesmo.

Analogamente, para o cálculo de R2, consideram-se as mesmas equações, apenas substituindo nelas os dados referentes a placa absorvedora pelos dados referentes a cobertura interna, e os dados da cobertura interna pelos dados da cobertura externa, respectivamente.

A resistência R4 está relacionada as perdas de calor pela base do coletor, que é isolada com uma camada de material termicamente isolante, com o objetivo de reduzir ao máximo as perdas pela superfície inferior. Devido ao uso do isolamento, as magnitudes das perdas pela base são geralmente de pequena ordem, considerando-se nos cálculos apenas o fluxo de condução pelo isolamento, o qual pode ser definido por:

$$R_4 = \frac{L}{k} \left[\frac{m^2 \text{°C}}{W} \right] \quad (24)$$

Onde, L é a espessura do isolante e k é a condutividade térmica do material isolante.

Já a resistência R5, se refere as perdas entre a superfície inferior da estrutura do coletor com o ambiente. Devido a magnitude dessas perdas, muito pequenas em relação as outras resistências no coletor, ela é desprezada.

Para as laterais, considera-se que as perdas se darão por um fluxo unidirecional através de seu perímetro, sendo recomendado a utilização de isolamento na mesma espessura do usado na base.

Em projetos bem construídos de acordo com o modelo de coletor adotado essas perdas são bastante pequenas quando se tem grandes áreas superficiais de absorção, contudo, para projetos menores, esse valor pode se tornar mais relevante, de modo que o coeficiente de perda de calor pelas laterais utilizado deve ser considerado, podendo ser calculado em relação à área da superfície absorvedora do coletor, considerando um isolamento simples ao longo da lateral, conforme mostrado na equação abaixo:

$$U_e = \frac{(UA)_e}{A_c} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (25)$$

Onde: U_e é o coeficiente de perda de calor pelas laterais, $(UA)_e$ é o coeficiente de perdas lateral, e A_c é a área da superfície do coletor.

Desse modo então, o coeficiente de remoção de calor por perdas do coletor pode ser definido da seguinte forma:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (26)$$

Em que:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (27)$$

E:

$$U_b = \frac{1}{R_4} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (28)$$

Desse modo, tem-se:

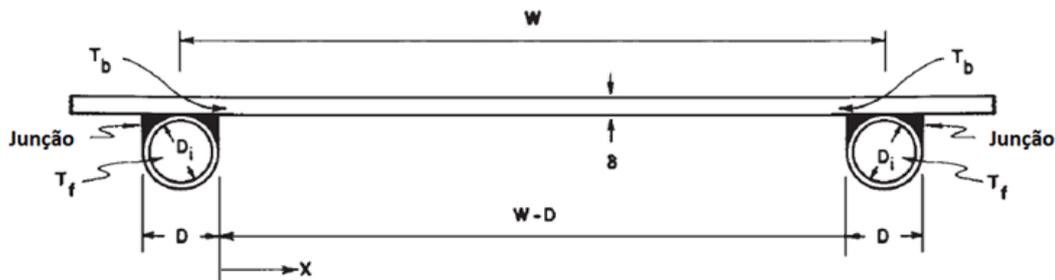
$$U_L = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{(UA)_e}{A_c} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (29)$$

Após determinar-se o coeficiente de remoção de calor por perdas, pode-se analisar também outro dado importante, o fator de eficiência do coletor, F' .

Este fator se trata basicamente de uma constante para um determinado projeto de coletor, à um dado fluxo de fluido. Em termos práticos, este fator a razão entre o ganho de energia útil e o ganho de energia útil teórico que ocorreria caso a placa absorvedora estivesse a mesma temperatura do fluido que circula pelo coletor.

Para o cálculo do fator de eficiência do coletor, se leva em conta as características da troca de calor que ocorre entre a placa absorvedora e os tubos condutores de fluido, de modo que os parâmetros de construção do coletor têm direta influência no seu valor. A seguir, têm-se uma ilustração de alguns desses parâmetros:

Figura 13 - Parâmetros construtivos do coletor, placa absorvedora e tubulação



Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2013).

O parâmetro “W” se refere a distância horizontal entre o eixo central da seção transversal de dois tubos consecutivos. O parâmetro “D” se refere ao diâmetro externo do tubo, enquanto “Di” se refere ao diâmetro interno. T_f se refere à temperatura do fluido circulante, T_b se refere a temperatura da placa e o termo δ é a espessura da placa.

Outro ponto destacado na ilustração é a junção entre o tubo e a placa. Esta interface de contato entre os dois componentes tem influência sobre os valores do fator de eficiência do coletor, pois caso essa junção seja inadequada, a transferência de calor é comprometida, prejudicando o desempenho do coletor em geral.

Em termos numéricos, o fator de eficiência pode ser definido pela equação seguinte:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (30)$$

Além dos parâmetros definidos na ilustração, tem-se o parâmetro h_{fi} , que representa o coeficiente de transferência de calor entre o fluido circulante e a parede do tubo, bem como o parâmetro F, que se trata da eficiência padrão de uma aleta reta de perfil retangular, cujo valor é determinado por:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (31)$$

Em que m , se define por:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (32)$$

E se tem o parâmetro C_b , que é a condutância da junção entre tubo e placa, definido por:

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (33)$$

Em que k_b é a condutividade térmica da junção, b é a largura da junção e γ é a espessura média da junção.

Após a definição do fator de eficiência do coletor definido, pode-se seguir para o cálculo do fator de remoção de calor do coletor solar, expressado pela seguinte fórmula:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c[S - U_L(T_{fi} - T_a)]} \quad (34)$$

Onde, T_{fo} é a temperatura de saída do fluido, T_{fi} é a temperatura de entrada do fluido, \dot{m} é a vazão de fluido no coletor, C_p é o calor específico do fluido, T_a é a temperatura ambiente, A_c é a área da superfície do coletor, S é a irradiação recebida do sol e U_L é o coeficiente de transmissão de calor associado as perdas de energia. De modo a expressar esse fator em termos de parâmetros já conhecidos sobre o coletor, pode-se rearranjar a sua equação, de modo que se tenha:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[\frac{(T_{fo} - T_{fi})}{\left[\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a) \right]} \right] \quad (35)$$

Que pode ser escrito como:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[\frac{\left[\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a) \right] - \left[\frac{S}{U_L} - (T_{fo} - T_a) \right]}{\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} - (T_{fo} - T_a)}{\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] \quad (36)$$

Esta equação pode ser reescrita, usando uma relação derivada do balanço de energia de um volume de controle de fluido que corre ao longo do tubo, mostrada abaixo:

$$\frac{T_{fo} - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m}C_p}\right) \quad (37)$$

Que quando aplicada a equação do fator de remoção de calor do coletor, resulta, finalmente, em:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (38)$$

Definida a formulação para o cálculo do fator de remoção de calor do coletor, pode-se então, expressar o ganho útil de energia pelo coletor solar pela equação a seguir:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad [W] \quad (39)$$

Com isso, pode-se também definir a eficiência instantânea do coletor, de acordo com a equação abaixo:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (40)$$

Sendo I_T a radiação incidente sobre a superfície do coletor, no período padrão adotado de uma hora.

2.3.2 Reservatório

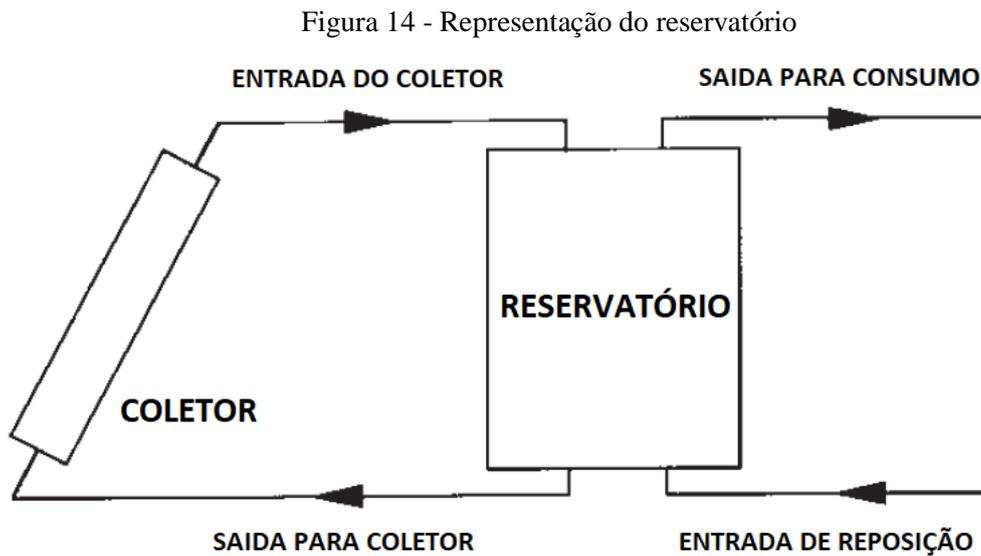
A quantidade de energia solar disponível está diretamente ligada ao horário do dia e as condições meteorológicas do ambiente no qual se situa um sistema de aquecimento solar. Devido então a essa alta variabilidade no fornecimento de energia, se faz necessário considerar opções de seu armazenamento para compatibilizar o funcionamento adequado do sistema com as demandas de consumo de água aquecida, garantindo desse modo a disponibilidade desejada.

Para um sistema de aquecimento solar, o reservatório armazena não só a água que será usada no consumo como também a energia solar absorvida que exceda a necessidade momentânea durante sua operação. Especificamente, a energia nesse caso é armazenada na forma de calor sensível da água, fazendo, portanto, variar a sua temperatura à medida que se alterem as condições tanto de absorção de energia solar como de consumo da água quente armazenada.

Além disso, diferenças de temperatura podem se dar também por perdas de energias de diversas sortes, como a energia térmica perdida ao longo da tubulação e pelo corpo do tanque em si com o ambiente ao seu redor, seja por radiação, convecção ou condução. Essas perdas são altamente indesejadas e devem ser mitigadas de modo a garantir uma maior eficiência do sistema de modo geral.

