



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA**  
**EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR TIPO**  
**PVT**

**GEISIANE APARECIDA DE LIMA**

**Belo Horizonte, 09 de junho de 2017.**

GEISIANE APARECIDA DE LIMA

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA  
EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR TIPO  
PVT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner  
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2017

L732a

Lima, Geisiane Aparecida de.

Avaliação numérica e experimental da eficiência térmica de um coletor solar tipo PVT/ [manuscrito] / Geisiane Aparecida de Lima. – 2017. 99 f., enc.: il.

Orientador: Rudolf Huebner.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 83-99.

Bibliografia: f. 76-82.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Energia solar - Teses. 3. Aquecimento solar - Teses. 4. Geração de energia fotovoltaica - Teses. 5. Métodos de simulação - Teses. I. Huebner, Rudolf. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA  
TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR TIPO PVT"**

**GEISIANE APARECIDA DE LIMA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Energia e Sustentabilidade".

Dissertação aprovada no dia 09 de junho de 2017.

Por:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Rudolf Huebner", written over a horizontal line.

**Prof. Rudolf Huebner**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Matheus", written over a horizontal line.

**Prof. Matheus Pereira Porto**

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

A large, stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

**Prof. Lucas Paglioni Pataro Faria**

Centro Universitário UNA

À Deus e a minha família.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre estar ao meu lado me guiando e me dando forças para seguir em frente.

Aos meus pais Rosemary e Geraldo e minha irmã Jéssica, pelo amor, paciência, apoio e incentivo em mais um projeto. Devo a vocês todas as vitórias alcançadas.

Ao Guilherme agradeço por toda paciência, ajuda, amor, consolo, força e confiança. Obrigada por compartilhar todos os momentos ao meu lado e por sempre me motivar a vencer.

Aos amigos e familiares pela força e por sempre renderem votos positivos sobre a minha carreira.

Ao Rudolf Huebner pela orientação neste trabalho, por partilhar seus conhecimentos e por ajudar no meu crescimento profissional e pessoal.

Ao professor Lucas Paglioni pela coorientação e pelo convite e confiança para participar do projeto que justifica esta pesquisa.

Ao Fábio Teixeira pelo grandioso apoio e companheirismo na realização das simulações e testes.

Aos integrantes do Gamset pelo auxílio e amizade nesses dois anos de trabalho.

À Equipe do Gepen agradeço por abrirem as portas do laboratório e dividirem os seus conhecimentos para realização dos ensaios.

À CEMIG e FAPEMIG que pelo projeto de P&D 498: “Desenvolvimento de soluções PVT para aumento da eficiência de usinas solares”, deram subsídios financeiros para realização deste trabalho.

*“Se eu soubesse que o mundo terminaria amanhã,  
hoje ainda plantaria uma árvore.”*

*Martin Luther King Jr.*

## RESUMO

A energia solar é considerada a fonte mais abundante e de menor impacto ambiental disponível, mas ainda não obtem uma posição significativa na matriz energética de diversos países, sobretudo nos países em desenvolvimento. Atualmente, o mercado dispõe de diversos dispositivos e métodos para conversão da energia solar em outras formas de energia útil. Dentre elas, duas tecnologias são as mais conhecidas e aplicadas, a de placas planas e os painéis fotovoltaicos. A energia fotovoltaica consiste na conversão direta dos raios solares em eletricidade e a energia térmica se baseia na troca de calor de uma superfície com o fluido de trabalho. Em diversos países como o Brasil, o fluido mais utilizado nessa troca de calor é a água que é direcionada para banho trazendo grandes vantagens. Outra tecnologia que vem ganhando diversos estudos nos últimos anos é o dispositivo PVT, do inglês *Photovoltaic-Thermal*, que consiste no acoplamento das duas tecnologias citadas, promovendo a geração combinada de eletricidade e calor. Para conhecimento e análise de um coletor solar, como o PVT, podem ser realizados estudos experimentais, simulações numéricas e modelagens matemáticas que permitem a verificação do seu desempenho. Neste contexto, este trabalho busca levantar estudos realizados a cerca do sistema PVT, modelar matematicamente o processo de transferência de calor e implementar o modelo matemático no software EES avaliando o desempenho do sistema PVT sob diferentes condições de irradiação e temperatura de entrada da água, avaliar numericamente os processos de transferência de calor no sistema PVT, utilizando-se o programa ANSYS-CFX® 15.0 e finalmente, comparar os resultados simulados com dados obtidos experimentalmente visando conhecer a eficiência térmica do dispositivo em cada uma destas situações. Os resultados obtidos mostram proporcionalidade entre os dados ensaiados e os dados simulados, validando os modelos matemático e computacional. Entretanto, constatou-se valores diferentes quanto a eficiência térmica do coletor. As maiores eficiências térmicas se deram quando a água foi inserida no sistema entre 26 a 32°C alcançando no teste experimental 33%, no EES obteve 45% e na simulação numérica alcançou 41% de desempenho. O presente trabalho faz parte do escopo do projeto P&D 498: “Desenvolvimento de soluções PVT para aumento da eficiência de usinas solares” financiado pela Companhia Energética de Minas Gerais.

