UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MÁRIO OTÁVIO LACERDA E MIRANDA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM COLETOR SOLAR HÍBRIDO EM UM SISTEMA DE PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE ELETRICIDADE E ÁGUA QUENTE

OURO PRETO - MG
2021

MÁRIO OTÁVIO LACERDA E MIRANDA

mario.miranda@aluno.ufop.edu.br

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM COLETOR SOLAR HÍBRIDO EM UM SISTEMA DE PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE ELETRICIDADE E ÁGUA QUENTE

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antonio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L131a Lacerda e Miranda, Mario Otavio .
Análise do desempenho de um coletor solar híbrido em um sistema de produção simultânea de eletricidade e água quente. [manuscrito] / Mario Otavio Lacerda e Miranda. - 2021.
44 f.

Orientador: Prof. Dr. Luís Antonio Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Sistema fotovoltaico - PVT (Photovoltaic / Thermal). 2. Sistema Fotovoltaico. 3. Energia solar - Sistemas híbridos. 4. Simulação de computador - TRNSYS. I. Bortolaia, Luís Antonio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Mário Otávio Lacerda e Miranda

Análise do desempenho de um coletor solar híbrido em um sistema de produção simultânea de eletricidade e água quente

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 23 de Abril de 2021

Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Elisângela Martins Leal (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Luiz Joaquim Cardoso Rocha (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/04/2021

Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Bortolaia**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 07:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0165007** e o código CRC **A609358F**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

A Deus e a meus pais dedico mais esta etapa vencida.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse.

Aos meus pais por todo amor e sacrifício, e minha família por sempre acreditarem em mim.

Ao meu orientador Luís Antonio Bortolaia, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica pelos ensinamentos.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nessa caminhada.

“Mário Otávio, depois que você ficou adulto eu virei seu reflexo. Feliz, feliz, minha felicidade depende da sua. Triste, triste, sua tristeza é minha. Sua realização é tudo que preciso na minha vida. Que você esteja com Deus o tempo todo. Que você seja abençoado eternamente”.

Gleison Miranda (meu pai).

R E S U M O

Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente em sistemas híbridos fotovoltaicos térmicos (PVT) para diferentes aplicações que requerem água quente e eletricidade. O sistema híbrido integra os recursos de energia fotovoltaica e sistemas térmicos solares em um componente combinado e eficiente, reduzindo custos de material, instalação e manutenção. Com base nessas considerações, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de um coletor solar híbrido em um sistema típico para produção simultânea de energia elétrica e água quente. O presente trabalho consiste em uma pesquisa exploratória de sistemas fotovoltaicos/térmicos, com abordagem qualitativa e quantitativa do dimensionamento do coletor solar híbrido, utilizando de pesquisa bibliográfica e estudo de caso de um sistema típico. As simulações detalhadas no software TRNSYS, para análise térmica e elétrica do sistema PVT, foram realizadas para os períodos de uma semana e de um ano e para os dados climáticos de Belo Horizonte, MG. Os resultados indicaram que o sistema híbrido operou com eficiências térmicas e elétricas médias de 34,4% e 11,3%, respectivamente. Foi demonstrado que apesar de obter menos energia elétrica do que o sistema fotovoltaico e menos energia térmica do que o sistema solar térmico, o sistema híbrido obtém quantidades significativas de ambos os tipos de energia. No geral, o sistema PVT em pequena escala aponta como uma solução promissora para o aproveitamento da energia solar.

Palavras-chave: Sistema PVT. Coletor solar híbrido. Fotovoltaico. Térmico. Simulação. TRNSYS.

ABSTRACT

In recent years, there has been a growing interest in hybrid thermal photovoltaic (PVT) systems for different applications that require hot water and electricity. The hybrid system integrates photovoltaic energy resources and solar thermal systems in a combined and efficient component, reducing material, installation and maintenance costs. Based on these considerations, the objective of this work is to analyze the performance of a hybrid solar collector in a typical system for simultaneous production of electricity and hot water. The present work consists of an exploratory research of photovoltaic / thermal systems, with a qualitative and quantitative approach to the dimensioning of the hybrid solar collector, using bibliographic research and a case study of a typical system. The detailed simulations in the TRNSYS software, for thermal and electrical analysis of the PVT system, were carried out for the periods of one week and one year and for the climatic data of Belo Horizonte, MG. The results indicated that the hybrid system operated with average thermal and electrical efficiencies of 34.4% and 11.3%, respectively. It has been shown that despite obtaining less electrical energy than the photovoltaic system and less thermal energy than the solar thermal system, the hybrid system obtains significant amounts of both types of energy. Overall, the small-scale PVT system points to a promising solution for harnessing solar energy.

Key-words: PVT system. Hybrid solar collector. Photovoltaic. Thermal. Simulation. TRNSYS.

LISTA DE SIMBOLOS

A_c	Área do Coletor/módulo	[m²]
C_p	Calor Específico do fluido	[kJ/kg K]
F’	Fator de eficiência	[-]
FF	Fator de forma	[-]
F_R	Fator de remoção do calor	[-]
$F_R\tau\alpha$	Fator que representa as perdas ópticas	[-]
F_RU_L	Fator que representa as perdas térmicas	[W/m² K]
G_T	Irradiância total	[W/m²]
I_{MP}	Corrente de máxima potência	[A]
I_{SC}	Corrente de curto-circuito	[A]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
T_a	Temperatura ambiente	[K]
T_e	Temperatura de entrada da água	[K]
T_{mod}	Temperatura do módulo	[K]
T_s	Temperatura de saída da água	[K]

U_L	Coeficiente de perdas totais do módulo	[W/m² K]
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	[V]
V_{MP}	Tensão de máxima potência	[V]
ΔT	Diferença de temperatura entre entrada e ambiente	[K]
η_T	Eficiência térmica	[-]
η_e	Eficiência elétrica	[-]
η_{el}	Eficiência do módulo	[-]
Q_u	Potência útil	[W]
S	Radiação solar absorvida pelo coletor	[W/m²]
$\tau\alpha_\alpha$	Produto transmitância-absortância	[-]
T_m	Média aritmética das temperaturas do fluido nas seções de entrada e saída do coletor	[K]
η_m	Eficiência térmica do coletor em função de Tm	[-]
P_{MP}	Potência máxima	[W]
K_t	Coeficiente térmico para o módulo	[K m²/W]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Média anual típica da radiação solar global diária no Brasil (Wh/m²dia) 2

Figura 2 - Fluxo de energia no coletor solar.....8

Figura 3 - Componentes dos coletores solares fechados 9

Figura 4 - Célula fotovoltaica de silício cristalino 11

Figura 5 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino 12

Figura 6 - Desenho esquemático de um módulo híbrido térmico fotovoltaico.....13

Figura 7 - Diferentes tipos de módulos híbridos a água: (1) PVT plano; (2) PVT canal; (3) PVT corrente livre; (4) PVT duplo absorvedor 15

Figura 8 - Vista frontal de um sistema PVT com circulação natural.....16

Figura 9 - Visão global do sistema híbrido da UNICAMP 17

Figura 10 - Fluxograma das etapas do trabalho 26

Figura 11 - Sistema montado na interface do TRNSYS.....29

Figura 12 - Exemplo de um painel PVT típico do fabricante DualSun 30

Figura 13 - Irradiação solar e potência elétrica de saída do sistema durante os dias 24 a 30 de junho para Belo Horizonte, MG 32

Figura 14 - Temperaturas de entrada e saída do coletor e do ambiente durante os dias 24 a 30 de junho para Belo Horizonte, MG 34

Figura 15 - Eficiências térmica e elétrica mensais do sistema para um ano típico de Belo Horizonte, MG.....36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variável e Indicadores 27

Tabela 2 - Parâmetros de entrada do coletor PVT 30

Tabela 3 - Principais parâmetros de entrada do circuito 31

Tabela 4 - Irradiação solar e produção térmica e elétrica do sistema para os dias 24 a 30 de junho em Belo Horizonte, MG 33

Tabela 5 - Irradiação solar e produção mensal térmica e elétrica do sistema para um ano típico de Belo Horizonte, MG 35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Formulação do Problema 1
1.2 Justificativa 4
1.3 Objetivos 5
1.3.1 Geral 5
1.3.2 Específicos 5
1.4 Estrutura do Trabalho 5

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 7
2.1 Energia Solar Térmica 7
2.1.1 Conversão da Energia Solar 7
2.1.2 Coletor Solar 8
2.2 Energia Solar Fotovoltaica 10
2.2.1 Principio de funcionamento 10
2.2.2 Módulo Fotovoltaico 11
2.3 Coletores Solares Híbridos 13
2.4 Modelagem do Coletor Solar Híbrido 18
2.4.1 Quantidade de energia térmica 18
2.4.2 Quantidade de energia fotovoltaica 20
2.5 O software TRNSYS 22

3 METODOLOGIA 25
3.1 Tipos de pesquisa 25
3.2 Materiais e métodos 26
3.3 Variáveis e indicadores 27
3.4 Instrumentos de coleta de dados 27
3.5 Tabulação de dados 28
3.6 Considerações finais 28

4 RESULTADOS 29
4.1 Sistema híbrido - TRNSYS 29
4.2 Parâmetros de entrada da simulação 30
4.2.1 Dados de entrada do Coletor PVT 30

4.2.2 Dados de entrada do Circuito 31
4.3 Resultados da simulação 32
4.3.1 Análise elétrica 33
4.3.2 Análise térmica 34
4.3.3 Análise anual 35

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO 38
5.1 Conclusão 38
5.2 Recomendações para trabalhos futuros 39

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 40

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados assuntos relativos à análise de um coletor solar híbrido, produção de energia elétrica e aquecimento de água, mostrando o problema e a justificativa, além dos objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

A eletricidade é recurso fundamental e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países. De acordo com pesquisas recentes, 61% da energia elétrica produzida no Brasil vem das hidrelétricas e essa dependência em uma única fonte torna a matriz energética nacional vulnerável à falta de água. Além disso, a geração hidrelétrica provoca graves impactos ao ambiente no qual a usina é implantada, podendo alterar ecossistemas e forçar o deslocamento de populações inteiras (ANEEL, 2017).

A constante preocupação com o meio ambiente, a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira e o crescimento da demanda de energia incentivam cada vez mais o uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica. Assim, mais estudos na área estão sendo feitos para tornarem tais alternativas mais eficientes e atuantes no mercado (ANEEL, 2017).

Entre as fontes alternativas de energia, a energia solar vem se mostrando uma das mais promissoras por ser um recurso limpo, farto e possuir um grande potencial de exploração. O Atlas Brasileiro de Energia Solar (2016) informa que apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se notar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país.

Conforme a Figura 1, os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (4200-6700 Wh/m^2) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, tais como Alemanha (900-1250 Wh/m^2), França (900-1650 Wh/m^2) e Espanha (1200-1850 Wh/m^2), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

A maior parte do território brasileiro está localizada entre a linha do Equador e o trópico de Capricórnio, de modo que não ocorrem grandes variações na duração solar do dia. E mesmo as regiões do país com menores índices de radiação apresentam grande potencial de

aproveitamento energético. É possível concluir então que o aproveitamento da energia solar no território brasileiro deve mostrar-se vantajoso do ponto de vista econômico (ANEEL, 2005).