O reservatório considerado consiste em um modelo básico, com duas entradas de água e duas saídas. Ele está diretamente conectado ao coletor solar, com a presença ou não de uma bomba para circulação forçada, através de um dos seus pares de conexões enquanto o outro par se destina a conectar o tanque diretamente a linha de água quente para consumo e a linha de abastecimento de água fria, através da qual será repostado o volume de água consumido.

Uma representação do reservatório pode ser vista a seguir:



Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2013).

O armazenamento de energia na forma de calor sensível na água com a variação de sua temperatura, se dá de acordo com a seguinte equação:

$$Q_s = (mC_p)_s \Delta T_s [W] \quad (41)$$

Onde, Q_s é a quantidade de energia acumulada, T_s é a temperatura no reservatório, m é a massa de fluido presente no reservatório e ΔT_s representa a diferença de temperatura entre o fluido em sua entrada de reposição e saída para consumo.

Considerando um reservatório sem estratificação de temperaturas, ou seja, no qual se considera que o fluido esteja completamente misturado, pode-se definir a seguinte equação para representar o balanço de energia:

$$(mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_u - \dot{L}_s - (UA)_s (T_s - T'_a) [W] \quad (42)$$

Em que Q_u representa a energia útil absorvida pelo coletor, \dot{L}_s representa a energia consumida pelo abastecimento de água quente, $(UA)_s$ é o coeficiente de perda para o tanque e T'_a é a temperatura ambiente ao redor do tanque. A diferenciação desta temperatura ambiente é feita pois pode haver diferenças consideráveis entre a temperatura ambiente ao redor do

coletor e ao redor do tanque, a depender do tipo de sistema e das condições locais de instalação.

A equação acima precisa ser integrada ao longo de um intervalo de tempo para conceder o resultado desejado. Conforme mencionado anteriormente, em se tratando de energia solar, costuma-se usar intervalos de tempo de uma hora para cálculos relacionado a quantidade de energia, de modo que usando o método de integração simples de Euler se chega a uma solução satisfatória (DUFFIE e BECKMAN, 2013), representada pela equação abaixo:

$$(T_S)^+ = T_S + \frac{\Delta t}{(mC_p)_S} [Q_u - L_S - (UA)_S(T_S - T'_a)] [^\circ\text{C}] \quad (43)$$

Onde, $(T_S)^+$ é a temperatura ao final do intervalo de tempo considerado, T_S é a temperatura inicial do intervalo de tempo considerado, Δt é o intervalo de tempo considerado.

Observa-se que na equação acima, estabelece-se um intervalo de tempo e são consideradas então as quantidades de energia que entram ou deixam o reservatório durante este intervalo, bem como são consideradas as temperaturas no seu início e fim, desse modo, se admite que as taxas de perda e ganho de energia não variam durante o intervalo.

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como finalidade a análise e proposição de novas ideias relacionadas ao projeto e utilização de sistemas para aquecimento de água com energia solar.

O processo conclusivo, será caracterizado por uma abordagem de ordem qualitativa e quantitativa, de modo que será dada bastante atenção aos resultados numéricos, contudo, serão feitas também observações oriundas da interpretação dos dados finais de modo a buscar um melhor entendimento acerca do tema abordado.

De maneira prática, será proposto um sistema de aquecimento solar que atenda a uma demanda de água aquecida estabelecida de acordo com a normatização vigente, acerca de suas características e de seu dimensionamento, buscando representar uma média de consumo de água quente para banho em residências. A partir daí, será feita a modelagem de um aquecedor solar compatível em software, seguindo com a análise da influência de parâmetros importantes, relativos ao sistema e ao ambiente em que se situa, no seu comportamento, de modo que seja avaliada a efetividade do sistema na satisfação da demanda estabelecida e que seja possível, então, ser realizada uma análise comparativa entre a performance do sistema em configuração de circulação forçada e natural.

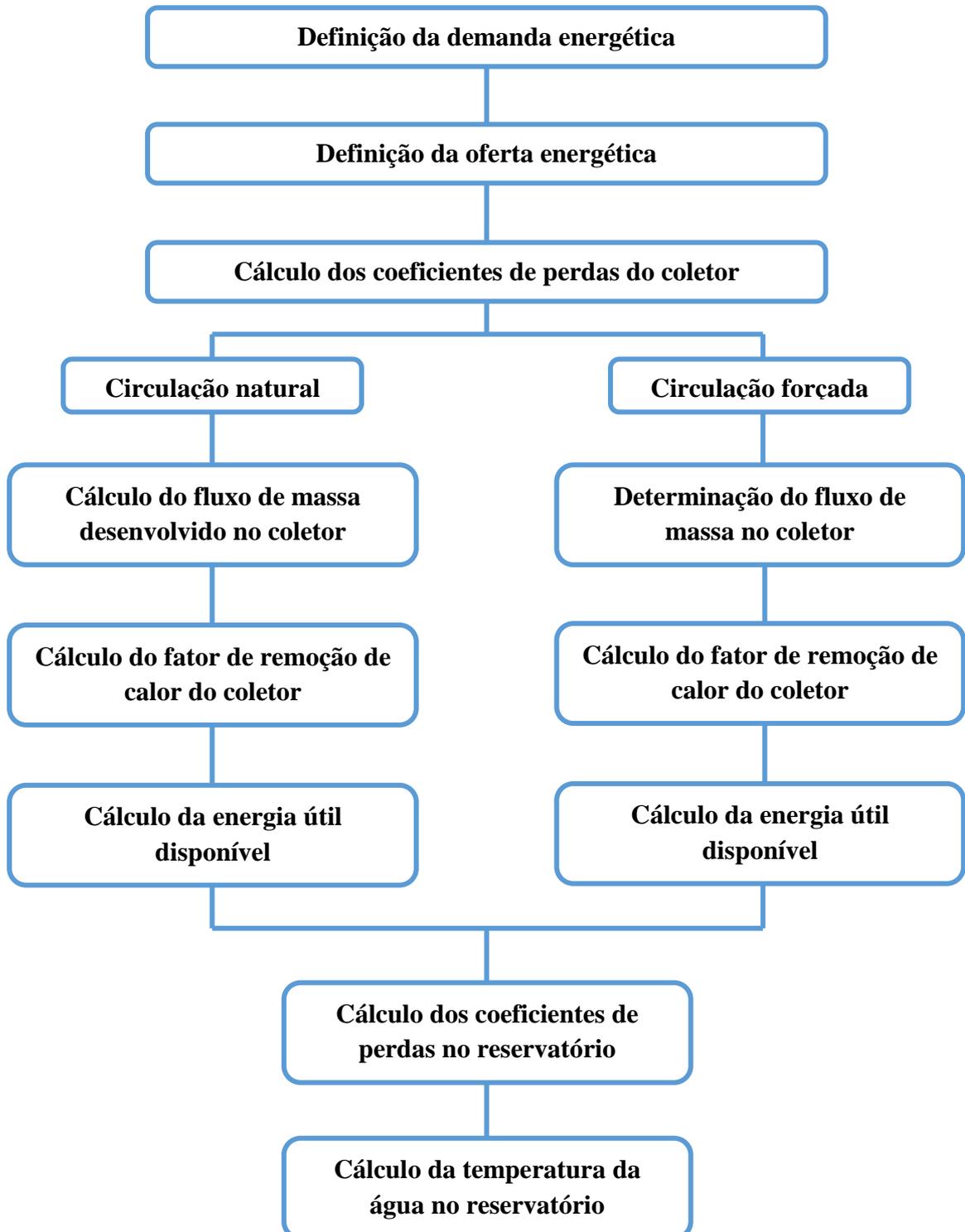
Será utilizado o software Engineering Equation Solver (EES) para a realização da modelagem matemática do sistema, bem como para a geração dos resultados.

3.1 MODELAGEM DO AQUECEDOR SOLAR

O projeto do aquecedor solar a ser avaliado neste trabalho se dará com base na definição dos componentes com um nível de complexidade capaz de fornecer parâmetros descritivos que possam ser usados na simulação e avaliação dos resultados, de modo a obter uma representação do comportamento de sistemas similares em geral, sem que necessariamente sejam fornecidos todos os dados e recomendações para a construção de fato de um aquecedor solar específico. Será analisado o comportamento do sistema e de algumas modificações acerca dos componentes utilizados e do seu modo de operação, de modo que se atenda a demanda estabelecida.

O fluxograma a seguir indica a ordem, de cima para baixo, dos cálculos das principais variáveis presentes na modelagem.

Figura 15 - Fluxograma de cálculos



Fonte: O Autor (2019).

3.1.1 Demanda De Água Quente

A demanda que deverá ser atendida pelo aquecedor solar se dá em um sistema de aquecimento de água residencial simples, cujo objetivo é armazenar água aquecida para sua utilização no banho.

A norma técnica brasileira NBR 15569, Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e Instalação, estabelece requisitos para um sistema de aquecimento solar, considerando aspectos de concepção, dimensionamento, instalação e manutenção, onde o fluido de transporte é considerado na determinação de parâmetros do coletor solar. Esta norma se aplica a coletores solares planos, com ou sem reservatórios térmicos e com ou sem sistema de aquecimento auxiliar. Além disso, essa norma se aplica tanto para sistemas com termossifão quanto com circulação forçada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002).

A partir desta norma, será definida a demanda de água aquecida em termos de volume e temperatura de uso, baseado na quantidade de pessoas que compõe a residência bem como no perfil de utilização da água.

A tabela abaixo, informa valores sugeridos para consumo residencial diário de água quente:

Tabela 2 - Referência de consumo para uso racional de água quente

Peças	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minuto/pessoa)	Temperatura de consumo °C
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39 – 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Banheira	80 L	440 L	banho	39 – 40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39 – 40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	ciclo de lavagem	39 – 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	ciclo de lavagem	39 – 40

Fonte: ABNT (2002).

O número de pessoas por domicílio no Brasil, segundo o último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é de 3,34 pessoas (BRASIL, 2010).

Desse modo, será considerado para este trabalho o número de 4 pessoas por domicílio, assim como também será considerado apenas o uso para ducha de banho, devido ao fato que serão considerados dados da região nordeste, mais especificamente da cidade do Recife, na qual não se faz uso de água aquecida para outros fins, comumente.