**Palavras-chaves:** Energia Solar, Sistema PVT, Aquecimento, Fotovoltaica, Simulação.



## ABSTRACT

The solar energy is considered the most abundant source with the least environmental impact available, but it does not yet have a significant position in the energy matrix of several countries, especially in developing countries. Nowadays, the market has multiple devices and methods to convert sunlight into useful energy. However, two technologies are the most known and applied, the flat plate and photovoltaic panels. The photovoltaic energy consists of the direct conversion of sunlights into electricity and the thermal energy transfers heat from the surface to a working fluid. In several countries like Brazil, the most used fluid to heat Exchange is the water that is used for bath. Another technology that has been receiving several studies in recents years is the PVT - Photovoltaic Thermal device, wich consists of to connect the two technologies mentioned, to promote the combined generation of electricity and heat. For the knowledge and analysis of a solar collector, such as the PVT, experimental studies, numerical simulations and mathematical models can be used to verify its performance. In this context, this work search to find studies about the PVT system, make a mathematic model of the heat transfer process and implement the mathematical model in the EES software evaluating the performance of the PVT system under different conditions of irradiation and water inlet temperature, to evaluate numerically the processes of heat transfer in the PVT system, using the program ANSYS-CFX® 15.0 and finally, to compare the simulated results with data obtained experimentally in order to know the thermal efficiency of the device in each of these situations. The obtained results show proportionality between the data tested and the simulated data, validating the mathematical and computational models. However, different values were observed about the thermal efficiency of the collector. The highest thermal efficiencies were given when the water was inserted in the system between 26 to 32 °C reaching in the experimental test 33%, in the EES obtained 45% and in the numerical simulation reached 41% of performance. The present work is part of the scope of the 498 project: "Development of PVT solutions to increase the efficiency of solar power plants" financed by Minas Gerais energy company (CEMIG).

**Key-words:** Solar Energy, PVT System, Heating, Photovoltaic, Simulation.

## LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 2.1 – Mapa da radiação solar global	23
Figura 2.2 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica e o efeito fotovoltaico	29
Figura 2.3 – Configurações de um sistema fotovoltaico autônomo em função da carga utilizada	31
Figura 2.4 – Componentes de um coletor solar plano	35
Figura 2.5 – Sistema de aquecimento solar residencial por circulação natural	36
Figura 2.6 – Sistema de aquecimento solar por circulação forçada	36
Figura 2.7 – Vista explodida de um sistema PVT	38
Figura 2.8 – Categorias de coletores PVT, conforme Zondag (2003)	40
Figura 2.9 – Representação espectral da absorção, reflexão e conversão fotovoltaica de uma célula solar tipo c-Si	43
Figura 2.10 – Discretização de domínio por método numérico	45
Figura 2.11 – Circuito térmico para um coletor PVT com uma cobertura	48
Figura 3.1 – Detalhe da construção do coletor PVT em teste	50
Figura 3.2 – Detalhe da construção do coletor PVT em teste	50
Figura 3.3 – Posicionamento de elementos do teste sobre o sistema de rastreamento solar	53
Figura 3.4 – Piranômetro utilizado nos testes experimentais	54
Figura 3.5 – Transmissor de temperatura e umidade do ar WTUTA-5800	54
Figura 3.6 – Posicionamento do PT100 para medição da temperatura de entrada da água com proteção térmica	55
Figura 3.7 – Pontos medidos para determinação da velocidade do vento	55
Figura 3.8 – <i>Chiller</i> utilizado na regulação de temperatura da água	56
Figura 3.9 – Sistema hidráulico do ensaio experimental	57
Figura 3.10 – Característica da bomba hidráulica utilizada	57
Figura 3.11 – Multímetro de Multivarredura “Agilent”	57
Figura 3.12 – Detalhe da interface de inserção de dados sobre o teste	58
Figura 3.13 – Detalhe da interface do software de acompanhamento dos dados do ensaio experimental	58
Figura 3.14 – Perspectiva isométrica do coletor PVT construído pelo Solidworks® versão 2015	60
Figura 3.15 – Modelo tridimensional detalhado do coletor solar PVT	61