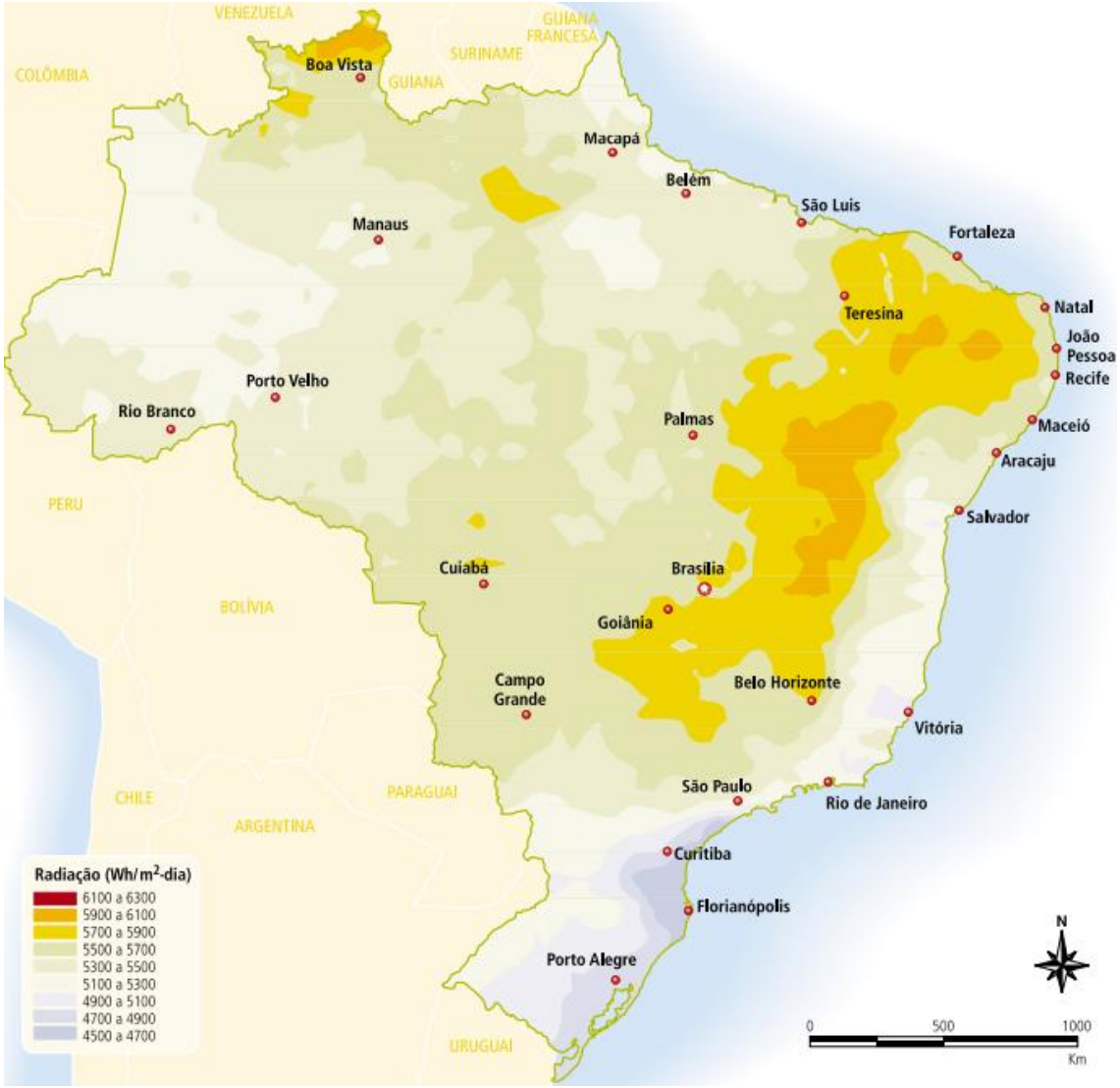

Figura 1 - Média anual típica da radiação solar global diária no Brasil (Wh/m²dia).
Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2005).

Nos dias atuais, os processos mais usados para aproveitamento da energia solar são o aquecimento de fluidos e a produção direta de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas. Para fins de engenharia, pode-se falar da energia solar térmica e energia solar fotovoltaica (CRESESB, 2014).

No caso da energia solar térmica, o interesse é na quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor, a partir da radiação solar

incidente no mesmo. A utilização dessa forma de energia implica não somente em saber captá-la, mas também em como armazená-la. Os equipamentos mais difundidos na área são os coletores solares, utilizados em aplicações residenciais e comerciais para o aquecimento de água (CRESESB, 2014).

Segundo informações da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento – Abrava (2015), existem aproximadamente 250.000 aquecedores solares instalados no Brasil, o que representa apenas 0,6% do total de residências brasileiras. Estima-se que o aquecimento de água é responsável por 25% do total de energia elétrica consumida nas residências brasileiras o que representa um consumo da ordem de 20 bilhões de kWh, os quais poderiam ser supridos com energia solar, com enormes vantagens socioeconômicas e ambientais (PEREIRA *et al*, 2016).

Já a energia solar fotovoltaica se traduz na conversão direta da energia solar em energia elétrica e ocorre através de efeitos da radiação sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. No efeito fotovoltaico, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, através do uso de células solares. Entre os materiais mais adequados, destaca-se o silício. Um conjunto de células fotovoltaicas dispostas lado a lado formam um módulo ou painel fotovoltaico (ANEEL, 2002).

Nos últimos anos, a energia fotovoltaica tem sido vista internacionalmente como uma tecnologia bastante promissora. Estima-se que o Brasil possua atualmente cerca de 20 MW de capacidade de geração solar fotovoltaica instalada, em sua grande maioria destinada ao atendimento de sistemas isolados e remotos, principalmente em situações em que a extensão da rede de distribuição não se mostra economicamente viável. Também se observa aplicações como suporte a antenas de telefonia celular e a radares de trânsito (EPE, 2012).

Pelo fato dessas duas tecnologias estarem sendo cada vez mais utilizadas, se desenvolveu a ideia de um sistema híbrido que, ao mesmo tempo, funciona com as duas funções, ou seja, é um módulo fotovoltaico conectado a um sistema de aquecimento solar.

Diante deste contexto, tem-se a seguinte pergunta problema:

Como analisar o desempenho de um coletor solar híbrido em um sistema para produção simultânea de eletricidade e água quente?

1.2 Justificativa

Segundo Chow (2010), os coletores solares híbridos são utilizados para produzir simultaneamente energia elétrica e térmica. Estes apresentam como vantagens principais a capacidade de proporcionar uma maior eficiência de conversão de energia, bem como a redução do espaço útil e do investimento inicial, se comparado com um sistema composto por um coletor solar térmico e um painel fotovoltaico separados.

Cada vez mais o espaço útil para a instalação de tecnologias de aproveitamento de energia solar é limitado, devido ao crescente número de edifícios de andares. Isto significa que, por habitação, existe menos área disponível para o aproveitamento deste tipo de energia. As tecnologias solares que se encontravam até pouco tempo disponíveis, consistem na utilização separada de módulos fotovoltaicos e coletores solares térmicos. Devido à sua estrutura compacta, o coletor híbrido é capaz de gerar maior quantidade de energia por metro quadrado do que um sistema separado, quando se somam as energias elétrica e térmica produzidas (ALMEIDA, 2008).

De acordo com Luzzi (2017) os módulos fotovoltaicos comuns convertem de 4 a 17% da energia solar incidente em energia elétrica. Isto significa que além das perdas por reflexão, mais de 50% da radiação é perdida em forma de calor para a célula, o que pode levar a altas temperaturas de operação do módulo. Como consequência, a célula perde aproximadamente 0,4% de eficiência para cada °C acima de sua temperatura máxima de operação.

Ao utilizar um coletor solar híbrido, as células fotovoltaicas são resfriadas, através da utilização de tubulação no fundo do painel que, além de aquecer a água para uso, é responsável pelo arrefecimento dos módulos. E consequentemente, diminui o efeito de dois fatores no sistema: danos permanentes na estrutura do módulo devido ao estresse térmico e a queda na eficiência da célula. Desta forma, consegue-se maximizar o rendimento global do coletor, para valores acima dos 50%, devido à produção combinada de energia térmica e elétrica (RIBEIRO, 2016).

A pesquisa mostra-se relevante pois desenvolverá uma tecnologia emergente, que combina o aproveitamento elétrico e térmico da energia solar, e, que devido às suas características técnicas e operacionais, tem se destacado em diversos países, enquanto que no

Brasil, apesar dos altos índices de radiação solar, ainda existem poucos registros de desenvolvimento dessa tecnologia (GUERRA, 2016).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o desempenho de um coletor solar híbrido em um sistema de produção simultânea de energia elétrica e água quente.

1.3.2 Específicos

- Realizar o levantamento bibliográfico e estudo teórico sobre energia solar térmica, energia solar fotovoltaica e coletores híbridos solares;
- Apresentar uma modelagem matemática da transferência de calor ocorrida nos processos de conversão de energia;
- Realizar a simulação de um coletor solar híbrido em um sistema típico.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

O primeiro capítulo trata da introdução ao tema a ser abordado, bem como os objetivos do trabalho, e a estrutura adotada para a elaboração do documento.

O segundo capítulo apresenta a teoria necessária para entender alguns conceitos a serem abordados no desenvolvimento do trabalho, assim como uma revisão bibliográfica na área de energia solar e coletores híbridos solares.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada na determinação dos parâmetros de entrada do *software* para posterior simulação do coletor híbrido, além dos procedimentos utilizados para a coleta de dados.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos na simulação do coletor híbrido em um sistema típico, bem como as discussões cabíveis ao estudo.

Por fim, o quinto capítulo conclui o que foi observado durante a realização de todo o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica a respeito de energia solar térmica, energia solar fotovoltaica e coletores solares híbridos que formarão a base para o estudo pretendido.

2.1 Energia Solar Térmica

A energia solar térmica é uma forma de utilizar a energia proveniente do sol como calor. Existem diversas aplicações para este tipo de energia, desde o aquecimento de água para uso doméstico e em piscinas, até em grandes usinas que utilizam a energia do sol para concentrar calor em uma torre, gerando vapor e assim produzindo energia (RIBEIRO, 2016).

Tanto no Brasil quanto no mundo, o aquecimento solar de água em baixa temperatura, para uso residencial e industrial, é a aplicação da energia solar térmica mais consolidada, capaz de reduzir o consumo de energia elétrica devido à substituição dos aquecedores elétricos pelos aquecedores solares (GUERRA, 2016).

2.1.1 Conversão da Energia Solar

O princípio de funcionamento da tecnologia solar para aquecimento de água em baixa temperatura baseia-se na conversão térmica da energia do sol, por meio da absorção da radiação solar incidente em uma superfície absorvedora e da transferência da energia absorvida, sob a forma de calor, para a água que recebe a energia útil.

A temperatura que a água atinge é proveniente da energia útil resultante de um balanço de energia entre a quantidade de radiação absorvida pela superfície e as perdas térmicas existentes durante o processo de transferência de calor. Logo, a energia útil, bem como a temperatura, aumenta na medida em que se eleva a radiação absorvida pela superfície absorvedora e se diminuem as perdas térmicas do sistema como é retratado na Figura 2 (GUERRA, 2016).

A radiação solar incidente nos coletores pode ser transmitida, refletida e absorvida. Logo, as perdas óticas estão associadas às propriedades que influenciam no comportamento dos materiais sob a ação da luz solar que são transmissividade, refletividade e absortividade.

Sendo assim, a energia incidente pode ser considerada como o somatório da energia absorvida, transmitida e refletida (COELHO, 2011).

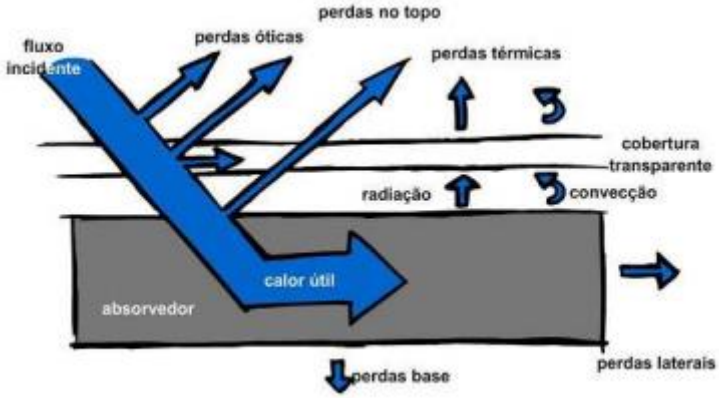

Figura 2 – Fluxo de energia no coletor solar.
Fonte: DASOL (2008).

No que diz respeito às perdas térmicas existentes na conversão solar térmica, essas podem ocorrer durante os processos de transferência de calor. Logo, é possível afirmar que as perdas podem ocorrer por meio da condução, convecção ou radiação.