Assim, se estabelece um consumo de no máximo 15 litros por minuto, durante 10 minutos, para cada pessoa, de modo que se tem o consumo diário total de 150 litros por pessoa, o que resulta num consumo diário de água quente total na residência de 600 litros de água.

Para estabelecer o volume de armazenamento do aquecedor solar, se considera a seguinte fórmula (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002):

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz.} - T_{ambiente})} [Litros] \quad (44)$$

Onde, $V_{armaz.}$ é o volume de armazenamento de água do sistema, $V_{consumo}$ é o volume de consumo de água quente, $T_{consumo}$ é a temperatura de consumo da água quente, $T_{armaz.}$ É a temperatura de armazenamento da água quente e $T_{ambiente}$ é a temperatura ambiente do local.

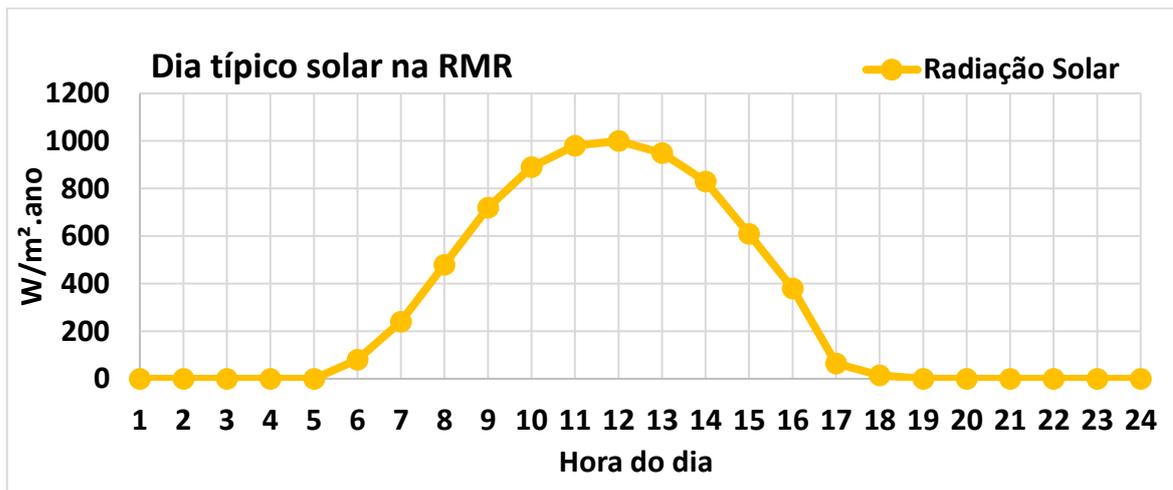
A temperatura para a ducha de banho recomendada é de 40°C (313,15 K) sendo a temperatura de armazenamento um valor maior ou igual a esta. Devido a possibilidade de perdas térmicas na tubulação hidráulica da instalação bem como as próprias perdas térmicas no reservatório, pode-se considerar a temperatura de armazenamento um valor um pouco mais alto, o qual se estabelecerá em 45°C (318,15 K). Já a temperatura ambiente para a cidade do Recife pode ser considerada de 29°C (302,15 K), segundo a média observada a partir de uma série de dados de 30 anos (CLIMATEMPO, 2019).

3.1.2 Energia Solar Incidente

Para avaliar o funcionamento do sistema solar de aquecimento de água, é essencial o uso de dados relativos à radiação solar incidente razoáveis, de modo que se tenha uma representação razoável do funcionamento do sistema em condições realistas.

Desse modo, serão considerados dados de radiação levantados para a realização do atlas de energia eólica e solar do estado de Pernambuco, no qual a cidade considerada na simulação se situa. Os dados relativos a radiação solar são apresentados na forma de um dia típico, que mostra os valores médios da irradiação solar ao longo de cada hora do dia, levando em consideração uma média anual para os dados, conforme imagem a seguir:

Figura 16 - Valores para irradiação incidente, dia típico

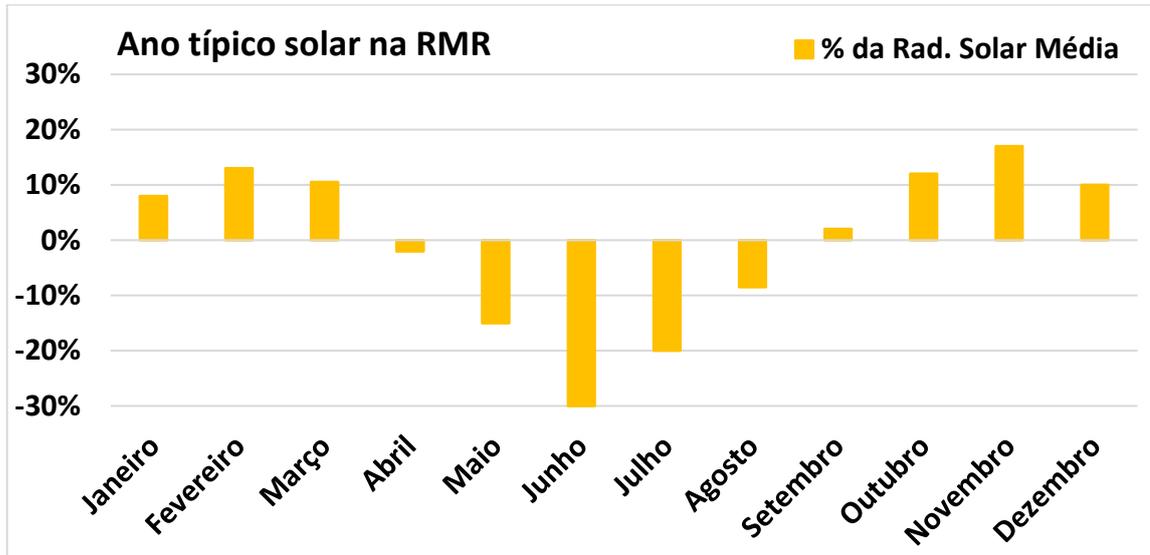


Fonte: Adaptado de Atlas de energia solar e eólica de Pernambuco (2017).

Considerando os valores mostrados no eixo da direita, têm-se então valores de irradiação médios ao longo de cada hora do dia. Esses valores serão admitidos como irradiação incidente sobre o coletor solar, de modo que serão realizados os cálculos de funcionamento de todo o sistema para cada hora do dia típico.

Ademais, será levada em conta também a variação nos níveis de radiação ao longo das estações no ano. Com base em dados também levantados na elaboração do atlas de energia solar e eólica de Pernambuco, pode-se estimar o nível de variação dos valores observados em dada época do ano, relativos aos valores típicos calculados, conforme pode-se ver adiante:

Figura 17 - Valores da variação anual da irradiação solar



Fonte: Adaptado de Atlas de energia solar e eólica de Pernambuco (2017).

Com isso, será considerado também nas simulações o cenário mais desfavorável ao longo do ano, no fornecimento de energia solar através da radiação incidente, com o objetivo de avaliar se o sistema consegue atender a demanda mesmo nos piores dias do ano, em relação a irradiação solar.

3.1.3 Coletor Solar

O coletor solar adotado será do tipo plano, com sua estrutura composta por uma placa de vidro externa, superfície absorvedora de alumínio, estrutura externa de alumínio e isolamento de poliuretano.

Para a placa absorvedora, será considerada uma pintura de tinta preta opaca aplicada ao alumínio, prática comum para maximizar as propriedades térmicas em relação a radiação, sendo considerado uma emissividade de 0,96 (Contemp).

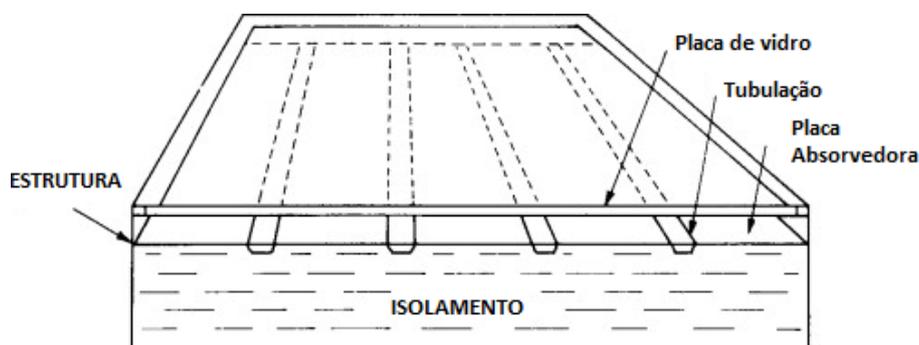
Para a cobertura externa, será considerado um vidro com emissividade em torno de 0,84, valor registrado em grande variedade de tipos de vidros comercializados (CB3E e ABIVIDRO, 2015).

Admite-se estruturalmente um espaçamento de 2 centímetros entre a placa absorvedora e a placa de vidro externa e isolamento de poliuretano na base e laterais com uma espessura de 3 centímetros e condutividade térmica de 0,02 W/m·K (PRASS).

Desse modo, a altura total do coletor ficará estabelecida em 6 centímetros, considerando toda a estrutura, enquanto o comprimento e a largura ficam definidos 150 e 100 centímetros, respectivamente.

Uma ilustração do coletor a ser modelado é mostrado na figura adiante:

Figura 18 - Ilustração do modelo de coletor solar



Fonte: Adaptado de MCVEIGH (1983).

Em relação as características de instalação do coletor, considera-se ideal um ângulo de inclinação em relação a horizontal que seja equivalente a soma da latitude do local de instalação mais 10 graus (HELIOTEK AQUECEDORES SOLARES E DE PISCINA, 2018).

Desse modo, devido ao local de instalação escolhido ter sido a cidade de Recife, a inclinação do coletor considerada será de 18 graus.