Figura 3.16 – Detalhe da malha gerada para o coletor solar PVT	61
Figura 3.17 – Fluxos de calor e temperaturas no PVT	64
Figura 4.1 – Perfil de temperatura em alguns pontos no topo do PVT	70
Figura 4.2 – Perfil de temperatura na seção central do coletor PVT em alguns pontos	71
Gráfico 2.1 – Matriz Energética Brasileira ano base 2015	24
Gráfico 2.2 – Participação das fontes usadas para aquecimento de água nos domicílios	26
Gráfico 2.3 – Curva I-V característica de um painel genérico	30
Gráfico 2.4 – Mercado internacional de coletores solares	34
Gráfico 3.1 – Valores finais para velocidade do vento	56
Gráfico 4.1 – Temperatura de saída e entrada de água em cada ponto do PVT	69
Gráfico 4.2 – Eficiência Térmica do PVT em função da Temperatura reduzida	72

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1.1 – Classificação das fontes energéticas	17
Tabela 1.1 - Dados da capacidade de geração de energias renováveis para produção de eletricidade no Brasil e no mundo	19
Tabela 2.1 – Geração Elétrica (GWh) Brasileira	25
Tabela 2.2 – Raking de Geração de Emprego através das energias renováveis	27
Tabela 2.3 – Tipos de coletores solares em função do movimento, absorvedor e faixa de temperatura	35
Tabela 3.1 – Características construtivas do coletor solar tipo PVT em estudo	51
Tabela 3.2 – Características do módulo Fotovoltaico	52
Tabela 3.3 – Pontos medidos para determinação da velocidade do vento	55
Tabela 3.4 – Desvio permitido dos parâmetros para definição de regime permanente	60
Tabela 3.5 – Resumo das estatísticas da malha de cada componente do coletor	62
Tabela 3.6 – Configurações para simulação do coletor PVT	63
Tabela 3.7 – Propriedade dos materiais	63
Tabela 3.8 – Condições de contorno.	63
Tabela 4.1 – Dados experimentais utilizados como dados de entrada nas simulações	67
Tabela 4.2 – Temperatura reduzida dos pontos medidos	68
Tabela 4.3 – Resultados obtidos pelas simulações e ensaio experimental	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABRASOL	Associação Brasileira de Energia Solar Térmica
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, ventilação e Aquecimento
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEPEN	Grupo de Estudo e Pesquisa em Energia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA	Agencia Internacional de Energia Renovável
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
PPGMEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
PVT	<i>Photovoltaic – Thermal Collector</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## NOMENCLATURA

$A_c$	Área do Coletor
$c$	Capacidade térmica da água à temperatura média;
$g$	Albedo
$G$	Radiação
$g$	Aceleração da gravidade
$h_{\text{cond,eva+tedlar}}$	Coefficiente condutivo de calor através do tedlar EVA até o absorvedor do PVT's
$h_{\text{cond,vfv+e}}$	Coefficiente condutivo de calor através da cobertura de vidro e EVA até as células fotovoltaicas
$h_{\text{conv}}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção natural
$h_{mg}$	Comprimento do elemento de uma malha grosseira
$h_{mr}$	Comprimento de elemento de uma malha refinada
$h_{\text{vento}}$	Coefficiente de transferência de calor convectivo no topo do PVT
$I_b$	Radiação direta
$I_d$	Radiação difusa
$i$	Energia térmica interna
$k$	Condutividade térmica
$k_{ar}$	Condutividade térmica do ar à temperatura de filme
$L$	Comprimento
$\dot{m}$	Vazão mássica
$N$	Número total de elementos da malha.
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Numero de Prandtl
$Q_u$	Calor útil
$q_{\text{costas}}$	Fluxo de calor perdido pelas costas do PVT
$q_{\text{topo}}$	Fluxo de calor perdido pelo topo do PVT
$q_{\text{total}}$	Fluxo total de calor perdido pelos coletores ou PVT's
$q_u$	Fluxo de calor útil
$r$	Fator de refinamento da malha
$Ra$	Número de Rayleigh
$R_b$	Fator de Geometria
$S_{\text{eff}}$	Quantidade máxima de energia disponível para conversão em calor útil no