No caso do coletor solar a transferência de calor por convecção ocorre entre a placa absorvedora e a cobertura transparente e também entre a cobertura transparente e o ar ambiente. Essas perdas podem ser diminuídas através da limitação do escoamento do fluido entre as superfícies. Com o objetivo de evitar as perdas por condução devem-se utilizar isolantes térmicos, compostos por materiais de baixa condutividade térmica. As perdas térmicas por radiação ocorrem quando parte da energia absorvida pela placa absorvedora do coletor é emitida e podem ser minimizadas através da utilização de uma cobertura transparente acima da superfície absorvedora, como o vidro (GUERRA, 2016).

2.1.2 Coletor Solar

O coletor solar é um equipamento que recebe a energia proveniente do Sol, armazena-a e transforma-a em energia térmica, permitindo assim aquecer o fluido que circula no seu interior através de tubos (LOURENÇO, 2012).

Coletores solares com placa absorvedora plana são os mais comuns e podem ser projetados para aplicações a temperaturas moderadas na ordem de 100°C acima da temperatura ambiente. Tais coletores solares absorvem os componentes direta e difusa da irradiação solar, sem necessidade de rastreamento do Sol e requerem baixos níveis de manutenção. As aplicações potenciais destas unidades são em aquecimento solar de água residencial, aquecimento para edificações, condicionamento de ar e em processos de aquecimento industrial (FARIA, 2007).

Os sistemas de aquecimento de água solares planos distribuídos são os mais apropriados para uso residencial e são normalmente compostos por: Placas absorvedoras ou coletores solares propriamente ditos, onde a energia solar é absorvida e transferida para a água; Reservatório térmico, onde a água aquecida é mantida termicamente isolada do ambiente; Tubos de conexão isolados, que transportam água aquecida nos coletores ao reservatório; Sensor de temperatura (SALES, 2004).

Os principais componentes dos coletores solares planos são apresentados na Figura 3 e de acordo com Coelho (2011) estão especificados os materiais e funções de cada componente.

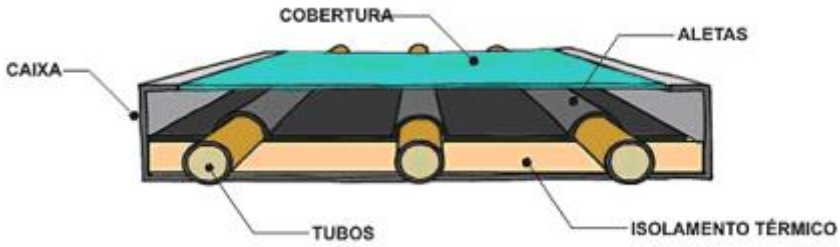

Figura 3 – Componentes dos coletores solares fechados.
Fonte: SOLETROL (2010).

Caixa externa: Tem a função de suporte do sistema, normalmente é construída em alumínio, chapa dobrada ou material plástico resistente.

Isolamento térmico: Sua função é a redução das perdas de calor para o meio. Os materiais mais utilizados para realizar o isolamento são: a lã de vidro ou de rocha e a espuma de poliuretano.

Tubos (flauta / calhas superior e inferior): São interconectados de maneira a fazer com que o fluido escoe no interior do coletor. São fabricados em cobre, devido à sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão.

Placa absorvedora (aletas): Possui a função de absorver e transferir a energia solar para o fluido de trabalho. São fabricadas em alumínio ou cobre e pintadas de preto fosco para aumentar a absorção da energia solar.

Cobertura transparente: Sua função é permitir a passagem da radiação solar e reduzir as perdas por convecção e radiação para o meio ambiente. São construídas em vidro, policarbonato ou acrílico. Os coletores solares utilizam vidro como cobertura por serem transparentes na banda solar e opaca na banda de emissão da placa.

Vedação: Sua função é manter isolado da umidade externa.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade. Edmond Becquerel relatou o fenômeno em 1839, quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora surge o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico, devido à incidência da luz. No processo de conversão da energia radiante em energia elétrica a célula fotovoltaica é a unidade fundamental (SOUSA, 2013).

2.2.1 Principio de funcionamento

As células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermediárias entre um condutor e um isolante. O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, é mau condutor elétrico. Para alterar isto se acrescentam porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem (NASCIMENTO, 2004).

Da dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentando Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P). Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (Figura 4).

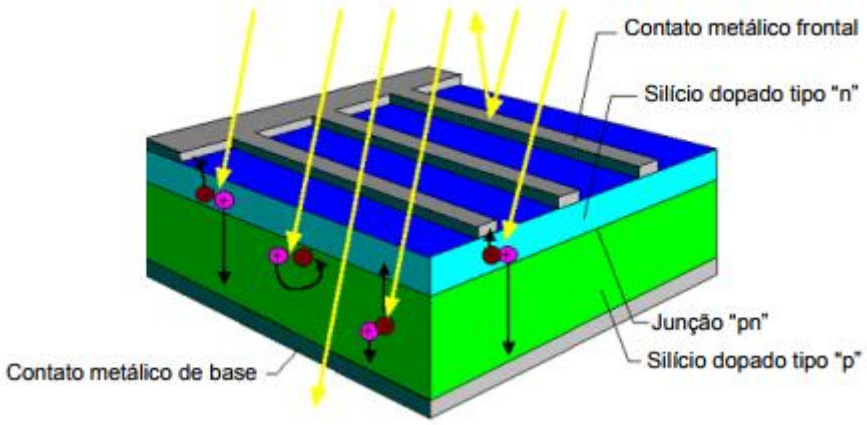

Figura 4 – Célula fotovoltaica de silício cristalino.

Fonte: Nascimento (2004).

Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” (NASCIMENTO, 2004).

Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incidir na célula, o fluxo de elétrons mantém-se. A intensidade varia proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente, tornando-o inesgotável. Este fenômeno descrito é denominado efeito fotovoltaico, mostrado na Figura 4 (SILVA, 2014).

2.2.2 Módulo Fotovoltaico

É importante notar que a célula fotovoltaica é o elemento básico do sistema de conversão fotovoltaica e como sua produção de eletricidade é pequena, torna-se necessário realizar o agrupamento de várias células fotovoltaicas para aumentar essa produção. A esse conjunto dá-se o nome de módulo fotovoltaico, também denominado painel fotovoltaico, e a união de vários módulos permite a composição de um arranjo fotovoltaico.

Os painéis fotovoltaicos são projetados e fabricados para proporcionar uma maior tensão elétrica de saída, uma vez que a tensão elétrica de uma única célula solar é baixa; e

oferecer uma maior produção de corrente elétrica, visto que a corrente elétrica está diretamente relacionada com a quantidade de luz recebida. Logo, quanto maior a área, maior a captação de luz e, consequentemente, maior a corrente elétrica fornecida (GUERRA, 2016).

Um módulo pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, associação esta que depende dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina. Estas células são soldadas em tiras e depois de soldadas, as células são encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico (CRESESB, 2014).

Como mostrado na Figura 5, os módulos fotovoltaicos são compostos por uma camada de vidro temperado com camada anti-refletora para dar resistência ao painel, para protegê-lo e para aumentar sua eficiência térmica, seguido por uma camada de Etileno-Vinil-Acetato (EVA), um material plástico utilizado para proteger a camada que vem a seguir, que são as células de silício. Outra camada de EVA vem após a camada de silício, seguido por uma camada de Tedlar - polietileno tereftalato, que formam um plástico que tem função de ser uma barreira contra umidade, e para finalizar, uma camada de alumínio para isolar a placa e dar rigidez. Os módulos geralmente são revestidos por uma moldura de alumínio para dar resistência e proteger o painel (RIBEIRO, 2016).

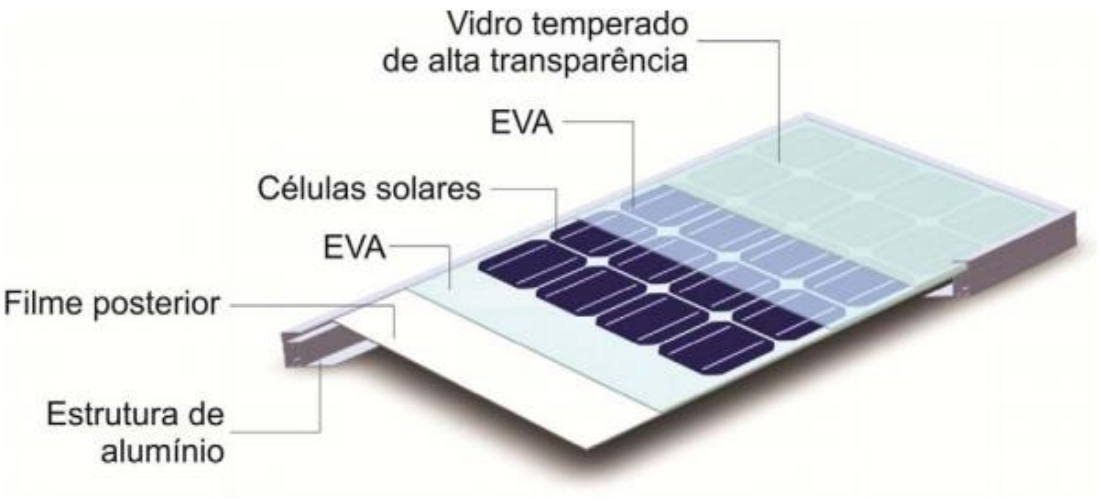

Figura 5 – Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.
Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos – CRESESB (2014).

2.3 Coletores Solares Híbridos

O coletor solar híbrido é uma tecnologia que converte a radiação solar, simultaneamente, em eletricidade e calor, ou seja, combina as funções do coletor solar térmico e fotovoltaico. Basicamente, consiste na adição de uma placa absorvedora a um módulo fotovoltaico, como mostra a Figura 6. Assim, a placa absorvedora irá coletar a energia térmica provocando um arrefecimento no módulo fotovoltaico, o que resulta numa melhoria no seu comportamento elétrico. E essa energia térmica é aproveitada para aquecer água ou ar (MARQUES, 2008).

Este tipo de coletor gera uma maior quantidade de energia elétrica e térmica por m² do que uma instalação separada (térmico e fotovoltaico). Sua instalação é particularmente útil em situações em que a área é reduzida e, do ponto de vista estético, o coletor híbrido proporciona uma solução mais harmoniosa, em contraste com a combinação de um coletor térmico e um módulo fotovoltaico. E pelo fato de que apenas um tipo de coletor é instalado, em vez de dois, o custo de instalação é menor (ANCINES, 2016).

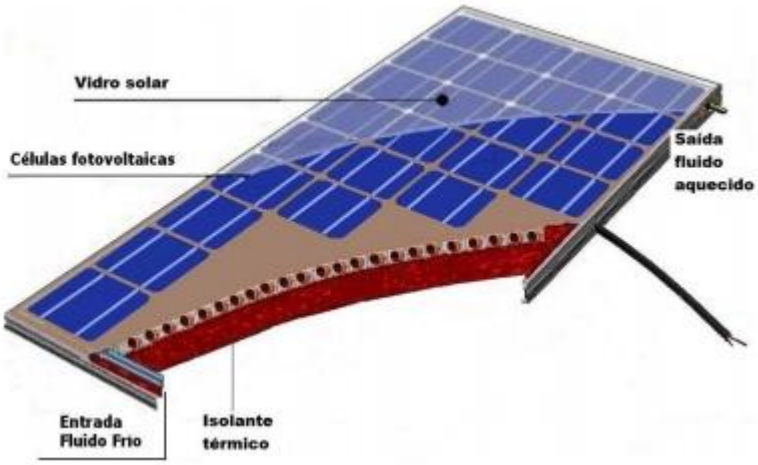

Figura 6 – Desenho esquemático de um módulo híbrido térmico fotovoltaico
Fonte: Ancines (2016).

De acordo com o levantamento realizado por Viana (2014), o primeiro cientista a realizar um trabalho sobre o coletor solar híbrido ou PVT (fotovoltaico térmico) foi Martin Wolf em 1976, o qual constatou no seu estudo que era tecnicamente viável o desempenho de um sistema que combinasse aquecimento de água e geração de energia elétrica para aplicação em residências.