Abaixo, tem-se um resumo das características definidas para o coletor:

Tabela 3 - Características do coletor solar

Característica	Valor
Comprimento do coletor	1,50 m
Largura do coletor	1,00 m
Espaçamento entre vidro e placa	0,02 m
Espessura do isolamento	0,03 m
Diâmetro externo da tubulação	0,00952 m
Diâmetro interno da tubulação	0,00635 m
Distância horizontal entre tubos	0,125 m
Espessura da placa absorvedora	0,0015 m
Emissividade da placa absorvedora	0,96
Emissividade do vidro	0,84
Condutividade térmica do isolamento	0,02 W/K-m
Inclinação em relação a horizontal do coletor	18 graus

Fonte: O Autor (2019).

A partir da definição das características básicas do coletor e seus componentes, pode-se então prosseguir para a modelagem das equações.

3.1.3.1 Coeficiente De Transmissão De Calor Das Perdas

Devido ao fato de o coletor considerado ter apenas uma camada de vidro, têm-se uma resistência térmica a menos que no exemplo mostrado na seção 2.3.1, de modo que o circuito térmico do coletor solar se torna um pouco mais simplificado, conforme ilustrado adiante:

Figura 19 - Circuito térmico do coletor solar considerado



Fonte: O Autor (2019).

Em que R1 representa as resistências de radiação e convecção entre a camada externa de vidro e a atmosfera, sendo desconsiderada a condução na placa de vidro, R3 representa as resistências de radiação e convecção entre a camada externa de vidro e a placa absorvedora, R4 representa as perdas pela base e R5 representa as perdas pelas laterais, calculada proporcionalmente as perdas pela base.

Desse modo, o coeficiente total de perdas se dará por:

$$U_L = U_t + U_b + U_e = \frac{1}{R_1 + R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{(UA)_e}{A_c} \quad (26) \text{ e } (27)$$

O coeficiente de perdas do coletor pela superfície superior, U_t , depende dos valores de R_1 e R_3 , sendo R_1 , a resistência térmica entre a camada de vidro, c_1 , e o ambiente externo, uma vez admitida a temperatura da atmosfera local igual a temperatura ambiente, enquanto R_3 é a resistência térmica entre a placa absorvedora e a camada de vidro, descritas por:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c1-a}} \text{ e } R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (45) \text{ e } (12)$$

Assim:

$$U_t = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_w + h_{r,c1-a}} + \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \right)} \quad (46)$$

Em que:

$$h_w = 5,7 + 3,8V \quad (10)$$

$$h_{r,c1-a} = \sigma \varepsilon_{c1} (T_{c1} + T_s) (T_{c1}^2 + T_s^2) \quad (47)$$

$$h_{c,p-c1} = \frac{k}{l} \cdot \left(1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708 (\text{sen} 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right) \quad (21)$$

Com:

$$Ra = \frac{g\beta' \Delta T l^3}{\nu \alpha} \quad (22)$$

E:

$$h_{r,p-c1} = \frac{\sigma (T_p^2 - T_{c1}^2) (T_p + T_{c1})}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1} \quad (19)$$

Irá se utilizar para o valor da velocidade dos ventos incidentes sobre a placa o valor de 5 metros por segundo, verificado como aproximadamente o valor médio registrado sob condições normais (ESTATÍSTICAS, 2019).

Realizando a primeira iteração do procedimento, admitindo uma temperatura de 70°C (343,15 K) para a placa absorvedor e uma temperatura da camada de vidro sendo 20 graus inferior a temperatura da placa absorvedora, portanto de 50°C (323,15 K), tem-se, então os valores para R1, R3 e U_t .

Agora, com esse valor de U_t , recalcula-se o valor da temperatura do vidro, para avaliar se a estimativa inicial foi boa o suficiente, através da equação abaixo:

$$T_{c1} = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (23)$$

Desse modo, caso a temperatura obtida fique mais de 10 graus inferior a estimada inicialmente, se faz necessário recalcular os parâmetros com uma nova estimativa da temperatura do vidro.

Agora, utilizando a temperatura do vidro adequada, chega-se ao valor definitivo para as resistências e para o coeficiente de perdas pela superfície.

Em seguida, prossegue-se para o cálculo do coeficiente de perdas pela base do coletor, U_b , atrever do cálculo da resistência térmica equivalente a atuação do isolante térmico. Assim, tem-se:

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \quad (48)$$

Agora, deve-se calcular as perdas de energia pelas laterais, de acordo com a equação abaixo:

$$U_e = \frac{(UA)_e}{A_c} \quad (25)$$

Desse modo, pode-se estabelecer o coeficiente total de perdas do coletor solar conforme:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (26)$$

3.1.3.2 Fator De Remoção De Calor Do Coletor

Para o cálculo do fator de remoção de calor, é necessário antes calcular o fator de eficiência do coletor, baseado nos seus parâmetros construtivos, através da seguinte fórmula:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (30)$$

Com:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (31)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (32)$$

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (33)$$

Vale observar que a condutância da junção entre o tubo condutor de fluido e a placa absorvedora tem importante influência na eficiência do coletor, visto que se o contato entre os dois não for estabelecido corretamente o seu valor pode ser substancialmente baixo. Contudo, considera-se nesse caso que o tubo é soldado a placa, o que estabelece um contato adequado e torna a condutância um valor elevado, de modo que o termo em que ele aparece na equação assume valores muito pequenos.

Também vale salientar que o coeficiente de transferência de calor entre o tubo e o fluido é dependente do regime de escoamento do fluido, aumentando à medida que o número de Reynolds do fluido cresce, ou seja, à medida que o fluxo se torna mais turbulento. Para a aplicação no caso em estudo, todavia, pode-se assumir um fluxo laminar. Com isso, chega-se ao fator de eficiência do coletor, F' .

Agora, com esses valores definidos, pode-se calcular o fator de remoção de calor do coletor de acordo com o seguinte:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (38)$$

3.1.3.3 Fluxo No Coletor

Aqui, se faz importante a distinção entre os dois tipos de sistemas a serem avaliados, em circulação natural e em circulação forçada. No caso da circulação forçada, usa-se o fluxo de fluido constante determinado para a operação do sistema, enquanto no de circulação natural, se faz necessário determinar o comportamento do fluxo de acordo com a evolução do funcionamento do coletor.

Simple técnicas de análises empregadas no funcionamento de coletores solares em diversos estudos confirmam uma estimativa de que nos sistemas de circulação natural há uma elevação de temperatura constante de aproximadamente 10°C entre a entrada e a saída do fluido, contando que esses sistemas tenham um projeto razoavelmente equilibrado e fluxo do fluido com alta restrição, ou seja, em sistemas onde não há altos valores de fluxo do fluido circulante (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Utilizando o método observado, descrito acima, pode-se descrever o fluxo no sistema com circulação natural, assumindo que o fator de eficiência do coletor não seja diretamente relacionado ao fluxo do fluido em si, pelo cálculo a seguir:

Sabendo que:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (39)$$

E substituindo nessa equação a equação do fator de remoção de calor, chega-se a:

$$\dot{m} = \left[\frac{-U_L F' A_c}{C_p \ln \left\{ 1 - \frac{U_L (T_{fo} - T_{fi})}{S - U_L (T_{fi} - T_a)} \right\}} \right] \quad (49)$$

De modo que se pode então determinar o valor do fluxo para o coletor funcionando com circulação natural.

Já no caso da configuração com circulação forçada, simplesmente se estabelece o valor do fluxo, \dot{m} , que será constante durante o funcionamento do sistema, de acordo com a configuração da bomba de circulação utilizada. Com isso, pode-se usar a mesma fórmula apresentada acima para o fator de remoção de calor do coletor, de modo que, de posse dos

valores do fator de remoção e da vazão de fluido no coletor, pode-se calcular a energia útil absorvida no coletor.

3.1.3.4 Energia Útil Absorvida

Para o caso do sistema em termossifão, considerando a estimativa adotada de um ganho de temperatura de 10° C do fluido após a passagem pelo coletor solar, pode-se calcular o ganho de energia térmica do fluido a ser armazenada no reservatório, ao longo do intervalo de tempo padrão estabelecido de uma hora, através da fórmula adiante:

$$Q_u = (\dot{m}.C.\Delta T) * 3600 = (\dot{m}.C.10) * 3600 \quad [W] \quad (50)$$

Já para o caso do sistema em circulação forçada, no qual não se faz a estimativa de ganho de temperatura, mas se usa o valor fixo determinado da vazão de água através do coletor, têm-se:

$$Q_u = A_C F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad [W] \quad (39)$$

Com isso, fica descrito o comportamento do coletor solar em termos de ganhos energéticos nas duas configurações de funcionamento, de modo que se faz necessária a análise do comportamento da água armazenada no reservatório, diante desse fornecimento de energia.

3.1.4 Reservatório De Água Quente

Conforme o modelo estabelecido do reservatório, com quatro vias de acesso, sendo duas delas a entrada e saída de água para a circulação no coletor solar e as outras duas a saída de água quente para consumo e a entrada de água fria de reposição, pode-se estabelecer o balanço energético para definir os parâmetros relativos a água armazenada, bem como a forma como se comportam ao longo do tempo.

Será considerado o ganho de energia promovido pelo coletor, e a perda de energia promovida pela reposição da água quente que sai para consumo com a água fria de reabastecimento. Desse modo, considera-se que o reservatório sempre se mantém cheio.

O perfil de consumo da água quente considerado será tal que a água só será utilizada, total ou parcialmente, após o período da tarde, de modo que o reservatório irá receber energia térmica do coletor durante o dia, e perderá energia térmica a noite quando a água quente for consumida além disso, considera-se sempre que a temperatura da água contida no reservatório, após o uso, no início do dia é igual a temperatura ambiente média.

Com isso, torna-se interessante analisar o comportamento do sistema ao longo do dia, considerando o intervalo de tempo padrão estabelecido de uma hora, de modo a avaliar a temperatura da água no reservatório, a fim de avaliar se o aquecedor solar é capaz de atender a demanda energética já estabelecida através do volume e temperatura da água a ser consumida.

Dessa maneira, será considerado, para cada intervalo de uma hora do dia, a energia fornecida pelo coletor e a energia perdida devido as perdas por transferência de calor através da superfície do tanque. A energia perdida no consumo de água quente, devido as condições de consumo definidas que restringem o consumo da água apenas no período noturno.