	coletor PVT
S	Radiação absorvida pelo coletor solar
S	Termo fonte
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_{cel}$	Temperatura média das células
$T_{in}$	Temperatura de entrada da água
$T_{out}$	Temperatura de saída da água
$T_{pm}$	Temperatura da placa absorvedora
$T_{red}$	Temperatura reduzida
$T_{ref}$	Temperatura das células nas condições padrões de teste do fabricante.
$T_s$	Temperatura da superfície;
$T_{vidro.fv}$	Temperatura média da cobertura de vidro do módulo fotovoltaico
$T_{cel}$	Temperatura média de operação das células fotovoltaicas
t	Tempo
$U_L$	Coefficiente global de transferência de calor
$V_w$	Velocidade média do vento
$\Delta V_i$	Volume do elemento de malha
we	Potência elétrica gerada por unidade de área pelo módulo fotovoltaico
u, v, w	Velocidades de x, y e z, respectivamente
$\theta$	Ângulo de inclinação
$\beta_{ref}$	Coefficiente de decréscimo da eficiência por aumento unitário de temperatura
$\eta_{el}$	Eficiência elétrica
$\eta_{ref}$	Eficiência elétrica nas condições padrões de teste do fabricante;
$\eta_{th}$	Eficiência térmica
$\tau\alpha_{fv}$	Transmitância e Absortância da cobertura do PVT
$\alpha$	Difusividade térmica
$\alpha$	Absortância
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica volumétrica
$\beta$	Ângulo entre o plano inclinado e o plano horizontal
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\rho$	Densidade
$\tau$	Transmitância do vidro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1.	Objetivos .....	21
1.1.1	Objetivo geral.....	21
1.2.1	Objetivos específicos .....	21
1.2.	Justificativa .....	22
1.3.	Organização do trabalho .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>23</b>
2.1	Recurso Solar .....	23
2.2	Energia solar fotovoltaica .....	27
2.3	Energia solar térmica .....	32
2.4	Sistema PVT .....	37
2.5	Modelo computacional .....	44
2.6	Transferência de calor em coletores solares .....	46
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
3.1	Ensaio Experimental .....	50
3.1.1	Coletor Solar PVT.....	50
3.1.2	Instrumentação e variáveis medidas .....	53
3.1.3	Procedimento Experimental .....	59
3.2	Metodologia Numérica .....	60
3.2.1	Elaboração do modelo geométrico.....	60
3.2.2	Geração da malha.....	61
3.2.3	Configurações das simulações .....	63
3.3	Modelo analítico .....	64
3.3.1	Perdas térmicas por convecção .....	65
3.4	Equações aplicadas na análise .....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
5.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	75
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>



<b>7 APÊNDICE .....</b>	<b>83</b>
Apêndice 7.1 – Equações completas simuladas pelo EES.....	83
Apêndice 7.2 – Nomenclatura do apêndice 7.1 .....	92
Apêndice 7.3 – Dados completos simulados no EES .....	97
Apêndice 7.4 – Dados experimentais de cada ponto medido .....	98

## 1 INTRODUÇÃO

A energia é um instrumento valioso para a sociedade. Por meio dela, é possível a realização de diversas atividades que são fundamentais para o desenvolvimento das cidades, sendo destinada em uso doméstico, industrial e rural. Conforme Goldemberg e Lucon (2008), as fontes de energia podem ser classificadas em comerciais, sendo objeto de transação monetária, e não comerciais por serem obtidas de forma gratuita. Ainda segundo estes mesmos autores, as fontes energéticas ainda podem ser divididas em primárias e secundárias, renováveis e não renováveis. Para que a energia possa ser consumida pelo homem, a energia primária deve passar por transformações que tem como produto a energia secundária como a eletricidade, calor, gás e derivados do petróleo. Logo, são fontes primárias renováveis a energia solar, maremotriz, geotermal, de potencial hidráulica, eólica e de biomassa. Carvão mineral, petróleo e urânio são classificados como fontes primárias não renováveis.

Quadro 1.1 – Classificação das fontes energéticas

<i>Fontes</i>		<i>Energia Primária</i>	<i>Energia Secundária</i>
Não-Renováveis	Fósseis	carvão mineral petróleo e derivados gás natural	termoeletricidade, calor, combustível
	Nuclear	materiais físseis	termoeletricidade, e calor
Renováveis	tradicionais	biomassa primitiva: lenha de desmatamento	Calor
	convencionais	potenciais hidráulicos de médio e grande porte	Hidreletricidade
	modernas	potenciais hidráulicos de pequeno porte	Hidreletricidade
		biomassa moderna: lenha replantada culturas energéticas: cana- de-açúcar, óleos vegetais	biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor
	outros	energia solar	calor, eletricidade fotovoltaica
	geotermal	calor e eletricidade	
	eólica, maremotriz e das ondas	Eletricidade	

Fonte: Adaptado de GOLDEMBERG e LUCON, 2008.

Como se pode observar no Quadro 1.1, as fontes de energia renovável são aquelas em que o meio natural permite uma reposição do recurso em um curto espaço de tempo. Em contra partida, as fontes não renováveis demoraram séculos para serem formadas na natureza, tendo um tempo de reposição muito longo, sendo inversamente proporcional a demanda de consumo, tratando-se, portanto, de um recurso finito.