Pesquisas realizadas por Florschuetz (1979) apresentam um modelo computacional para simulação de um coletor PVT utilizando água como fluido de trabalho, similar ao modelo de Hottel-Whillier (1976) para coletores planos. Neste modelo analisa-se a combinação de coletor plano de água quente tradicional com o painel fotovoltaico de forma a minimizar o uso de área de coletores. A simulação mostrou que a combinação dos dois sistemas com a mesma área de coletor produz mais energia por unidade de área de superfície do que num sistema separado.

Garg e Agarwal (1995) desenvolveram um sistema basicamente composto por um aquecedor convencional com circulação forçada, usando água como fluido, com a adição de células solares diretamente sobre a placa absorvedora. O fator mais importante obtido nesse trabalho foi a influência da temperatura da água que passa pelo coletor, em que quanto maior a temperatura média da placa absorvedora, maior a temperatura da célula fotovoltaica, havendo uma diminuição significativa na sua eficiência elétrica e, consequentemente, na redução da eficiência total do coletor térmico fotovoltaico (ANCINES, 2016).

Bergene e Lovvik (1995) propuseram um modelo detalhado de um coletor PVT com água para avaliação de desempenho. Neste estudo, a eficiência total do sistema ficou entre 60% e 80%. Além disto, em seus estudos foi mostrado que fatores como a quantidade de água no tanque de armazenamento influenciam a temperatura final da água, já que para tanques muito grandes a água não chegava a temperaturas altas como em tanques menores (RIBEIRO, 2016).

Tripanagnostopoulos *et al.* (2001) fizeram testes em sistemas híbridos PVT usando células fotovoltaicas de silício policristalino e de silício amorfo. Os autores descobriram que a utilização de água como fluido de trabalho apresenta melhores resultados do que a utilização de ar. Adicionalmente, os autores sugeriram que a utilização de refletores difusos ou superfícies espelhadas melhorariam o desempenho desses sistemas. Entretanto, o uso de coletores envidraçados iria melhorar o desempenho térmico em detrimento da eficiência elétrica.

Já o estudo de Sandnes e Rekstad (2001) investigou o desempenho de um coletor com células solares de silício com uma camada adicional de um polímero cuja função era absorver calor. A análise feita mostrou que a presença de células solares reduziu a absorção de calor em aproximadamente 10% da radiação solar, e que a camada de vidro temperado reduz a eficiência ótica em aproximadamente 5%. No final, os autores constataram que para se obter o

efeito de arrefecimento almejado, a tecnologia PVT é limitada a aplicações em baixa temperatura.

A fim de obter uma visão mais clara sobre o rendimento esperado de diversos modos de construção de coletores PVT, Zondag *et al.* (2003) avaliaram nove tipos de projetos distintos. O projeto que teve melhor eficiência e com fácil fabricação foi o coletor de chapa e tubo plano, ilustrado na Figura 7. Na sua análise numérica os autores mostraram que, para um coletor combinado térmico fotovoltaico, a eficiência total, quando a temperatura de entrada for igual a temperatura ambiente, é superior a 50%.

Zondag *et al.* (2003) concluíram que o coletor híbrido tem um rendimento mais elevado por unidade de área do que um coletor solar térmico e um módulo fotovoltaico. Após essa análise, um protótipo do coletor PVT foi construído, onde os resultados do modelo numérico tiveram concordância com os resultados experimentais. No entanto, o desempenho elétrico desse modelo com cobertura de vidro foi um pouco menor comparado à eficiência elétrica de um módulo fotovoltaico convencional, devido às perdas ocorridas pelas coberturas de vidro.

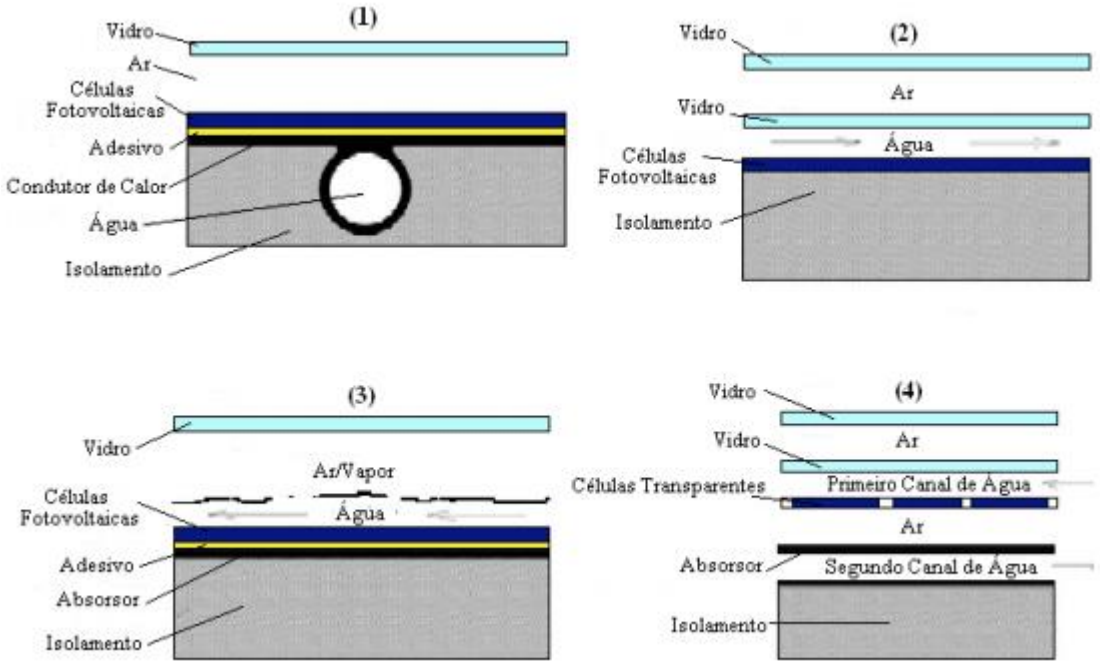

Figura 7 – Diferentes tipos de módulos híbridos a água: (1) PVT plano; (2) PVT canal; (3) PVT corrente livre; (4) PVT duplo absorvedor

Fonte: Marques (2008).

Posteriormente Chow *et al.* (2005) elaboraram um sistema PVT voltado principalmente para fins domésticos, constituído de um coletor PVT caixa plana em liga de alumínio e com arrefecimento através da circulação natural (Figura 8). Os autores observaram que era possível obter uma alta temperatura da água oriunda do sistema após um dia de exposição ao sol pleno, logo apresentando alto potencial para aplicação no setor doméstico. Também foi desenvolvido um modelo numérico preciso, comprovado por meio dos dados medidos nos testes experimentais.

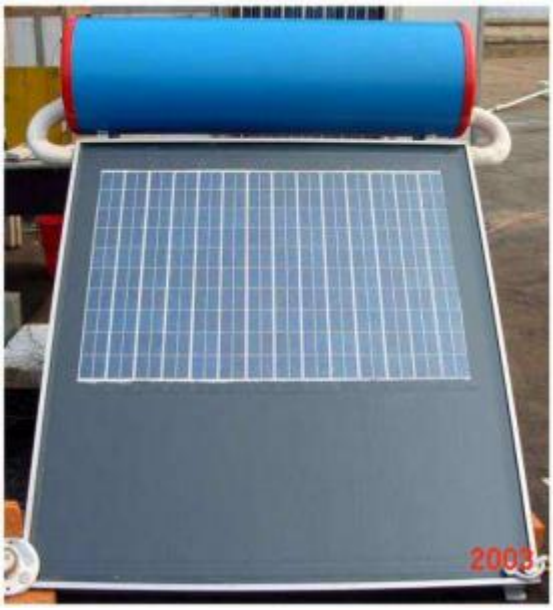

Figura 8 – Vista frontal de um sistema PVT com circulação natural
Fonte: Chow *et al.* (2005).

Marques (2008) estudou a viabilidade econômica de coletores híbridos para aplicação em aquecimento de água e microgeração de eletricidade para uma residência com quatro pessoas situada em três cenários de climas diferentes em Portugal. Neste estudo três diferentes tipos de coletores foram estudados, sendo o primeiro composto por painel e tubo sem cobertura, o segundo sendo o painel e o tubo com cobertura, e o terceiro apenas o tubo com células transparentes.

A partir dos modelos numéricos desenvolvidos, Marques (2008) concluiu que o coletor PVT placa-tubos com cobertura possui o melhor comportamento térmico, assim como aconteceu no seu experimento. Contudo, o coletor PVT placa-tubos sem cobertura tem o desempenho elétrico mais satisfatório. No final, o autor ainda ressaltou que o tipo de célula

FV utilizado no sistema influenciava nos resultados obtidos, visto que o tipo monocristalino proporcionou maior geração de energia elétrica do que o tipo policristalino.

Já Almeida (2008) avaliou o comportamento de diferentes configurações de coletores PVT com o auxílio de um modelo matemático e um programa de simulação numérica que construía curvas de eficiência. No seu trabalho constatou que os coletores PVT com células monocristalinas são economicamente mais viáveis, tanto devido ao retorno de investimento mais rápido, como devido a sua capacidade de produzir entre 26% e 31% a mais de energia elétrica do que um painel FV convencional com a mesma área e potência instalada.

No Brasil, o modelo pioneiro de sistema híbrido foi desenvolvido na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP, 2013) pelos pesquisadores Arthur Oliveira e Newton Frateschi. O protótipo é composto por um módulo de células solares com um trocador de calor em sua parte traseira, um coletor solar térmico ligado ao módulo de modo a ter um grau de liberdade angular e um boiler para armazenar a água quente (Figura 9).

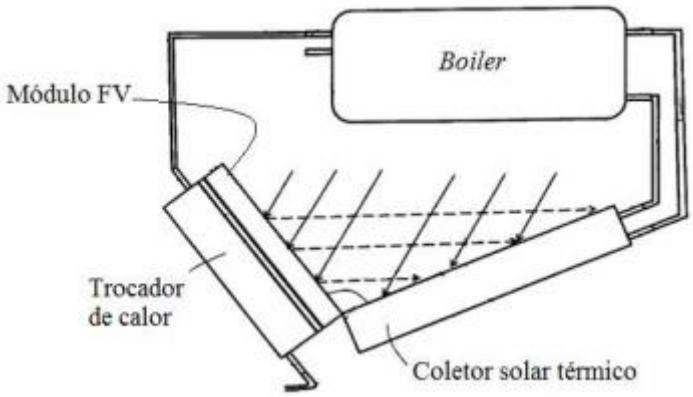

Figura 9 – Visão global do sistema híbrido da UNICAMP
Fonte: Guerra (2016).

Depois, Viana (2014) construiu um coletor PVT com o objetivo de examinar sua viabilidade técnica e econômica. O sistema foi avaliado experimentalmente em quatro dias consecutivos e de acordo com os resultados dos ensaios, a eficiência térmica média do coletor foi de 33,1 % e a eficiência elétrica média de 6,8%. Deste modo, o autor concluiu ser viável inserir a tecnologia PVT em residências, pois ela aproveita melhor a área e reduz de forma significativa o tempo de retorno do investimento inicial.

Espera-se que o mercado fotovoltaico/térmico venha a apresentar crescimento nos próximos anos devido ao potencial de produção energética, assim como a crescente

preocupação com a preservação do meio ambiente. Por estes motivos é grande a importância de desenvolvimento de pesquisas na área, para que em um futuro breve tais tecnologias possam ser comercializadas e difundidas a preços acessíveis.

2.4 Modelagem do Coletor Solar Híbrido (CSH)

O principal objetivo da modelagem de um CSH consiste em determinar o desempenho elétrico e térmico do mesmo, em estado estacionário ou quase estacionário, para determinadas condições de trabalho (radiação solar, temperatura do fluido térmico, temperatura ambiente). Condições essas que permitirão avaliar, de uma forma numérica ou analítica, as características intrínsecas de um determinado modelo.