Em relação aos aspectos construtivos, será considerado um cilindro de volume interno correspondente ao volume necessário para atender a demanda de água quente, de 412,5 litros, tendo 72 centímetros de diâmetro por 1 metro de altura. O isolamento considerado será uma camada de poliuretano de três centímetros de espessura ao longo de toda área exposta, área essa de aproximadamente 2,7 metros quadrados.

Com isso, o balanço energético no tanque se dá por:

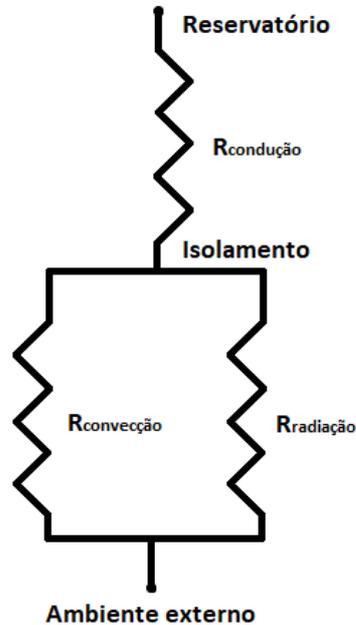
$$Q_u - Q_{perdas} = (m_{total} C_p \cdot \Delta T_S) \quad (51)$$

$$Q_u - (UA)_S (T_{S0} - T_a) = (m_{total} C_p \cdot \Delta T_S) \quad (52)$$

As perdas de calor dadas através da parede externa do tanque, serão calculadas levando em consideração a existência de uma camada de poliuretano de 1 centímetro de espessura, ao redor de toda a sua área externa. Desse modo, referente a energia perdida, será considerada a transferência de calor entre o tanque e o material isolante por condução e entre o isolante e a atmosfera por convecção e radiação.

Para calcular essa perda, basta definir o coeficiente global de transferência de calor, o que pode ser feito de acordo com o circuito térmico a seguir:

Figura 20 - Circuito térmico no reservatório



Fonte: O Autor (2019).

A resistência de condução pode ser indicada, da lei de Fourier, por:

$$R_{condução} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi Lk} \quad (53)$$

Em que r_{ext} e r_{int} são os raios externo e interno do reservatório e L é a altura do reservatório, para o caso de um reservatório cilíndrico.

Para obter a resistência de convecção, leva-se em conta, no cálculo do coeficiente de convecção, a estimativa de temperatura uniforme no reservatório e se dará com base na correlação para o número de Nusselt sugerida por Morgan, indicada a seguir:

$$Nu = \frac{h_c D}{k} \quad (54)$$

Bem como na correlação sugerida por Churchill e Chu:

$$Nu = \left\{ 0,60 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (55)$$

Essa correlação se aplica para números de Rayleigh de ordem de grandeza inferior a um trilhão, de modo que o seu cálculo se faz por:

$$Ra = \frac{gBD^3(T_{iso} - T_a)}{\nu\alpha} \quad (56)$$

Considerando os dados de viscosidade cinemática, difusividade térmica e coeficiente de expansão térmica do ar à temperatura ambiente.

Diante da obtenção do número de Nusselt, pode-se então calcular o coeficiente convectivo para a perda de energia no reservatório, como:

$$h_c = \frac{Nu k}{D} \quad (57)$$

Sendo, então:

$$R_{convecção} = \frac{1}{h_c} \quad (58)$$

Por fim, pode-se definir o coeficiente de radiação para a troca de energia entre o isolamento e o ambiente como o seguinte:

$$h_r = \varepsilon_{iso}\sigma(T_{iso}^2 + T_a^2)(T_{iso} + T_a) \quad (59)$$

Sendo, portanto:

$$R_{radiação} = \frac{1}{h_r} \quad (60)$$

Com isso, chega-se ao coeficiente global de perdas no reservatório:

$$U_s = \frac{1}{R_{condução} + \frac{1}{R_{convecção} + R_{radiação}}} \quad (61)$$

A partir daí, definidas a energia útil ganha pelo coletor, bem como as perdas térmicas no reservatório, pode-se usar novamente a equação do balanço de energia no reservatório, de modo a obter o seu perfil de temperaturas desenvolvido ao longo do dia, reorganizando-a como segue:

$$Q_u - (UA)_s(T_{S0} - T_a) = (m_{total}C_p \cdot \Delta T_S) \quad (62)$$

$$\Delta T_S = T_S - T_{S0} = \frac{Q_u - (UA)_s(T_{S0} - T_a)}{m_{total}C_p} \quad (63)$$

$$T_S = T_{S0} + \frac{Q_u - (UA)_s(T_{S0} - T_a)}{m_{total}C_p} \quad (64)$$

4 RESULTADOS

Adiante, segue tabela com os valores de algumas variáveis intermediárias que servem de base para o cálculo dos resultados posteriores.

Tabela 4- Variáveis Intermediárias

Variável	Valor
Resistência R1	0,03311 m ² .K/W
Resistência R3	0,1124 m ² .K/W
Resistência R4	1,304 m ² .K/W
Fator de eficiência do coletor	0,954 m ² .K/W
Coeficiente de perdas pela base	0,7667 W/m ² .K
Coeficiente de perdas pelo topo	6,87 W/m ² .K
Coeficiente de perdas pela lateral	0,00276 W/m ² .K
Coeficiente global de perdas no coletor	7,64 W/m ² .K
Volume de armazenamento do reservatório	412,5 l

Fonte: O Autor (2019).

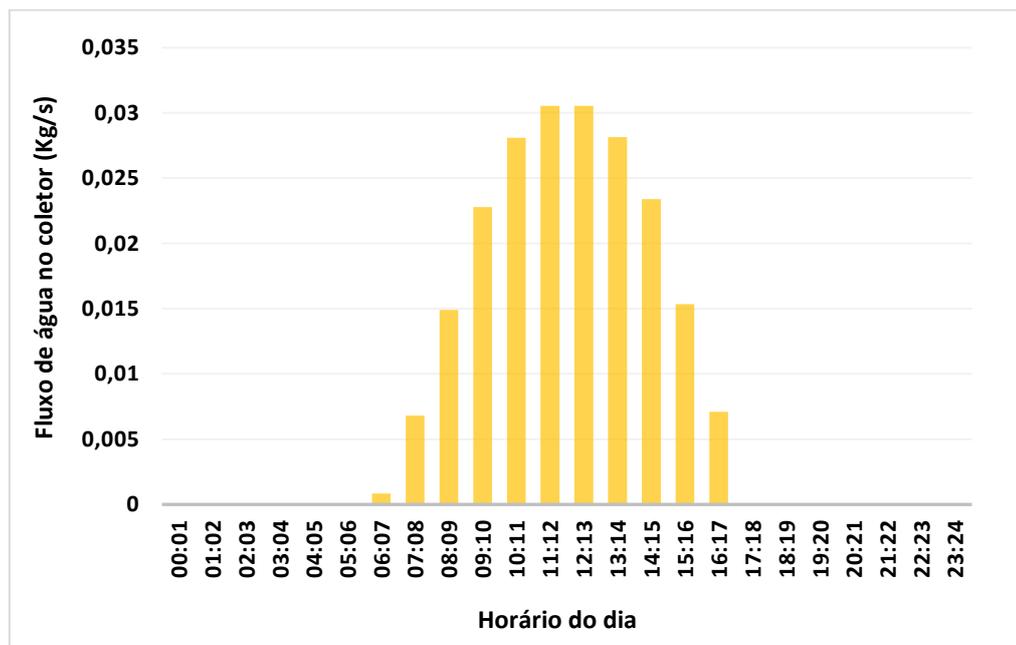
Agora, diante desses valores e após a realização dos cálculos para cada um dos períodos de uma hora, chega-se aos seguintes valores para fluxo de água no coletor, energia útil adicionada ao reservatório pelo coletor e temperatura da água no reservatório.

4.1 CIRCULAÇÃO DE FLUIDO NO COLETOR SOLAR

Para o caso da circulação natural, a própria energia absorvida pelo coletor é responsável por gerar a circulação de fluido, através de seu progressivo aquecimento, até que se estabeleçam diferenças de densidade suficientes para gerar o fluxo em si.

Com base na radiação solar apresentada no dia típico para o caso em análise, têm-se o seguinte desenvolvimento do fluxo de fluido no coletor solar:

Figura 21 - Fluxo de água no coletor em circulação natural



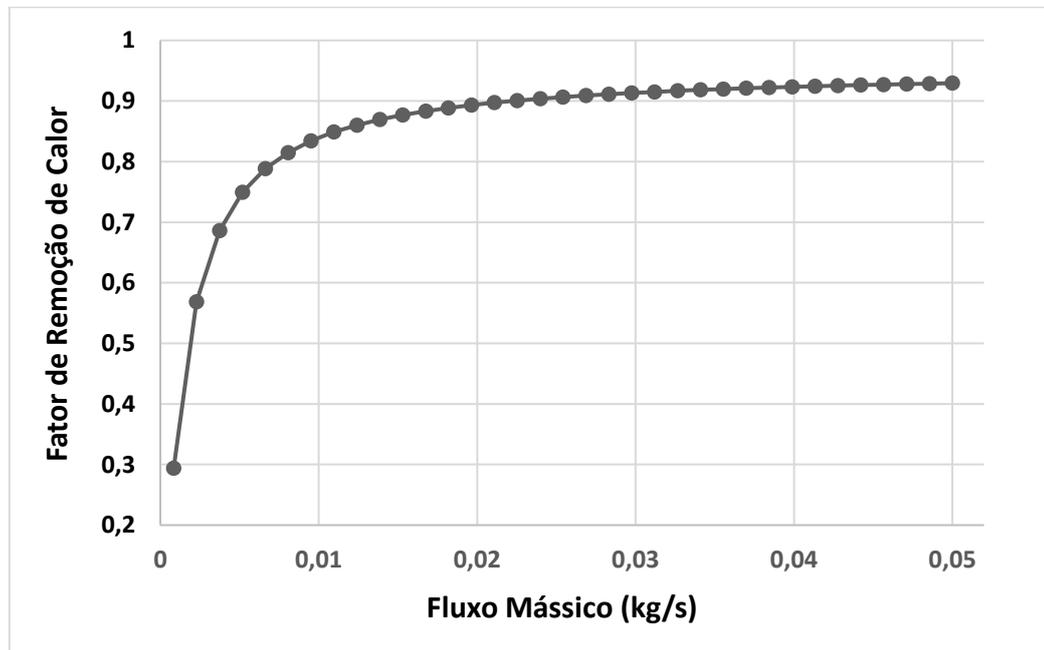
Fonte: O Autor (2019).