Atualmente, a energia que abastece os estados brasileiros é proveniente, principalmente de hidrelétricas, uma vez que o Brasil apresenta hidrografia e relevo recomendáveis para essa atividade. Segundo Hinrichs et.al (2010), a geração de eletricidade de origem hídrica já chegou a representar mais de 80% da matriz energética no Brasil. Mesmo sendo classificadas como fonte renovável, as hidrelétricas apresentam impactos negativos significativos que necessitam ser minimizados. Como explica Goldemberg e Lucon (2008), as hidrelétricas utilizam de reservatórios para equalizar as vazões de água que irão movimentar as turbinas para geração da energia, para tanto, barragens precisam ser contruídas e conseqüentemente extensas áreas são inundadas. Além desta perda de área superficial, este processo altera o fluxo de rios e demais cursos d'água e a migração de peixes, que além de representar um dano ambiental, pode trazer impactos sociais a comunidades que vivem próximo ao curso d'água e da área que será inundada.

Além de depender da força das águas, outra fonte de energia importante para a economia do país é o petróleo, um recurso finito encontrado no subsolo junto ao gás natural, que possui as mais diversas derivações e aplicações. Como descrito por Reis et al. (2009), o petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos com traços de enxofre e outros elementos químicos, que variam de acordo com as condições geológicas de sua formação. Logo, com base em sua composição, este é considerado o recurso energético primário mais poluente dentre os demais, uma vez que emite gases como o metano e outros hidrocarbonetos, monóxido e dióxido de carbono, dióxido de enxofre e ozônio, que contribuem para o agravamento do efeito estufa, além de ser um risco para a saúde pública (GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

Dessa forma, pode-se afirmar ser necessária a diversificação da matriz energética brasileira, uma vez que a demanda de energia é crescente e o Brasil possui diversos recursos renováveis e menos poluentes. Dentre as energias sustentáveis que se apresentam em desenvolvimento atualmente, pode-se citar a energia de biomassa, dada pela utilização de material orgânico; a energia eólica que provem da velocidade dos ventos e vem apresentando grande expansão na região nordeste (EPE, 2016). Inclui-se também a energia solar, que ainda

é pouco explorada pelo Brasil, um país com potencial evidente devido ao clima e as suas características solarimétricas (EPE, 2016).

Assim como é evidenciado na Tabela 1.1, que apresenta os dados da capacidade de geração de energia renovável para produção de eletricidade no Brasil e no mundo nos últimos dez anos. Percebe-se que o Brasil está bastante aquém em relação ao restante do mundo no que diz respeito a energias renováveis e, sobretudo, em relação à energia solar. Conforme dados divulgados pela Agencia Internacional de Energia Renovável - IRENA (2016), mesmo apresentando crescimento a partir de 2011, a capacidade brasileira para geração de energia solar é bastante inferior, em relação aos demais países avaliados.

Tabela 1.1 - Dados da capacidade de geração de energias renováveis para produção de eletricidade no Brasil e no mundo.

ANO	Energias Renováveis no Brasil (MW)	Energias Renováveis no Mundo (MW)	Energia Solar no Brasil (MW)	Energia Solar no Mundo (MW)
2006	80.202	1.036.694	-	6.447
2007	83.513	1.094.352	-	9.100
2008	84.862	1.164.288	-	15.089
2009	85.319	1.251.978	-	23.168
2010	89.543	1.348.000	-	40.074
2011	92.851	1.456.665	1	70.707
2012	96.885	1.570.533	4	99.933
2013	101.024	1.697.567	6	140.555
2014	107.719	1.833.501	15	179.742
2015	114.220	1.985.074	21	227.010

Fonte: Adaptado de IRENA, 2016.

Mesmo sendo pouco apreciada na matriz energética brasileira, a energia solar possui diversas vertentes visando seu aproveitamento. Atualmente, diversas tecnologias podem ser utilizadas para extração do recurso solar e a transformação em energia. Dentro destas possibilidades se apresentam as usinas heliotérmicas com diferentes tipos de concentradores solares, onde espelhos são usados para concentrar a radiação em um fluido absorvedor. Este fluido trocará calor com a água, gerando vapor que movimentará turbinas resultando em eletricidade. Existem diversos *layouts* para este tipo de usina como, a calha parabólica, refletor Fresnel, disco Stirling e a Torre Solar, variando apenas o mecanismo de concentração solar (Tolmasquim, 2016).