2.4.1 Quantidade de energia térmica

Coletores solares de placa plana são basicamente sistemas que convertem a radiação solar em energia térmica e isso proporciona ao fluido de trabalho (água ou ar) um aquecimento. A parte térmica de um coletor híbrido térmico fotovoltaico pode ser relacionada, aproximadamente, a de um coletor de placa plana, para tal é possível obter a energia térmica convertida com base na eficiência do PV/T e na irradiância solar que atinge o plano do módulo. Tal relação é apresentada pela Eq. (1) (Duffie e Beckman, 2013).

$$\eta_T = \frac{Q_u}{G_T A_C} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{G_T A_C} \quad (1)$$

na qual η_T é a eficiência térmica do PV/T em função da temperatura de entrada do coletor, Q_u é a potência útil, A_c é a área do coletor, G_T é a irradiância solar total no plano do coletor, $\dot{m}$ é a taxa mássica do fluido, C_p é o calor específico e ΔT é a diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente.

Um fator denominado como fator de remoção de calor (F_R) é definido, matematicamente, como a razão entre a energia útil real extraída pelo coletor e a energia útil que poderia ser retirada, se toda a superfície absorvedora estivesse à temperatura de entrada do fluido, indicado na Eq. (2). Esse fator equivale a quantidade de eficácia de um trocador de

calor convencional, que é definido como a razão entre a transferência de calor efetiva e a transferência de calor máxima possível.

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_S - T_e)}{A_C[S(\tau\alpha_a)_e - U_L(T_e - T_a)]} \quad (2)$$

na qual T_s é a temperatura do fluido na seção de saída do coletor e T_e é a temperatura na seção de entrada.

O F_R multiplicado pelo ganho de energia na condição descrita é igual ao ganho útil de energia. Desta forma, para uma radiação solar com incidência normal ao plano do coletor, a energia absorvida por este é dada pela Eq. (3).

$$Q_u = A_C F_R[S - U_L(T_e - T_a)] \quad (3)$$

na qual U_L é o coeficiente de perdas térmicas.

A radiação solar absorvida pelo coletor (*S*) é definida como o produto da irradiância solar total no plano do coletor e o produto da transmitância-absortância efetiva, definida pela Eq. (4).

$$S = G_T(\tau\alpha_a)_e \quad (4)$$

na qual G_T é a irradiância solar total no plano do coletor (W/m²), τ é a transmitância da cobertura, α_α é a absortância do absorvedor. O produto transmitância-absortância pode ser aproximado para coletores com vidro comum por $(\tau\alpha_\alpha)_e \cong 1{,}02(\tau\alpha_\alpha)$.

Portanto, dividindo a energia útil dada pela Eq. (3) pela energia solar incidente no plano do coletor, tem-se na Eq. (5) a eficiência térmica em função da temperatura de entrada.

$$\eta_e = \frac{Q_u}{G_T A_C} = \frac{\dot{m}C_P\Delta T}{G_T A_C} = F_R(\tau\alpha_a)_e - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \quad (5)$$

na qual η_e é a eficiência térmica do coletor solar em função da temperatura de entrada do coletor.

Analogamente, a Eq. (5) pode ser descrita considerando a temperatura do absorvedor igual a média aritmética entre as temperaturas nas seções de entrada e saída do fluido no coletor, mostrado na Eq. (6).

$$\eta_m = F'(\tau\alpha_a)_e - F'U_L\frac{(T_m - T_a)}{G_T} \quad (6)$$

na qual η_m é a eficiência térmica do coletor solar em função de T_m, F' é o fator de eficiência, T_m é a média aritmética das temperaturas do fluido nas seções de entrada e saída do coletor, sendo $T_m = (T_e + T_s)/2$.

Se os valores de eficiência térmica η_m e η_e forem representados graficamente em um plano cartesiano versus $((T_m - T_a)/ G_T)$ e $((T_e - T_a)/ G_T)$, respectivamente, resultará, para cada taxa mássica, em uma reta onde o coeficiente linear é dado por $F'(\tau\alpha_\alpha)_e$ e $F_R(\tau\alpha_\alpha)_e$ de acordo com a temperatura utilizada de referência, onde os coeficientes angulares serão, analogamente, $F'U_L$ e $F_R U_L$ (Ancines, 2018).

2.4.2 Quantidade de energia fotovoltaica

Módulos fotovoltaicos são compostos por células solares que convertem energia solar diretamente em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, a partir de um material semicondutor, usualmente silício. A norma internacional IEC 60904-3, 2008, determina como medir o desempenho elétrico do módulo fotovoltaico nas condições padrão de testes, com valores de irradiância e temperatura das células igual a 1.000W/m² e 25°C, respectivamente, assim encontrando a curva característica I-V do módulo fotovoltaico.

Esses resultados obtidos da curva indicam os principais parâmetros elétricos que determinam a qualidade e o desempenho dos módulos fotovoltaicos, sendo eles, a tensão de circuito aberto (V_{OC}), medida entre os terminais da célula sem circulação de corrente elétrica, a corrente de curto-circuito (I_{SC}), medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual à zero. Essa corrente depende da área da célula, da irradiância solar e de

sua distribuição espectral, das propriedades ópticas e da probabilidade de coleta dos pares elétrons-lacuna formados e, fator de forma (FF), a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto, definido pela Eq. (7).

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (7)$$

na qual V_{MP} e I_{MP} são a tensão e a corrente na máxima potência, respectivamente.

Com esses parâmetros definidos pela curva característica é possível obter a eficiência elétrica das células que compõem o módulo fotovoltaico, ou seja, o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica (η_{el}). Essa eficiência é definida pela Eq. (8).

$$\eta_{el} = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{A G_T} x100\% = \frac{P_{MP}}{A G_T} x100\% \quad (8)$$

na qual A é a área da célula ou do módulo, P_{MP} é a potência máxima, e G_T é a irradiância solar incidente.

Além desses parâmetros encontrados a partir da curva característica I-V, sabe-se que a temperatura das células fotovoltaicas também influencia nos resultados de sua eficiência elétrica. Essa temperatura é a temperatura nominal de cada módulo fotovoltaico obtida quando o mesmo é exposto, em circuito aberto, a uma irradiância de 800 W/m², temperatura ambiente de 20 °C e uma velocidade do vento incidindo sobre ele de 1 m/s, conhecida geralmente pela sigla NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*). O valor de NOCT normalmente é indicado pelo fabricante e, com seu valor conhecido, pode-se encontrar o valor do coeficiente K_t pela Eq. (9).

$$K_t = \frac{NOCT - 20}{800} \quad (9)$$

no qual K_t é o coeficiente térmico para o módulo, que permite estimar o aumento de temperatura causado pela incidência da radiação solar, quando a velocidade do vento é baixa.

Para um módulo fotovoltaico convencional, sabendo o seu valor de coeficiente térmico estima-se a temperatura das células em uma determinada condição de temperatura ambiente e irradiância usando a Eq. (10).

$$T_{mod} = T_a + K_t G_T \quad (10)$$

na qual T_{mod} é a temperatura das células do módulo fotovoltaico, T_a é a temperatura ambiente, G_T é a irradiância incidente sobre o módulo.

2.5 O *software* TRNSYS

O *software* de simulação utilizado neste estudo foi o TRNSYS 18. Com ele foi possível simular o comportamento elétrico e térmico de um coletor híbrido PVT. Esse *software* foi desenvolvido em 1974, no Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin, Madison, USA. Desde então, é amplamente utilizado na análise de sistemas térmicos, entre outros.

Sua proposição inicial era propiciar a simulação de sistemas visando o emprego e a racionalização do uso de energia solar em construções, ou processos, ativa ou passivamente. Embora a simulação esteja focada em sistemas térmicos, o *software* também permite a avaliação de sistemas fotovoltaicos.

O *software* adota uma metodologia na qual o sistema global em funcionamento é reduzido em uma configuração de subsistemas interconectados, similar a um diagrama de blocos. Cada um desses blocos é denominado de *type.* Os parâmetros de projeto, ou do dispositivo, são inseridos pelo usuário. Possui uma biblioteca que abrange componentes utilizados em sistemas envolvendo energia térmica e energia elétrica, além de sub-rotinas para dados meteorológicos e outras funções dependentes do tempo.

O projeto foi construído na interface gráfica do *software* TRNSYS. Cada componente do sistema possui um número que identifica uma subrotina. Os componentes utilizados no sistema serão especificados a seguir.

a) Base de dados climática: *type* 15

Esse componente tem como função efetuar a leitura de dados em intervalos regulares de um arquivo de dados climáticos externos, interpolar os dados (incluindo radiação solar

para superfícies inclinadas) em intervalos de tempo inferiores a uma hora e disponibilizá-los para outros componentes. O modelo também calcula vários termos úteis, incluindo a temperatura da água da rede, a temperatura efetiva do céu, entre outros. Na simulação optou-se por utilizar o *type* 15 no formato TMY2 (formato usado pelo National Solar Radiation Data Base nos E.U.A.), que lê os dados climáticos gerados a partir do programa Meteonorm V.

b) Coletor PV-T: *type* 50

É um componente usado para simular um coletor híbrido fotovoltaico térmico. Este componente é um suplemento ao *type* 1, o qual representa um coletor solar térmico do tipo placa plana. A diferença está na substituição da placa absorvedora por um módulo FV. O modelo matemático para a simulação do módulo PVT combina o equacionamento para um coletor de placa plana (Duffie e Beckman, 2013) e o modelo de Florschuetz (1979) para um módulo fotovoltaico operando em potência de pico.

c) Bomba de água: *type* 114

Este componente processa a vazão mássica do sistema usando uma função de controle variável, que deverá ter um valor entre 0 e 1, e uma capacidade máxima de fluxo fixa.

d) Perfil de consumo: *type* 14

Através deste componente é possível definir o perfil de consumo de água. Essa função permite padronizar o funcionamento do sistema, mais especificamente a bomba, atribuindo-lhe horários para ligar e desligar.

e) Tanque: *type* 158

Esta sub-rotina modela um tanque de armazenamento de volume constante cheio de fluido com uma configuração vertical. O fluido no tanque de armazenamento interage com o meio ambiente (por meio de perdas térmicas na parte superior, inferior e nas bordas) e com até duas correntes de fluxo que passam para dentro e para fora do tanque de armazenamento. O tanque é dividido em nós de temperatura isotérmica (para modelar a estratificação observada em tanques de armazenamento) onde o usuário controla o grau de estratificação através da especificação do número de “nós”.

f) Controlador: *type* 2

Este componente é um controlador On/Off, que gera um sinal que é 1 quando On, e 0 quando Off. É através deste controlador que se vai definir o valor da função de controle variável da bomba de água. O valor do sinal é escolhido em função da diferença de

temperaturas de entrada e saída de água do coletor, comparando esta diferença de temperatura com *deadbands* definidas pelo utilizador.

g) Função plotadora: *type* 65

Componente gráfico que exibe variáveis pré-selecionadas pelo usuário enquanto a simulação está em andamento. Permite a análise do funcionamento do sistema.

h) Integradora: *type* 24

Este componente permite a integração das variáveis de entrada, num período de tempo definido pelo utilizador.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a metodologia que compõe esse trabalho, sendo detalhados os tipos de pesquisa e os métodos e materiais adotados na mesma. Posteriormente apresentar-se-á as variáveis e indicadores que possuem na pesquisa, seguido da exposição de como foi feita a coleta de dados e a tabulação de resultados.

3.1 Tipos de pesquisa

A pesquisa pode ser classificada de acordo com os seus objetivos, a sua forma de abordagem, e quanto aos procedimentos técnicos utilizados.

Com relação aos objetivos da pesquisa, ela pode ser exploratória, que, para Gil (2008), tem o objetivo de proporcionar uma visão geral acerca de determinado fato, com a finalidade de explicitar e aumentar a familiaridade com o problema. Descritiva, que analisa, observa, registra e correlaciona aspectos que envolvem fatos ou fenômenos, sem manipulá-los. Para Triviños (1987) este tipo de pesquisa exige uma precisa delimitação de técnicas, métodos, modelos e teorias na coleta e interpretação de dados, e ainda assim podem existir resultados equivocados que geram imprecisão. E explicativa, que, segundo Gil (2008) é a que mais aprofunda o conhecimento da realidade, sendo o tipo de pesquisa mais complexo e delicado. Tendo a preocupação de identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos.