Pode-se ver que o fluxo de água começa no sistema com circulação natural, começa a se desenvolver a partir da sétima hora do dia, atingindo os picos na décima segunda e décima terceira horas e diminuindo até cessar, após a décima sétima hora.

Numericamente, o fluxo variou entre 0,000843 kg/s até 0,03053 kg/s, sendo o valor médio observado de 0,01895 kg/s. Esses valores foram então tomados como referência para o fluxo do sistema em circulação forçada, de modo a comparar os resultados das duas configurações.

Devido a possibilidade do controle do fluxo de água pelo coletor no sistema com circulação forçada, foi feita uma análise da influência do fluxo de água na atuação do sistema, observando o fator de remoção de calor do coletor, para um intervalo um pouco mais abrangente de valores para o fluxo de água, como mostrado a seguir:

Figura 22 - Fator de remoção de calor do coletor x fluxo de água. Circulação forçada



Fonte: O Autor (2019).

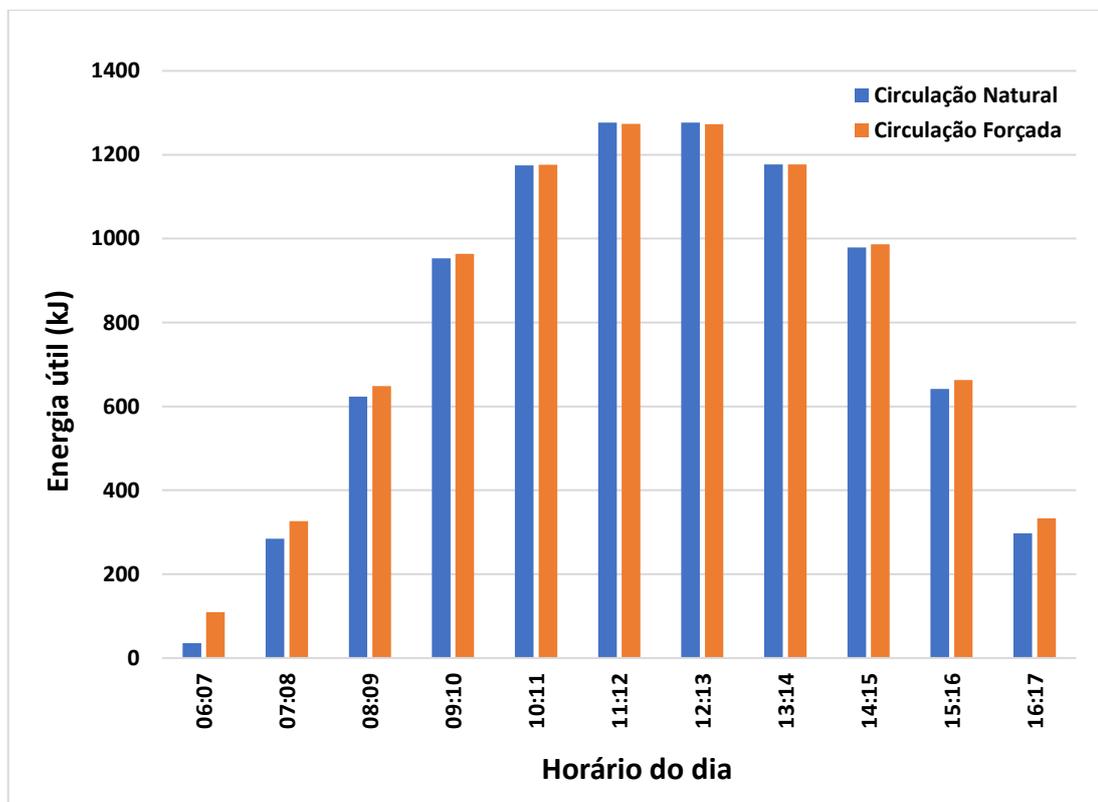
Com a análise do gráfico, nota-se que à medida que os valores de fluxo aumentam, o fator de remoção tende a crescer cada vez com menos intensidade, convergindo para um valor um pouco acima de 0,9.

Desse modo, usando as referências de valores mínimo, médio e máximo observados no sistema com circulação natural, considera-se razoável adotar o valor máximo do fluxo observado no sistema em configuração de circulação natural de 0,03053 kg/s como valor fixo a ser usado na configuração de circulação forçada, devido ao fato de representar o sistema em sua eficiência já bastante próxima do limite prático, garantindo uma operação do coletor em situação próxima da ideal.

4.2 ENERGIA ÚTIL DO SISTEMA

Observados os ganhos de energia pelo coletor solar e as perdas pela transferência de calor através da superfície do reservatório, tem-se os seguintes valores para o saldo de energia adicionado ao reservatório para as configurações com circulação natural e forçada:

Figura 23 - Energia útil adicionada ao reservatório. Circulação Natural x Circulação Forçada



Fonte: O Autor (2019).

No sistema em circulação forçada, observa-se um aumento mais expressivo na energia adicionada ao reservatório nas primeiras e nas últimas horas de funcionamento do sistema no sistema com circulação forçada, devido ao fato de o fluxo fixado ser maior do que o fluxo desenvolvido naturalmente nessas horas no sistema em circulação natural.

Para as horas com maior nível de radiação solar, onde o sistema em circulação natural também atinge altos valores de fluxo de água pelo coletor, verifica-se que há um comportamento muito similar, podendo o sistema em circulação natural até superar o sistema com circulação forçada, mesmo que por muito pouco.

As diferenças entre os valores de energia absorvida nas duas configurações do sistema podem ser verificadas em mais detalhes a seguir:

Tabela 5 - Energia útil (kJ) adicionada ao reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada

	06:07	07:08	08:09	09:10	10:11	11:12	12:13	13:14	14:15	15:16	16:17	Total
Circ. Natural	35,26	284,5	623,3	953,1	1175	1277	1277	1177	978,8	641,9	297,2	8720,06
Circ. Forçada	109,7	326,7	648,7	963,7	1176	1274	1273	1177	986,4	663,1	333,2	8931,50
Diferença	74,44	42,2	25,4	10,6	1	-3	-4	0	7,6	21,2	36	211,44
Aumento	211,1%	14,8%	4,1%	1,1%	0,1%	-0,2%	-0,3%	0,0%	0,8%	3,3%	12,1%	2,4%

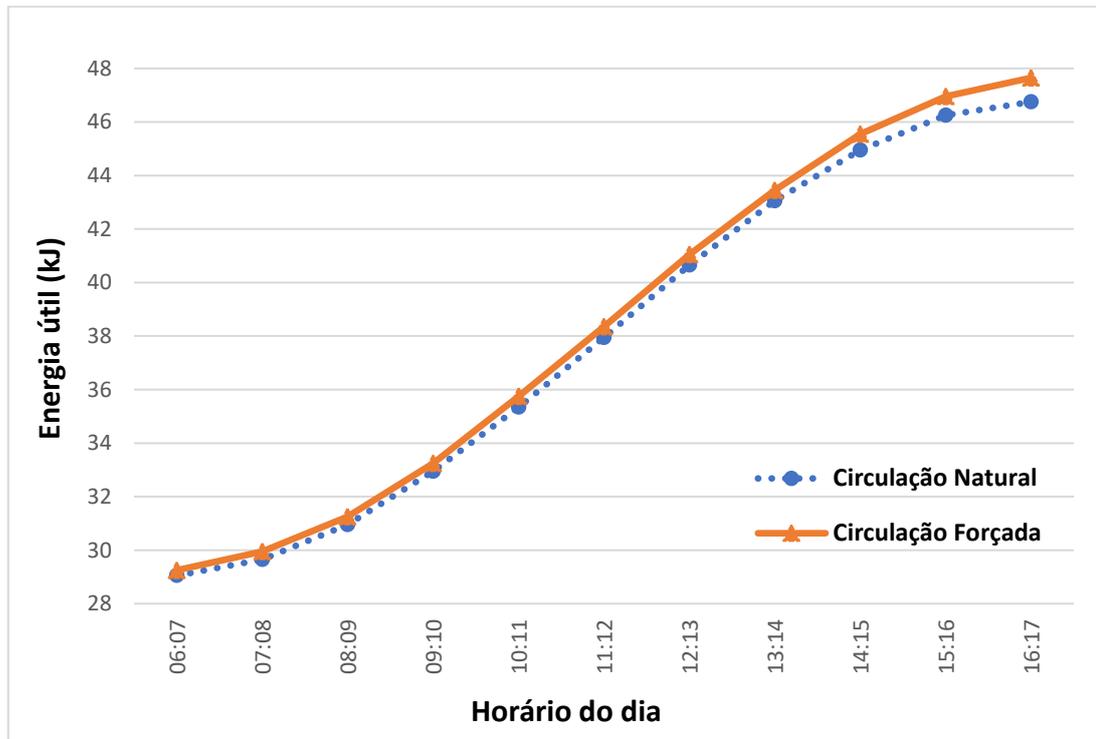
Fonte: O Autor (2019).

Observa-se que apesar de ocorrerem as variações destacadas anteriormente, no total, o aumento na energia útil absorvida ao longo do dia no sistema em circulação forçada é bastante baixo, de apenas 2,4%. É interessante notar também que, mesmo com um aumento de mais de 200% verificado na primeira hora de funcionamento entre as configurações do sistema, a magnitude da energia adicionada durante essa hora é bastante pequena se comparada a energia total absorvida, o que faz com que esse expressivo aumento não tenha tanto efeito assim no pequeno aumento geral observado.

4.3 TEMPERATURA DA ÁGUA ARMAZENADA NO RESERVATÓRIO

Para o sistema em circulação natural, a temperatura da água contida no reservatório evoluiu ao longo do dia típico conforme o gráfico adiante:

Figura 24 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada.



Fonte: O Autor (2019).