Outra tecnologia utilizada para o aproveitamento dos raios solares são os coletores de baixa temperatura que, segundo Tolmasquim (2016), requerem que o fluido de trabalho

obtenha uma temperatura inferior a 125°C. Estes coletores são aplicados para aquecimento de líquido ou gás, comumente tendo utilização doméstica para aquecimento de água para banho e aquecimento do ambiente em regiões com temperaturas mais baixas.

Por fim, cita-se também o sistema fotovoltaico que utiliza da radiação solar para geração de eletricidade por meio de materiais condutores, como o silício. Para a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE (2012) é grande a expectativa sobre o potencial de demanda por energia solar fotovoltaica no Brasil, entretanto são poucas empresas que possuem plantas produtivas no país. Para contornar tal situação entrou em vigor a Resolução Normativa da ANEEL 482 de 2012 para viabilizar e estimular a instalação de usinas de pequeno porte. Deste modo, o consumidor tem autonomia para gerar sua própria energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica, ou outras fontes de energia renovável, podendo injetar na rede a quantidade excedente de energia gerada na rede de distribuição da concessionária.

Essas duas últimas metodologias para citadas também podem trabalhar de modo concomitante. Assim, é introduzido o sistema PVT (*Photovoltaic Thermal*) que possui um sistema fotovoltaico acoplado a um sistema térmico, sendo possível a geração de eletricidade e calor em um mesmo dispositivo. Tal tecnologia será detalhada ao decorrer deste trabalho.

Para que se possa escolher uma dessas metodologias para aproveitamento do recurso solar, além de se avaliar o custo e qual tipo de energia, térmica ou elétrica, será demandada, é importante conhecer a eficiência desses sistemas. Um meio de se analisar o desempenho de diversos tipos de dispositivos, como os coletores solares, pode ser dado através de simulações numéricas. Assim é possível conhecer suas potencialidades e pontos de melhorias sem arcar com os custos de se construir um protótipo para tanto. Contudo, é importante ressaltar que a validação de um modelo numérico é indispensável e deve ser realizada com o intuito de ter um trabalho mais confiável.

Portanto, este trabalho busca apresentar um modelo computacional de um sistema PVT, desenvolvida utilizando-se do programa *ANSYS 15.0*, incluindo sua respectiva validação por meio de testes experimentais realizados no laboratório do GEPEN e modelo matemático desenvolvido e implementado no programa EES. Com isso foi possível conhecer a eficiência térmica obtida por este sistema e cumprir um dos objetivos propostos pelo projeto de P&D 498: “Desenvolvimento de soluções PVT para aumento da eficiência de usinas solares” financiado pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG.

## **1.1.Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Realizar avaliação numérica e experimental da eficiência térmica de um coletor solar tipo PVT.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Construir a geometria do coletor solar tipo PVT no SolidWorks para posteriormente ser exportado para o software de simulação;
- Realizar simulação numérica utilizando o programa Ansys 15.0;
- Realizar ensaio experimental;
- Elaborar um modelo matemático referente aos processos de transferência de calor em um coletor solar tipo PVT
  - Implementar o modelo matemático no programa EES
  - Usar resultados obtidos experimentalmente como entrada nos programas Ansys e EES.
- Comparar e analisar os resultados obtidos em simulação numérica utilizando o software Ansys e EES confrontando-os com os resultados obtidos em análise experimental;
  - Comparar eficiência térmica do coletor com os dados simulados e experimentais.
  - Analisar a distribuição de temperatura gerada na simulação numérica.

## **1.2. Justificativa**

Atualmente, a busca por energias alternativas tem se tornado uma crescente demanda devido a crise energética e minimização dos impactos ambientais. Uma dessas alternativas viáveis é o fomento de pesquisas para o desenvolvimento da energia solar, sobretudo pelo sistema PVT que foco desse trabalho, iniciado pelo projeto de P&D 498: “Desenvolvimento de soluções PVT para aumento da eficiência de usinas solares” financiado pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG. Com isso, uma das demandas do referido projeto, é a realização de simulações numéricas a fim de colaborar na análise, compreensão e melhoria da eficiência do protótipo, procedendo à comparação dos resultados simulados com resultados obtidos experimentalmente.

A simulação numérica viabiliza uma análise detalhada do instrumento que está sendo simulado, uma vez que permite a discretização do domínio em diversas partes para aplicação das equações de governo. Com isso, é possível a realização de uma análise ponto a ponto, onde se pode identificar falhas e potencialidades que não seriam encontradas pelos modelos analíticos ou experimentais, em um menor intervalo de tempo. Ademais, o estudo sobre coletores solares visa impulsionar esse mercado, ampliando seus meios de geração e aplicação, estimulando o uso de uma energia sustentável e limpa.