De acordo com a forma de abordagem, a pesquisa pode ser qualitativa ou quantitativa. De acordo com Minayo (2009), a pesquisa qualitativa trata dos significados, com um nível de realidade que não é quantificado. Já a pesquisa quantitativa, para Fonseca (2002), está centrada na objetividade, recorrendo à linguagem matemática para traduzir as informações. A utilização conjunta da pesquisa qualitativa e quantitativa é interessante por permitir recolher mais informações do que se conseguiria isoladamente.

Quanto aos procedimentos técnicos utilizados, Gil (2008) afirma que a pesquisa bibliográfica se dá a partir de material já elaborado, como livros e artigos científicos. Fonseca (2002) sugere cuidado ao selecionar e analisar documentos de pesquisa, para não comprometer a qualidade do estudo com erros de dados coletados ou processados de forma equivocada. Gil (2008) diz que a diferença entre a pesquisa bibliográfica e documental está na natureza da fonte de pesquisa, a pesquisa documental, segundo Fonseca (2002), recorre a

fontes mais diversificadas e dispersas, sem tratamento analítico. Para Gil (2008), a pesquisa experimental "consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto". São responsáveis por grandes avanços tecnológicos e científicos. De acordo com Yin (2005), o estudo de caso se dá por um estudo empírico de investigação de um fenômeno atual dentro do seu contexto de realidade. Conforme França (2017), pesquisa ação estabelece a relação de uma ação com a resolução de um problema coletivo, e pesquisa participante, é desenvolvida a partir da interação entre pesquisador e membros das situações investigadas.

Dessa forma, o presente trabalho consiste em uma pesquisa exploratória do sistema de aquecimento de água e produção de energia elétrica por meio de coletor solar híbrido, com abordagem qualitativa e quantitativa do dimensionamento de um coletor solar híbrido, utilizando de pesquisa bibliográfica e estudo de caso de um sistema típico.

3.2 Materiais e métodos

O presente trabalho realizou a análise do comportamento de um coletor solar híbrido para aquecimento de água e produção de energia elétrica.

O fluxograma da Figura 10 mostra as etapas de desenvolvimento do trabalho.

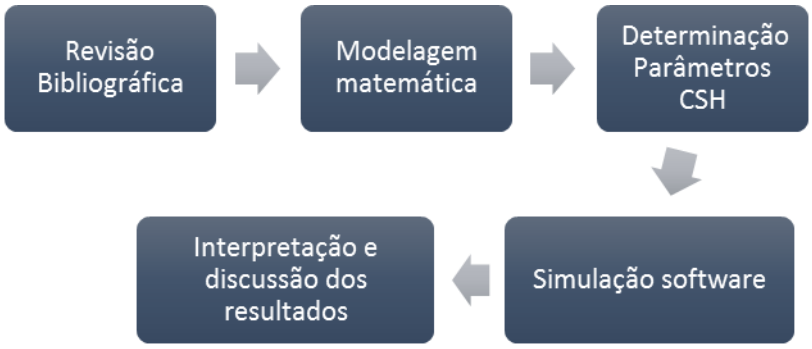

Figura 10 - Fluxograma das etapas do trabalho.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Inicialmente foi necessário um estudo bibliográfico a fim de apresentar uma visão geral sobre o tema. Então foi feita a modelagem matemática do coletor solar híbrido, a partir do equacionamento da transferência de energia ocorrida no processo. Assim, conseguiu-se

encontrar parâmetros do coletor em determinadas condições de trabalho. Posteriormente foi feita a simulação do coletor híbrido em um sistema típico através de um *software* de análise de sistemas solares, o *software* TRNSYS. Com os resultados obtidos, avaliou-se o comportamento e desempenho do sistema híbrido.

3.3 Variáveis e indicadores

Triviños (1987) conceitua variável como característica perceptível de algo que pode assumir diversos valores. Gil (2008) afirma que uma variável pode conduzir diversos indicadores que as caracterizam, e para a escolha desses indicadores, é necessário um aprofundamento sobre o problema analisado. A Tabela 1 indica a variável principal e seus respectivos indicadores, que serão utilizados nesse trabalho.

Variável	Indicadores
Coletor solar híbrido	• Modelo matemático; • Parâmetros climáticos; • Parâmetros de projeto; • Parâmetros operacionais; • Simulação em *software*.

Tabela 1 - Variável e Indicadores.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

3.4 Instrumentos de coleta de dados

Como mencionado anteriormente, este trabalho trata de uma pesquisa bibliográfica e estudo de caso, logo, os instrumentos de coleta de dados serão livros, obras acadêmicas, dissertações, catálogos, entre outros.

3.5 Tabulação de dados

Foi utilizado o software TRNSYS para simulação do estudo de caso, o programa Microsoft Excel para a realização de cálculos necessários para dimensionamento do coletor solar híbrido, além de construção de tabelas e gráficos, e o programa Microsoft Word para o desenvolvimento do trabalho.

3.6 Considerações finais

Nesse capítulo foi possível acompanhar as etapas em que o trabalho foi desenvolvido, junto com os métodos e materiais que foram utilizados, sendo possível também visualizar os instrumentos de análises de dados, e as formas em que os dados foram apresentados.

No próximo capítulo serão mostrados os resultados referentes à análise do coletor solar híbrido.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos na simulação do coletor híbrido, bem como as discussões cabíveis ao estudo.

4.1 Sistema híbrido - TRNSYS

O sistema PVT modelado neste trabalho é ilustrado na Figura 11. O sistema é composto basicamente por um coletor PVT conectado a um tanque de armazenamento de água, uma bomba de circulação, um controlador diferencial e um perfil de demanda de água quente.

A entrada no sistema são os dados meteorológicos: irradiação solar, temperatura ambiente, temperatura da água da rede e velocidade do vento. A estratégia de controle da bomba modelada pelo controlador diferencial é baseada nas temperaturas de entrada e saída da água no coletor e na demanda de água quente. A bomba circula a água do tanque quando a energia (ganho térmico) pode ser coletada e o tanque é esvaziado pela carga de água quente.

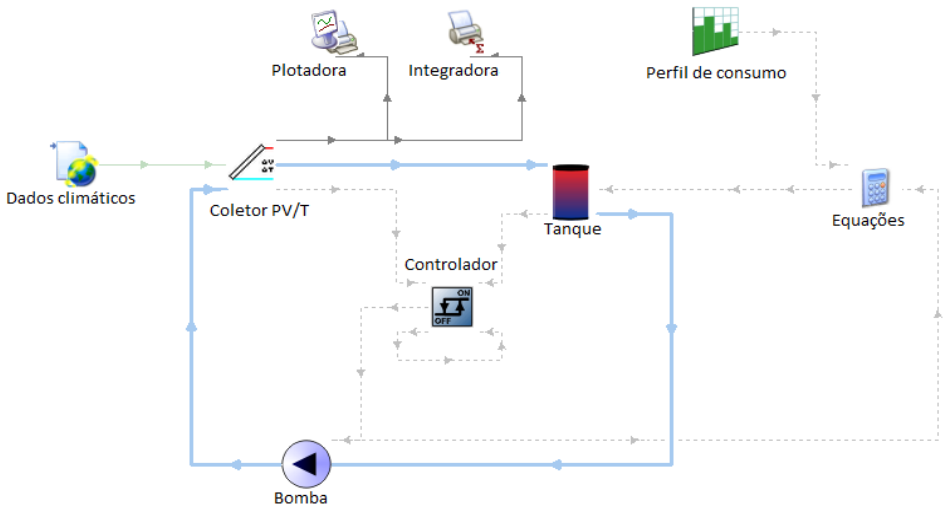

Figura 11 – Sistema montado na interface do TRNSYS.
Fonte: TRNSYS (2021).

Para análise do funcionamento do sistema, as variáveis pré-selecionadas são exibidas em gráfico enquanto a simulação está em andamento, e podem também ser integradas num período de tempo definido.

4.2 Parâmetros de entrada da simulação

Os parâmetros de entrada da simulação referem-se aos dados de entrada do coletor PVT e aos dados de entrada do circuito, utilizados no *software* TRNSYS.

4.2.1 Dados de entrada do Coletor PVT

O coletor PVT usado na simulação é um coletor fotovoltaico térmico de placa plana envidraçado com células de silício monocristalino, baseado no painel híbrido do fabricante francês DualSun (Figura 12). A lista de parâmetros de entrada usados para o coletor PVT do *software* TRNSYS podem ser encontrados na Tabela 2.

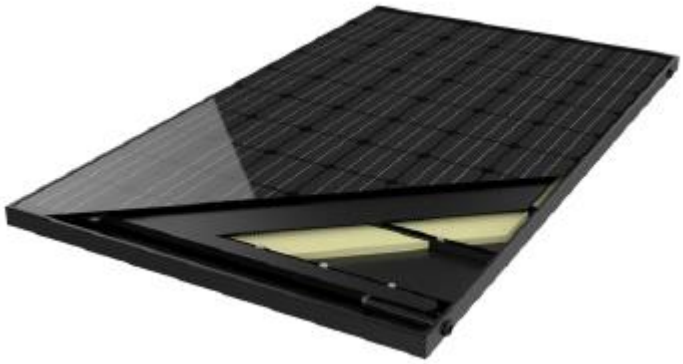

Figura 12 – Exemplo de um painel PVT típico do fabricante DualSun.
Fonte: Dualsun (2021).

Área do coletor	5,4	[m^2]
Fator de eficiência do coletor	0,8	-
Calor específico do fluido	4,19	[kJ/kgK]
Absortividade da placa coletora	0,9	-
Emissividade da placa coletora	0.8	-
Número de coberturas	1	-
Coeficiente de perdas inferior e laterais	2,78	[W/m^2K]
Produto entre coeficiente de extinção e espessura	0.06	-
Coeficiente de Temperatura da célula	-0,004	[1/K]
Temperatura de referência para eficiência da célula	298,15	[K]
Fator de ocupação	0,9	-
Eficiência da célula nas condições de referência	15	[%]

Tabela 2- Parâmetros de entrada do coletor PVT.

Fonte: Adaptado de Collins e Zondag (2009).

A área do coletor foi configurada para incluir os três painéis PVT com 1,8 m^2 cada, totalizando 5,4 m^2 de área. O fator de eficiência do coletor é utilizado como indicador da eficácia da troca de calor entre a placa e o fluido de trabalho, e seu valor, que geralmente está compreendido entre 0,7 e 0,9, é totalmente dependente da tecnologia PVT. O calor específico é determinado pelo fluido no coletor, no caso água. Os valores para a absortividade e a emissividade estão associados a um coletor de placa plana de liga de alumínio. O número de coberturas refere-se à quantidade de camadas de vidro que encapsulam a parte superior do coletor PVT, no caso um. O coeficiente de perdas corresponde ao somatório das perdas térmicas na parte traseira e lateral do coletor PVT. O coeficiente de extinção trata-se da medida de quanta radiação do espectro solar é absorvida ao passar pela cobertura de vidro, que é então multiplicada pela espessura do vidro.

Os parâmetros fotovoltaicos são encontrados geralmente nas especificações do fabricante. O coeficiente de temperatura da célula denota a redução da eficiência por grau Kelvin. Isso significa que a eficiência do coletor vai diminuir 0,4% (em relação à eficiência nominal) para cada aumento de 1 K na temperatura de operação das células fotovoltaicas. A temperatura para a eficiência de referência da célula corresponde às condições padrão de teste dos módulos (STC – *Standard Testing Conditions*). O fator de ocupação nada mais é que a razão entre a área de células fotovoltaicas e a área total do coletor. E a eficiência da célula nas condições de referência é a eficiência obtida nas STC.

Todos os parâmetros de entrada do coletor foram obtidos seguindo os valores padrão recomendados por Collins e Zondag (2009) para simulação do coletor fotovoltaico térmico no *software* TRNSYS.

4.2.2 Dados de entrada do Circuito

Os dados de entrada do circuito para o sistema são mostrados na Tabela 3.