Observa-se que em ambos os sistemas foi ultrapassado o valor recomendado de 40 graus Celsius (Tabela 2) para a temperatura da água armazenada no reservatório bem como o valor de 45 graus Celsius considerado anteriormente, levando em conta uma margem de segurança para eventuais perdas.

O sistema em circulação forçada obtém temperaturas mais altas, contudo, observa-se que o ganho relativo em relação ao sistema em circulação natural, ao fim do dia, é bastante pequeno, de apenas 1,9%, conforme detalhado adiante:

Tabela 6 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada

Horário:	06:07	07:08	08:09	09:10	10:11	11:12	12:13	13:14	14:15	15:16	16:17
Circ. Natural	29,05	29,65	30,95	32,95	35,35	37,95	40,65	43,05	44,95	46,25	46,75
Circ. Forçada	29,25	29,95	31,25	33,25	35,75	38,35	41,05	43,45	45,55	46,95	47,65
Diferença	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,9
Aumento	0,7%	1,0%	1,0%	0,9%	1,1%	1,1%	1,0%	0,9%	1,3%	1,5%	1,9%

Fonte: O Autor (2019).

4.4 ANÁLISE EM CENÁRIO DESFAVORÁVEL

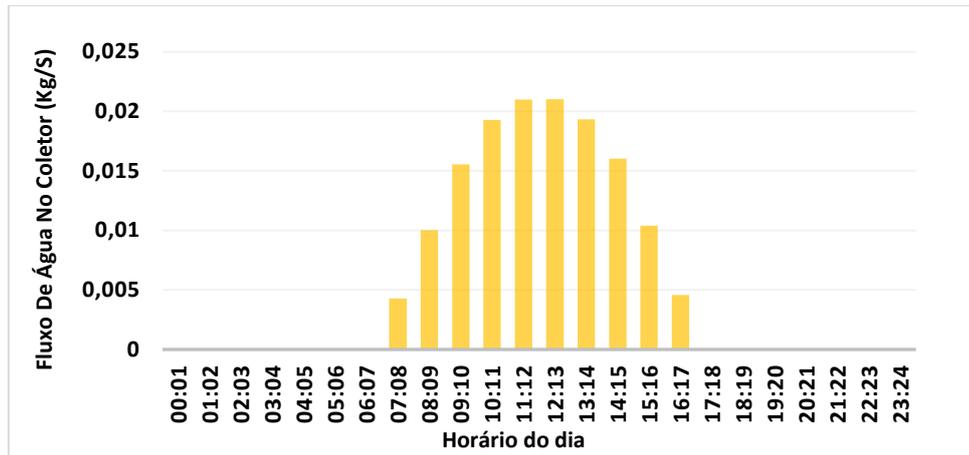
Devido a atuação de fatores climáticos como as estações do ano e o desenvolvimento do clima local a disponibilidade de radiação solar varia ao longo dos meses, conforme mostrado na figura 16.

Levando em conta as consideráveis quedas nos níveis de radiação solar em relação à média geral, que ocorrem ao longo do período de inverno de abril a agosto, se considerou pertinente desenvolver uma análise adicional do comportamento do sistema, buscando avaliar se este ainda seria capaz de atender a demanda estabelecida, mesmo em condições relativamente adversas.

Foram calculadas as variáveis com os dados de radiação solar reduzidos em 30 %, valor obtido ao se verificar o mês em que há a maior queda relativa na radiação ao longo do período observado, mantendo o valor do fluxo mássico no sistema em configuração forçada o mesmo estabelecido anteriormente.

Com essas novas condições, o fluxo de água no sistema em circulação natural se desenvolveu uma hora mais tarde do que o observado nas condições típicas anuais, conforme mostrado no gráfico a seguir:

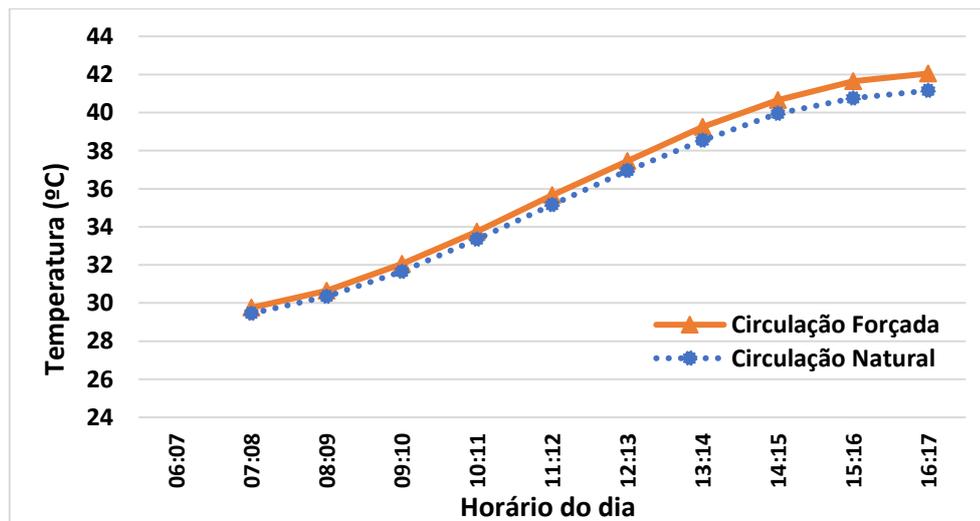
Figura 25 - Fluxo mássico de água pelo coletor solar. Sistema em circulação natural. Cenário desfavorável



Fonte: O Autor (2019).

Já em relação as temperaturas obtidas no reservatório ao longo do funcionamento do sistema, tanto no caso da circulação natural quanto no da circulação forçada, foram obtidos valores inferiores ao cenário normal, o que já era esperado devido a diminuição da radiação, conforme os gráficos adiante:

Figura 26 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo circulação natural x circulação forçada. Cenário desfavorável.



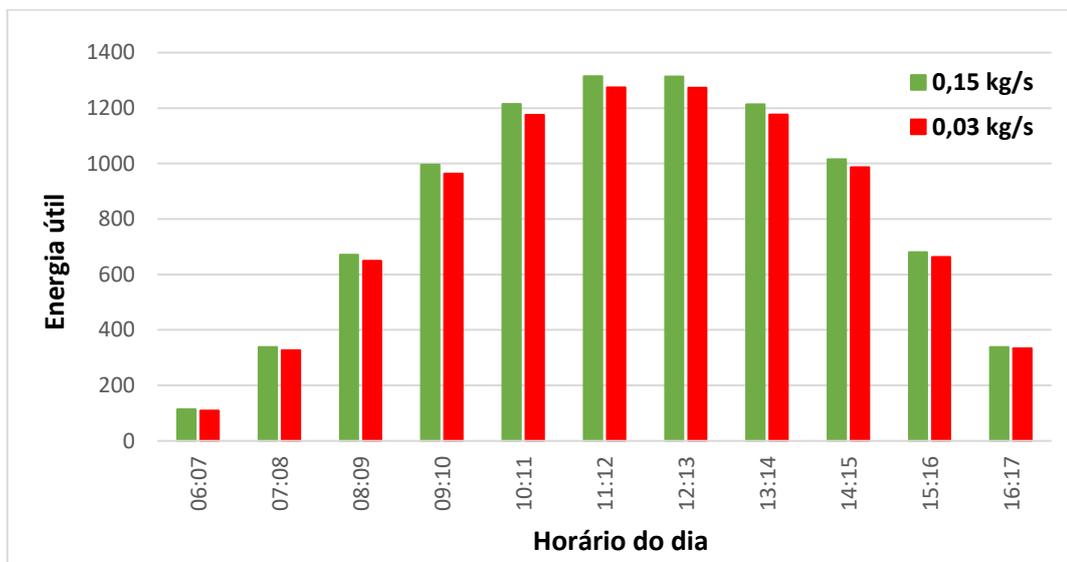
Fonte: O Autor (2019).

Apesar da diminuição nas temperaturas finais obtidas no reservatório, verifica-se que o sistema ainda é capaz de atingir temperaturas superiores ao valor recomendado, de 40 graus (Tabela 2), tanto em circulação natural quanto em circulação forçada.

4.5 ANÁLISE DO FLUXO EM CIRCULAÇÃO FORÇADA

Com a possibilidade de se utilizar qualquer valor desejado para o fluxo de água no sistema em circulação forçada, segue adiante uma análise da influência de se utilizar valores mais elevados de fluxo mássico pelo coletor e a influência nos resultados. Para essa análise, foram calculados os valores de energia útil e temperatura da água no reservatório do sistema em circulação forçada na situação típica de níveis de radiação solar e com um valor de fluxo cinco vezes superior ao valor adotado anteriormente, os quais estão representados adiante:

Figura 27 - Energia útil adicionada ao reservatório. Comparativo com diferentes valores de fluxo mássico em circulação forçada.

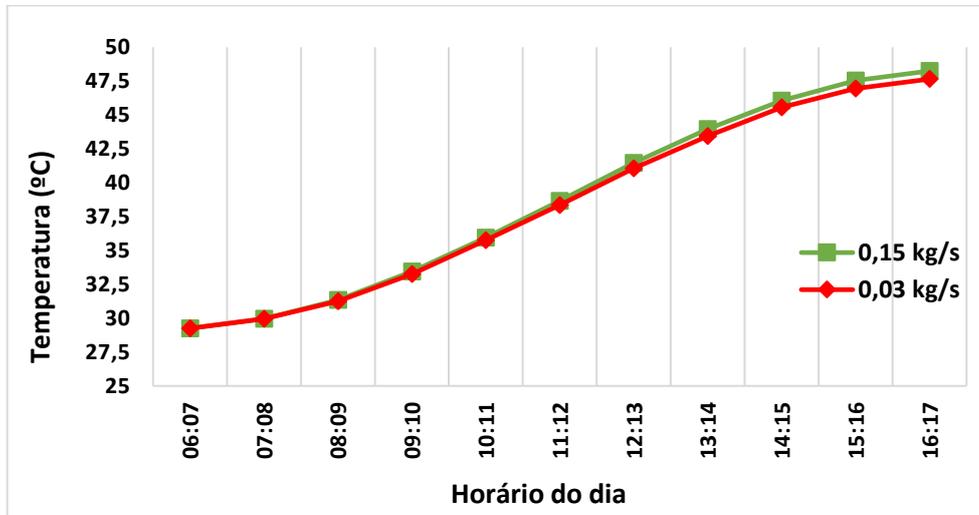


Fonte: O Autor (2019).