## **1.3. Organização do trabalho**

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, os objetivos que circundam este trabalho e a justificativa. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, que descreve fatos e conceitos importantes sobre energia solar de modo geral, a energia solar fotovoltaica e térmica, sistema PVT, fundamentação do método numérico e transferência de calor em coletores solares. No Capítulo 3 é feita a descrição de toda metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, bem como a discussão destes. No capítulo 5, o trabalho é finalizado por meio da conclusão e por sugestões de trabalhos futuros. Posteriormente, são apresentadas as referências bibliográficas e os anexos do trabalho.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Recurso Solar

O aproveitamento da energia fornecida pelo sol depende das tecnologias de conversão para que a energia possa ser utilizada diretamente. Assim como, pelo uso de coletores térmicos que resulta no aquecimento de fluidos ou no uso de células fotovoltaicas ou sistemas heliotérmicos que possibilita a geração de eletricidade (REIS, 2009).

Segundo Tolmasquim (2016), o uso do sol como fonte direta para geração de eletricidade é relativamente recente, sendo registrado apenas em meados do século XX. Logo, Tolmasquim (2004) explica que mesmo a energia solar incidente sobre a Terra seja superior a 10.000 vezes a demanda de energia atual da humanidade, sua baixa densidade de potencia e sua variação geográfica e temporal representam grandes desafios para o seu aproveitamento.

Hinrichs et al. (2010) explica que a quantidade de radiação recebida varia de acordo com a latitude, estação do ano, horário do dia e quantidade de nuvens no céu. Logo, como é possível observar na Figura 2.1, a grande parte do globo terrestre possui níveis de radiação satisfatórios para aplicação da energia solar. O Brasil, por exemplo, está situado numa região de incidência mais vertical aos raios solares o que condiciona elevados níveis de radiação. Ademais, por estar na linha do Equador essa incidência varia pouco ao longo do ano (TOLMASQUIM, 2016), o que justifica investimentos nesta area. Fortalecendo tal argumento, Rodrigues (2005) acrescenta que o Brasil tem média anual de 280 dias de sol, valor que representa um potencial de 15 trilhões de MWh, 50 mil vezes mais do que o consumo nacional de energia elétrica registrado em 1999.

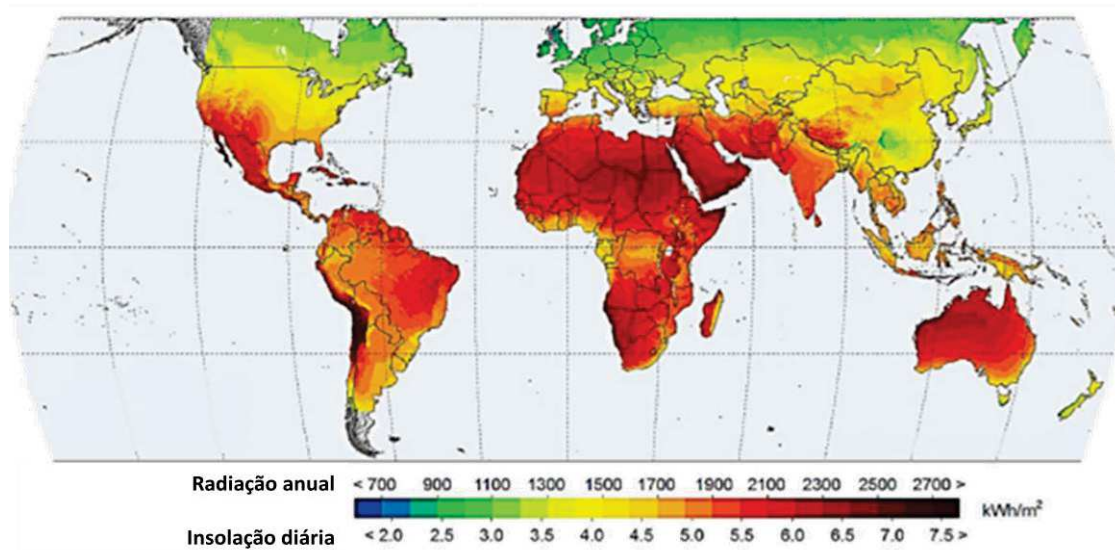


Figura 2.1 - Mapa da radiação solar global. Fonte: Kannan e Vakeesan, 2016.



De acordo com Lopez (2012), muitas aplicações da energia solar exigem uniformidade e constância da radiação. Com isso, este autor afirma que o grande desafio no dimensionamento de um sistema solar consiste em prever a intensidade dos raios solares e definir o melhor meio para capturar e armazenar a energia disponível.