Consumo de água	200	[L/dia]
Volume do tanque	500	[L]
Vazão mássica do fluido na bomba	216	[kg/h]
Tempo de funcionamento da bomba	6-18	[h]
Declive da superfície latitude local	20	[°]

Tabela 3 - Principais parâmetros de entrada do circuito.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Foi assumido um consumo diário de água quente de 200 litros por dia para o sistema. O volume do tanque foi definido usando a regra prática de 50 a 100 litros por cada metro quadrado de coletor e a vazão mássica do sistema foi definida através da regra prática de usar 40 kg/hora por metro quadrado de área coletora (Oliveira, 2008).

A fim de obter um melhor desempenho do sistema, o perfil de consumo foi definido como constante das 6 horas da manhã às 6 horas da tarde. As diferenças relativamente a um perfil real de consumo não deverão ser significativas. Determinou-se que a inclinação fosse igual à latitude do local escolhido para a simulação (Belo Horizonte, MG), de forma a favorecer a captação durante o ano inteiro.

4.3 Resultados da simulação

As simulações detalhadas no *software* TRNSYS, para análise térmica e elétrica do sistema PVT, foram realizadas para o período significativo de uma semana (de 24 de junho a 30 de junho) e para os dados climáticos de Belo Horizonte, MG, com intervalo de 15 minutos. Além disso, foi realizada uma simulação para determinar a produção mensal de energia elétrica e térmica durante um ano para a mesma localidade.

As potências térmica e elétrica de saída do coletor híbrido e a irradiação solar total para os dias 24 a 30 de junho são ilustradas pelo gráfico presente na Figura 13.

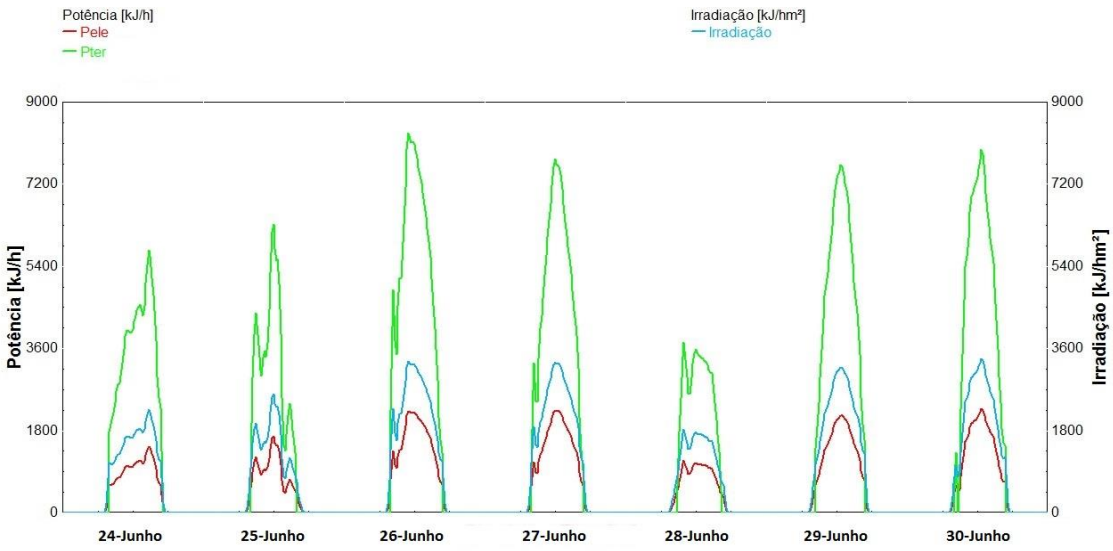

Figura 13 - Irradiação solar e potência elétrica de saída do sistema durante os dias 24 a 30 de junho para Belo Horizonte, MG.

Fonte: TRNSYS (2021).

Realizando a integração das potências, é possível obter a quantidade de energia que é produzida pelo sistema fotovoltaico térmico. Os valores diários da produção de energia térmica e elétrica do sistema e a irradiação solar são mostrados na Tabela 4.

Dia de Junho	Irradiação (Wh/m²)	Energia Térmica (Wh)	Energia Elétrica (Wh)
24	4154	8326	2535
25	3625	6203	2226
26	6229	13206	4022
27	6094	11632	3918
28	3401	4410	2060
29	5772	11187	3687
30	5751	10978	3696

Tabela 4- Irradiação solar e produção térmica e elétrica do sistema para os dias 24 a 30 de junho em Belo Horizonte, MG.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

4.3.1 Análise elétrica

Uma análise da parte elétrica relacionada ao coletor híbrido foi feita para os dias 24 a 30 de junho. Analisando o comportamento das variáveis ao longo do dia, nota-se que normalmente a irradiação solar e, consequentemente a potência elétrica do coletor PVT, começam a apresentar valores maiores do que zero a partir das 7 horas da manhã, alcançando o seu pico ao meio-dia solar, e depois decaindo novamente até chegar a um valor nulo por volta das 17 horas.

Comparando o perfil diário dos dias analisados, o coletor híbrido apresentou o pior desempenho elétrico no dia 28 de junho, produzindo 2060 Wh, e teve o melhor desempenho elétrico no dia 26 de junho, com uma produção de 4022 Wh. Identificou-se que o dia 26 apresentou a maior irradiação da semana (6229 Wh/m²), e foi o dia que gerou a maior produção de energia elétrica do coletor PVT. Já o dia 28 apresentou a menor irradiação total entre os dias da semana (3401 Wh/m²), e obteve a menor produção de energia elétrica.

Conforme o esperado, a potência elétrica do coletor híbrido apresentou o mesmo formato da curva de irradiação solar de cada dia, já que a energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade. A variação na produção elétrica seguiu de

perto a variação na irradiação solar, com pouca influência da temperatura ambiente e da velocidade do vento.

4.3.2 Análise térmica

Uma análise da parte térmica relacionada ao coletor híbrido foi feita para os mesmos dias supracitados. Abaixo, na Figura 14, apresenta-se a variação diária das temperaturas da água nas seções de entrada e de saída do coletor, e a temperatura ambiente.

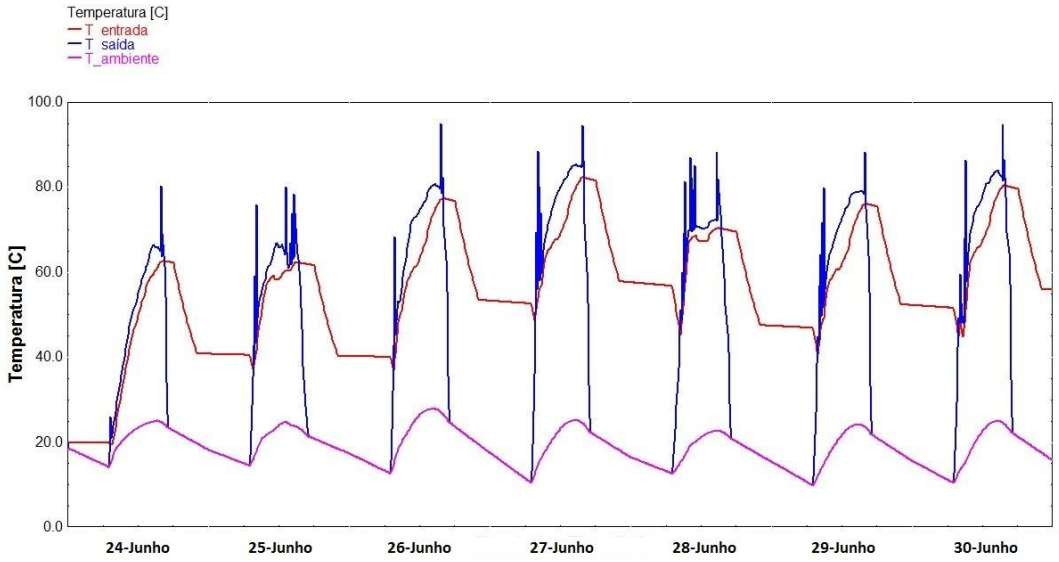

Figura 14 - Temperaturas de entrada e saída do coletor e do ambiente durante os dias 24 a 30 de junho para Belo Horizonte, MG.
Fonte: TRNSYS (2021).

O gráfico ilustra diariamente um aumento da temperatura de entrada da água no coletor híbrido, influenciando a temperatura de saída do mesmo. A diferença das duas temperaturas (ΔT) começa a apresentar valores maiores do que zero um pouco depois das 7 horas da manhã, alcançando normalmente o seu pico ao meio-dia solar, e depois decaindo novamente até chegar a um valor nulo por volta das 17 horas.

Durante o tempo em que o sistema não está em funcionamento ao longo da noite a temperatura de saída do coletor corresponde a temperatura ambiente de Belo Horizonte. A temperatura de saída obtida (50, 60, 70, 80ºC) misturada com a água fria é apropriada para utilização em banhos, piscinas, entre outras aplicações.

Identificou-se que o dia 26 apresentou os maiores valores médios de ΔT, com pico ao meio-dia solar de 11 °C, e teve o melhor desempenho térmico do coletor PVT, produzindo 13206 Wh. Já o dia 28 apresentou os menores valores médios de ΔT, por volta de 3 °C, e obteve a menor produção de energia térmica (4410 Wh) e consequentemente o pior desempenho térmico.

A curva da potência térmica do coletor apresentou variações similares às variações de ΔT que, por sinal, seguiu de perto a curva da irradiação solar. Ou seja, a diferença entre as temperaturas nas seções de entrada e saída do coletor está diretamente ligada ao ganho de energia térmica útil.

4.3.3 Análise anual

Realizando a simulação no *software* para um ano típico inteiro e integrando a potência por mês, é possível obter a quantidade de energia gerada pelo sistema híbrido. Os valores mensais para a produção de energia térmica e elétrica do sistema são comparados e o resultado é mostrado na Tabela 5, juntamente com a irradiação solar.

Mês	Irradiação (kWh/m²)	Energia Térmica (kWh)	Energia Elétrica (kWh)
Janeiro	124,02	225,54	76,29
Fevereiro	149,06	274,79	91,81
Março	127,86	233,38	77,89
Abril	141,77	266,28	87,25
Maio	135,82	261,86	84,07
Junho	138,43	262,64	81,83
Julho	151,42	289,81	90,96
Agosto	156,46	303,21	96,30
Setembro	149,94	274,80	89,42
Outubro	136,03	246,63	82,92
Novembro	135,22	239,16	81,80
Dezembro	122,20	227,07	75,80

Tabela 5- Irradiação solar e produção mensal térmica e elétrica do sistema para um ano típico de Belo Horizonte, MG.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Os valores médios da produção mensal de energia térmica e elétrica encontrados foram 259 kWh e 85 kWh, respectivamente. Para melhor análise de desempenho do sistema foram obtidas as eficiências energéticas mensais. A partir da análise da Figura 15, percebe-se que os valores obtidos de eficiência térmica e elétrica não demonstraram grandes variações ao longo dos meses, devido ao fato do Brasil possuir níveis de radiação solar regulares o ano todo.

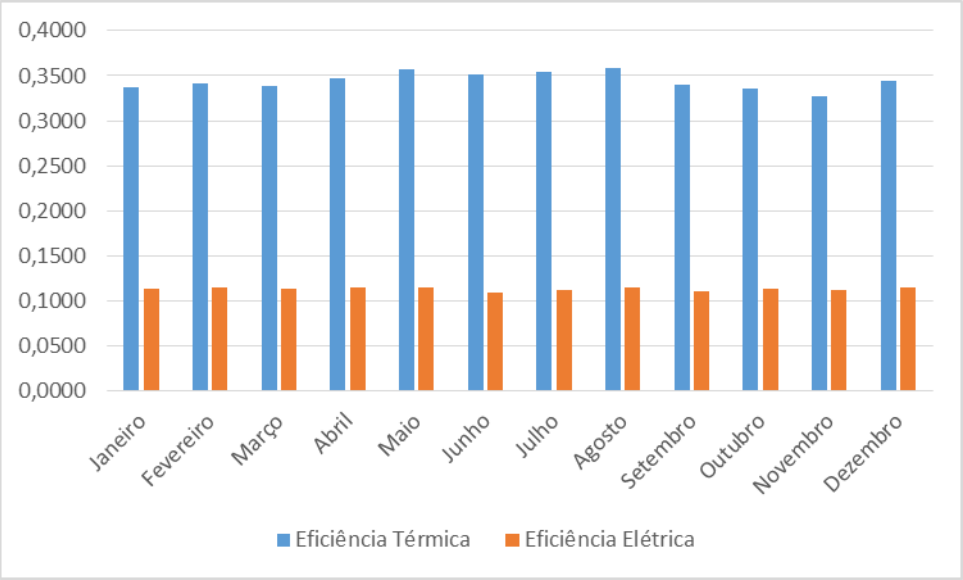

Figura 15 - Eficiências térmica e elétrica mensais do sistema para um ano típico de Belo Horizonte, MG.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Os resultados indicaram que o coletor fotovoltaico térmico operou com eficiências térmicas e elétricas médias de 34,4% e 11,3%, respectivamente.