Percebe-se que ambos os sistemas apresentam resultados semelhantes, com um pequeno ganho na média de 3% em favor do sistema com circulação cinco vezes superior.

Já em relação as temperaturas atingidas, tem-se os valores a seguir:

Figura 28 - Temperatura da água no reservatório. Comparativo com diferentes valores de fluxo mássico em circulação forçada.



Fonte: O Autor (2019).

Nesse caso, novamente percebe-se uma leve vantagem para o sistema com o fluxo cinco vezes maior, contudo, apenas de 0,7% na média.

Um dado relacionado ao comportamento mostrado acima é o fator de remoção de calor do coletor solar. Seu valor com o fluxo normal é de 0,9143, enquanto o valor para o fluxo multiplicado por cinco é de 0,9459, indicativos do comportamento mostrado na figura 22.

5 CONCLUSÃO

A avaliação sobre os tipos de configuração possíveis, com relação a circulação da água pelo coletor, forçada ou natural, bem como as considerações feitas ao longo do desenvolvimento do modelo matemático a respeito do comportamento dos componentes relacionado também a oferta de energia solar local e a demanda de energia térmica, contribuem para a verificação da viabilidade desses tipos de sistemas na prática.

O entendimento obtido da influência dos diversos fatores, tanto construtivos quanto operacionais, no comportamento desse tipo de sistema, bem como das diferenças fundamentais entre as duas configurações avaliadas, pode servir como referência para projetos que busquem atender a tipos de demandas similares a estabelecida, usando a tecnologia de aquecimento solar de água.

Em respeito a comparação dos sistemas funcionando com circulação natural e forçada, diferenças podem ser percebidas mais claramente durante os horários do dia em que não há radiação solar em abundância, especificamente no início da manhã e final da tarde, situação na qual o sistema com circulação natural opera com valores de fluxo muito baixos, o que o faz perder bastante eficiência. Já nos horários com maior incidência de radiação solar, observa-se uma proximidade muito grande entre os valores de energia e de temperatura do reservatório entre os dois sistemas, uma vez que o fluxo em ambos os sistemas é alto o suficiente para que o coletor opere próximo de sua eficiência máxima, com leve vantagem para o sistema de circulação natural nos horários de pico de radiação. De fato, a análise do sistema com circulação forçada e fluxo cinco vezes maior indica que os ganhos em eficiência do sistema e seu desempenho como um todo, têm pouco a crescer com o aumento do valor de fluxo mássico no coletor.

Levando em conta o funcionamento do sistema de maneira geral, verifica-se que ambos os sistemas obtêm êxito no atendimento das demandas estabelecidas. Cabe a partir disso, a nível técnico, verificar fatores como complexidade, manutenibilidade e confiabilidade de ambas as configurações, de modo que se pode afirmar que o sistema em circulação natural leva vantagem nesses aspectos por ter um componente, a bomba hidráulica, a menos.

Também vale salientar a diferenciação dos dois sistemas do ponto de vista econômico, sendo o sistema com circulação natural mais interessante novamente devido aos custos iniciais de aquisição de componentes e de instalação do sistema como um todo serem mais

baixos, graças ao seu menor nível de complexidade. Desse modo, pode-se dizer que para o caso analisado neste trabalho, o sistema em circulação natural é a melhor opção.

Vale ressaltar, contudo, que o sistema na configuração de circulação natural só poderá ser usado nos casos em que sejam atendidos os requisitos de posicionamento adequado dos componentes para permitir a ocorrência do termossifão. Nos casos em que se faz necessária certa flexibilização na disposição dos componentes na instalação em relação a configuração padrão, como no caso de aquecimento de piscinas em nível térreo em que o coletor solar se localiza acima do reservatório de água quente, se torna obrigatória a utilização da circulação forçada.

Além disso, os fatores externos relacionados ao clima têm influência direta no comportamento do sistema, sendo necessária também avaliação a respeito da viabilidade de seu uso em possíveis situações desfavoráveis, como na presença de temperaturas muito baixas ou ventos muito intensos, os quais certamente atuarão na diminuição de sua eficiência.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se estabelecer o dimensionamento detalhado dos componentes do sistema, com componentes disponíveis no mercado, para a análise da viabilidade econômica do emprego de sistemas de aquecimento solar similares ao estudado neste trabalho, comparativamente as soluções usadas mais comumente, sejam os aquecedores a gás, ou o chuveiro elétrico. Além disso, pode-se sugerir também a construção de um protótipo e o estudo de sua operação para validação do modelo matemático, de modo a verificar sua precisão e avaliar a necessidade de aprimoramentos.

REFERÊNCIAS

AHSAN, F. **12 DIY Solar water heaters to reduce your energy bills**. 2015. Disponível em: <https://theselfsufficientliving.com/12-diy-solar-water-heaters-to-reduce-your-energy-bills/>. Acesso em: 8 nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569**: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

BOIMEL, M. Piscineiros: a garantia de água saudável e cristalina em sua piscina. **ANAPP**, São Paulo, v. 133, p. 30-33, mai./jun. 2017. Disponível em: <http://www.anapp.org.br/noticias/tratamento-da-piscina-piscineiros-a-garantia-de-agua-saudavel-e-cristalina-em-sua-piscina/>. Acesso em: 10 out. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - Série Completa, 1970 - 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompleta.aspx>. Acesso em: 8 set. 2017.

BRASIL. Presidência da República. **IBGE diz que número de pessoas que moram no mesmo domicílio caiu - governo do Brasil**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/governo/2010/09/ibge-diz-que-numero-de-pessoas-que-moram-no-mesmo-domicilio-caiu>. Acesso em: 23 mar. 2019.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa - uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH EDITORA, 2012.

CLIMATEMPO. **Climatologia - Recife - PE**. 2019. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/259/recife-pe>. Acesso em: 23 mar. 2019.

COLETOR solar - Tubo de Vácuo. Disponível em: <http://broilo.com.br/produtos/coletor-solar-tubo-de-vacu/>. Acesso em: 10 nov. 2017.

COLETOR solar modular com 60 tubos a vácuo. Disponível em: <http://solarsist.com.br/produto/coletor-solar-modular-com-60-tubos-a-vacu/>. Acesso em: 10 nov. 2017.

DIY Solar Heater. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/548594798335456615/?lp=true>. Acesso em: 8 nov. 2017.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

ESTATÍSTICAS de vento & condições atmosféricas - Recife Aeroporto. Disponível em: <https://pt.windfinder.com/windstatistics/recife>. Acesso em: 26 mar. 2019.

HELIOTEK AQUECEDORES SOLARES E DE PISCINA. **Manual do produto coletor solar**. São Paulo, 2018. p. 24.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MATTOS, O. D. **O aquecimento solar no Brasil**. 2014. Disponível em: <http://www.anapp.org.br/artigos/o-aquecimento-solar-no-brasil/>. Acesso em: 10 out. 2017.

MCADAMS, W. H. **Heat transmission**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1954.

MCVEIGH, J. C. **Sun power -an introduction to the application os solar energy**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1983. p. 25-64.

MORAES NETO, S. D. **Plano de nacionalização progressiva do BNDES: rápido desenvolvimento do setor fotovoltaico versus a capacidade inovativa nacional**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/incentivos-a-energia-solar/plano-de-nacionalizacao-progressiva-do-bndes-rapido-desenvolvimento-do-setor-fotovoltaico-versus-a-c.html>. Acesso em: 8 set. 2017.

NREL. **Glossary of solar radiation resource terms**: national renewable energy laboratory. Disponível em: http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html. Acesso em: 5 out. 2017.

OLIVEIRA, M. B. N.; DAMASCENO, J. R. J.; VIEIRA, G. M. L. Aprimoramento de aquecedores solares de baixo custo. **Horizonte Científica**, Uberlândia, vol. 6, n. 2, fev. 2012. p. 24.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PERNAMBUCO. Secretaria de Desenvolvimento Econômico de Pernambuco. **Atlas eólico solar de Pernambuco**, 2017. Disponível em: <http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/>. Acesso em: 05 abr. 2019.

PRASS, P. A. R. **Condutividade térmica**. Disponível em: [https://www.fisica.net/constantes/condutividade-termica-\(k\).php](https://www.fisica.net/constantes/condutividade-termica-(k).php). Acesso em: 23 mar. 2019.

SINGH, G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. **Energy**, n. 53, 2013. p. 1 -13

SOCIEDADE DO SOL. **Manual do ASBC**. São Paulo, 2009. p. 40

SOLAR Panel on roof. 2015. Disponível em: <http://www.3m.co.uk/intl/uk/3Mworldly-wise/primary-bldg-southside-6-solar-panel.htm>. Acesso em: 30 out. 2017.

SOLAR Water Heating. Disponível em: <http://pushan.in/solar-waterHeating.php>. Acesso em: 30 out. 2017.

TABELAS de emissividades. Disponível em: https://contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf. Acesso em: 04 mar. 2019.

TERMOSSIFÃO. Disponível em: <http://apj.pt/termossifao.html>. Acesso em: 3 nov. 2017.

UNITED STATES. Department of energy. Energy efficiency and renewable energy. **The history of solar**. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf. Acesso em: 6 out. 2017.

TSAO, J.; LEWIS, N.; CRABTREE, G. Solar FAQs. *In: The Sun delivers more energy to Earth in an hour than we use in a year from fossil, nuclear and all renewable sources combined*. Disponível em: <http://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf>. Acesso em: 05 set. 2017. p.9.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Catálogo de propriedades térmicas e óticas de vidros comercializados no Brasil**. Florianópolis: CB3E; ABIVIDRO, 2015. p. 7.

VANDENBOSCH, G. A. E.; MA, Z. Upper bounds for the solar energy harvesting efficiency of nano-antennas. **Nano energy**, Leuven, v. 1, n. 3. Mar. 2012. p. 494-502.