Zondag *et al.* (2003) obtiveram, no seu estudo sobre rendimento de diferentes tipos de coletores combinados PVT, valores de 35% e 8% para as eficiências térmica e elétrica de um coletor similar ao simulado nesse trabalho. Khandelwal *et al.* (2007) concluíram, a partir de simulações e experimentos para dois tipos de coletores híbridos, que o sistema PVT produz eficiências térmicas e elétricas na ordem de 30-35% e 7-12%, respectivamente.

Tripanagnostopoulos e Tselepis (2002) obtiveram em seu trabalho sobre a análise de um modelo híbrido experimental na capital da Grécia, eficiência térmica de 35,8% e eficiência elétrica de 12,6 %. Bhattarai *et al.* (2011) encontraram, a partir da abordagem numérica para estudo comparativo de desempenho de sistema fotovoltaico / térmico híbrido tipo caixa e tipo de tubo, eficiências térmicas de 29,5% a 35,8% e eficiências elétricas de

13,3% a 14,1%. Huang (2014) simulou no computador um sistema fotovoltaico térmico em Taiwan e os resultados mostraram que a eficiência elétrica do sistema foi de 11,7 a 12,4% e a eficiência térmica foi de 26,78 a 28,41%.

Conclui-se que os resultados da simulação se mostram bastante satisfatórios por se encontrarem dentro da faixa de valores esperada, de acordo com diversas pesquisas realizadas sobre sistemas PVT.

De acordo com dados tabelados do INMETRO em 2018, a eficiência média de módulos fotovoltaicos de silício cristalino com classificação nível A gira em torno de 16%, e a eficiência média de coletores solares para banho com classificação nível A gira em torno de 60%. Logo constata-se que as eficiências térmica e elétrica do sistema híbrido obtidas na simulação são bem menores que as respectivas eficiências tabeladas do coletor solar e do módulo fotovoltaico comerciais.

Foi demonstrado, que apesar de obter menor quantidade de energia elétrica do que o sistema fotovoltaico e menor quantidade de energia térmica do que o sistema solar térmico, o sistema híbrido obtém quantidades significativas de ambos os tipos de energia simultaneamente. Ou seja, o sistema híbrido integra os recursos de energia fotovoltaica e sistemas térmicos solares em um componente combinado e eficiente, reduzindo custos de material, instalação, manutenção e também o espaço de instalação.

Os resultados mostraram que o *software* foi capaz de fornecer uma simulação coerente do desempenho térmico e elétrico do sistema. Algumas das limitações desta simulação e seus resultados são a simplicidade do modelo PVT em comparação com uma análise completa de elementos finitos, o fato de que todos os componentes são predefinidos no *software* TRNSYS e, portanto, uma personalização completa é difícil, os perfis de consumidor foram obtidos por meio de funções de força e métodos estatísticos e pode variar significativamente de acordo com o usuário final individual e a localização do sistema.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

5.1 Conclusão

Os sistemas de coletores solares térmicos e módulos fotovoltaicos são tecnologias consolidadas em pesquisas acadêmicas e também no mercado, sendo aceito por empresas e consumidores, tendo subsídios e apoio governamental. Porém, os coletores híbridos fotovoltaicos térmicos ainda precisam de reconhecimento e maior confiança nas vantagens do sistema, principalmente nos parâmetros que alteram a eficiência térmica. É importante continuar as pesquisas e obter coletores PVT viáveis comercialmente, em larga escala, sabendo prever a eficiência global para várias localidades e efeitos em longo prazo, para assim, conseguir controle de tempo de período de retorno do investimento.

Para se obter uma correta previsão de comportamento dos módulos, é de vital importância o conhecimento de todos os parâmetros, tanto climáticos, como os de projeto e operação para que os resultados sejam válidos para situações reais. O *software* que se mostrou mais apto a resolver problemas, com maior número de publicações, e pela possibilidade de uso foi o TRNSYS. Os resultados mostraram que o software tem sido capaz de fornecer uma simulação coerente do desempenho térmico e elétrico do sistema.

Os resultados da simulação indicaram que o coletor fotovoltaico térmico operou com eficiências térmicas e elétricas médias de 34,4% e 11,3% respectivamente. Conclui-se que tais resultados se mostram bastante satisfatórios por coincidirem com resultados obtidos em trabalhos similares sobre o tema.

Foi demonstrado que apesar de obter menor quantidade de energia elétrica do que o sistema fotovoltaico e menor quantidade de energia térmica do que o sistema solar térmico, o sistema híbrido obtém quantidades significativas de ambos os tipos de energia simultaneamente. A tecnologia do sistema PVT combinada para geração de energia solar é capaz de fornecer eletricidade e aquecimento de água em apenas um componente integrado e eficiente. No geral, o PVT em pequena escala aponta como uma solução promissora para o aproveitamento da energia solar.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

- Realizar um estudo comparativo de desempenho entre um coletor híbrido, um coletor solar térmico e um módulo fotovoltaico a partir de simulações no *software* TRNSYS;

- Executar uma análise paramétrica variando as grandezas de entrada do sistema e analisando os efeitos provocados nas eficiências térmica e elétrica;

- Realizar estudos de viabilidade econômica, comparando os diferentes sistemas: híbrido, solar térmico e fotovoltaico.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Banco de Informações de Geração - BIG. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso m: 28 de outubro de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. *Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira*. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em: 28 de outubro de 2020.

CENTRO DE REFERENCIA PARA ENERGIA SOLAR E EOLICA SERGIO DE SALVO BRITO - CRESESB. *Manual para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 28 de outubro de 2020.

PEREIRA, et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 28 de outubro de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 2.ed. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.etormann.tk/2010/02/atlas-de-energia-eletrica-do-brasil-2.html>. Acesso m: 28 de outubro de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 1.ed. Brasília, 2002. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf> Acesso m: 28 de outubro de 2020.

RIBEIRO, Nadja Cardoso Campos. *Análise de Sistema Híbrido Solar: Fotovoltaico e Térmico*. Brasília, 2016.

ALMEIDA, Laura Manuela Melo Carvalho Esteves de. *Estudo de um Coletor Solar Híbrido para Produção de Eletricidade e Calor*. Porto, Portugal, 2008.

LUZZI, Daniel Contarin. *Comparação de desempenho entre coletor híbrido térmico fotovoltaico e módulo fotovoltaico*. Porto Alegre, 2017.

GUERRA, Maria Izabel da Silva. *Análise do Desempenho Elétrico de um Gerador Fotovoltaico com o Auxílio da Tecnologia PVT*. João Pessoa, 2016.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. *Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica.* Lavras, 2004.

COELHO, Daniel Moreira. *Identificação de variáveis críticas e simulação do uso de coletores solares em prédios residenciais.* Rio de Janeiro, 2011.

LOURENÇO, Pedro Miguel da Silva. *Modelação de Coletores Solares Térmicos.* Lisboa, Portugal, 2012.

FARIA, Lucas Paglioni Pataro. *Modelagem matemática e avaliação experimental da não uniformidade do escoamento da agua em coletores solares planos.* Belo Horizonte, 2007.

SOUSA, Gleison Vieira de; LEITE, Wander Cordeiro. *O bombeamento de água através do uso de energia solar fotovoltaica.* Campo dos Goytacazes, 2013.

SILVA, Jorge José Barbosa da. *Análise técnica e econômica de um sistema fotovoltaico como fonte de energia para agricultura familiar.* Lavras, 2014.

MARQUES, R. L. M. R. P. *Avaliação da viabilidade de coletores híbridos fotovoltaicos e térmicos para aplicação ao aquecimento de águas e micro-geração de eletricidade*. 2008. 111p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Arthur Vieira de Oliveira; Newton Cesário Frateschi. *Sistema híbrido de aquecimento solar de água e geração fotovoltaica com melhor aproveitamento da energia solar.* BR n. PI 1004669-0, 24 nov. 2010, 05 mar. 2013.

VIANA, P. R. *Avaliação experimental de um protótipo de coletor solar híbrido para geração simultânea de água quente e eletricidade*. 2014. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

ANCINES, Crissiane Alves. *Comparação entre o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico com o de um coletor plano e um modulo fotovoltaico convencional.* Porto Alegre, 2016.

TEIXEIRA, Tiago Rafael Contins. *Estudo de um Sistema Híbrido com Coletores Solares Termo-Fotovoltaicos Acoplados a um Termogerador Eléctrico.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

BILHALVA, Edison Estivalete Junior. *Análise comparativa entre módulos FV padrão e híbrido tipo PVT.* Porto Alegre, 2018.

CHOW, T.T. *Performance analysis of photovoltaicthermal collector by explicit dynamic model.* Solar Energy, 2003.

FLORSCHUETZ, L. W. *Extension of the Hottel-Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal Flat Plate Collectors.* Solar Energy, 1979.

ZONDAG, H. A, DE VRIES, D. W, VAN HELDEN W. G. J, R. J. C. *The Yield of Different Combined PV-Thermal Collector Designs.* Solar Energy, 2003.

KALOGIROU, S. and TRIPANAGONOSTOPOULOS Y. *Hybrid PV/T solar systems for domestic water and electricity production.* Energy Conversion and Management, 2006.

SANDNES, B. and REKSTAD, J. *A Photovoltaic/Thermal (PV/T) Collector With a Polymer Absorber Plate Experimental Study and Analytical Model.* Solar Energy, 2001.

CHOW, T. T. H. W. and JI, J. *Hybrid Photovoltaic-Thermosyphon Water Heating System for Residential Application.* Solar Energy, 2006.

TACHON, L.; HIPOLITO, H. L.; PASSOS, J. C. *Analisys and application of combined photovoltaic/termal (PV/T) flate-plate collectors for low-income residences in brazil.* Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.

KHANDELWAL, S.; REDDY, K. S.; MURTHY, S. Srinivasa. *Performance of contact and non-contact type hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors.* Indian Institute of Technology Madras, India, 2007.

ZONDAG, H. A. *The yield of different combined PV-thermal collector designs.* Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2003.

TRIPANAGONOSTOPOULOS, Y.; TSELEPIS, S. *Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules.* Physics Department, University of Patras, Patra, Greece, 2002.

COLLINS, Mike; ZONDAG, Herbert. *Recommended Standard for the Characterization and Monitoring of PV/Thermal Systems.* Dept. of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2009.

ANNIS, Nicole C. *Performance analysis and modelling of hybrid photovoltaic-thermal solar panels.* Missouri University of Science and Technology, 2015.

BERGER, Jonathan. *The modelling of photovoltaic, solar termal, and photovoltaic/termal domestic hot water systems.* Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2016.

BHATTARAI, S. a.-H. *Numerical approach for comparative performance study of tube type and box type hybrid photovoltaic/thermal system.* Journal of the Korean Solar Energy Society, 2011.

HUANG, C.-Y. a.-J. *A study of photovoltaic thermal (PV/T) hybrid system with computer modeling.* International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2014.

TRNSYS, a Transient Simulation Program.University of Wiscosin-Madison. Solar Energy Laboratory. Madison, Wisconsi: the Laboratory, 2018.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.

ANCINES, C. A. *Analisys of the behaior of a photovoltaic termal hibrid collector for diferente regions of brazil.* UFRGS, Porto Alegre, 2018.