Na busca de aproveitamento direto e eficaz da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, com especial destaque para as conversões fotovoltaicas e térmicas e a arquitetura bioclimática (TOLMASQUIM, 2004). Tolmasquim (2016) afirma que, os principais motivos que promoveram o reconhecimento da energia solar pelo mundo giram em torno de seu alto potencial técnico de proficiência, a não emissão de poluentes durante sua operação e principalmente a expansão da capacidade instalada junto à redução de custos. Entretanto, mesmo com essas justificativas, no Brasil este recurso ainda é pouco explorado e o uso de outras fontes de energia, mais impactantes, é ampliado.

Baseado no Balanço Energético Nacional do ano de 2016 divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, o Brasil apresenta em sua matriz energética alta porcentagem de energias renováveis. Contudo, ela se mostra pouco diversificada, uma vez que a base energética do país é proveniente de usinas hidrelétricas, assim como é demonstrado no Gráfico 2.1. Ressalta-se que, mesmo sendo uma fonte renovável, as usinas hidrelétricas apresentam impactos ambientais e sociais significativos no seu processo de construção, o que seria reduzido com a expansão da energia solar.

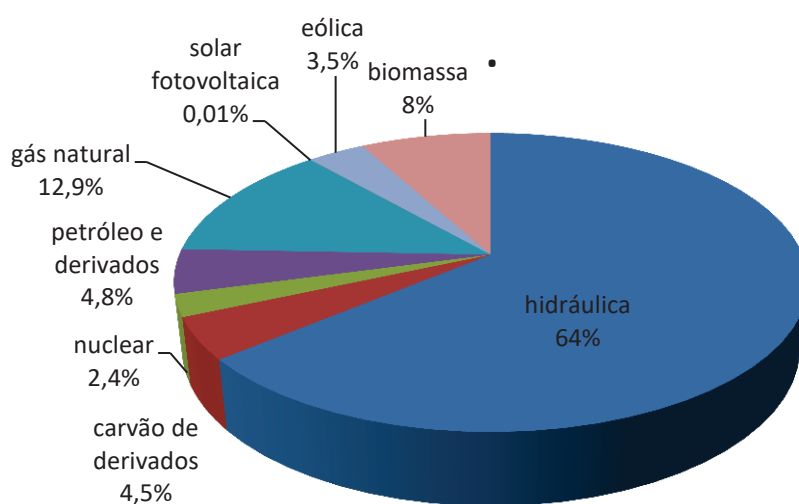


Gráfico 2.1 – Matriz Energética Brasileira ano base 2015. Fonte: EPE, 2016.

Ainda segundo este mesmo relatório a energia solar, em destaque a fotovoltaica, teve de 2014 a 2015 um crescimento de 42,3% na sua capacidade instalada. Com essa ampliação, a

geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos, teve um crescimento importante deixando de gerar 16 GWh no ano de 2014 e passando em 2015 para 59 GWh, conforme apresentado na Tabela 2.1. Entretanto, esta ainda se mostra pouco expressiva, uma vez que representa apenas 0,01% da matriz energética brasileira.

Tabela 2.1 – Geração Elétrica (GWh) Brasileira.

<b>Fonte</b>	<b>2015</b>	<b>2014</b>
Hidreletrica	359.743	373.439
Gas Natural	79.490	81.073
Biomassa	47.394	44.987
Derivados do Petróleo	25.662	31.529
Nuclear	14.734	15.378
Carvão – Vapor	19.096	18.385
Eólica	21.625	12.210
Solar Fotovoltaica	59	16
Outras	13.682	13.524
<b>Geração Total</b>	<b>581.486</b>	<b>590.542</b>

Fonte: EPE, 2016.

Ao buscar explicações para esse baixo valor de geração elétrica por energia solar, Reis (2009) acredita que tecnologias que vem sendo utilizadas há mais tempo e em maior escala tendem a oferecer maior credibilidade, melhor assistência técnica, além de ser adquirida com maior facilidade no mercado.

Contudo, o Ministério de Minas e Energia (2015), através do seu Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, admite que a capacidade instalada de energia solar ainda é pouco representativa, mesmo incluindo projetos de Pesquisa & Desenvolvimento, usinas instaladas nos estádios da Copa do Mundo e usinas enquadradas como mini ou microgeração distribuída, conforme resolução Aneel nº 482/2012, entretanto sinaliza futuro crescimento a cerca das energias renováveis.

Em 2014, o Brasil teve o primeiro leilão, em que se contratou energia proveniente de plantas fotovoltaicas centralizadas. Deste modo, a EPE habilitou tecnicamente 331 projetos de plantas fotovoltaicas, totalizando 8,87 GW (BRASIL, 2015). Além de apresentar crescimento para a energia fotovoltaica, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 estima crescimento

para a energia solar térmica domiciliar para aquecimento de água, assim como mostra o Gráfico 2.2.

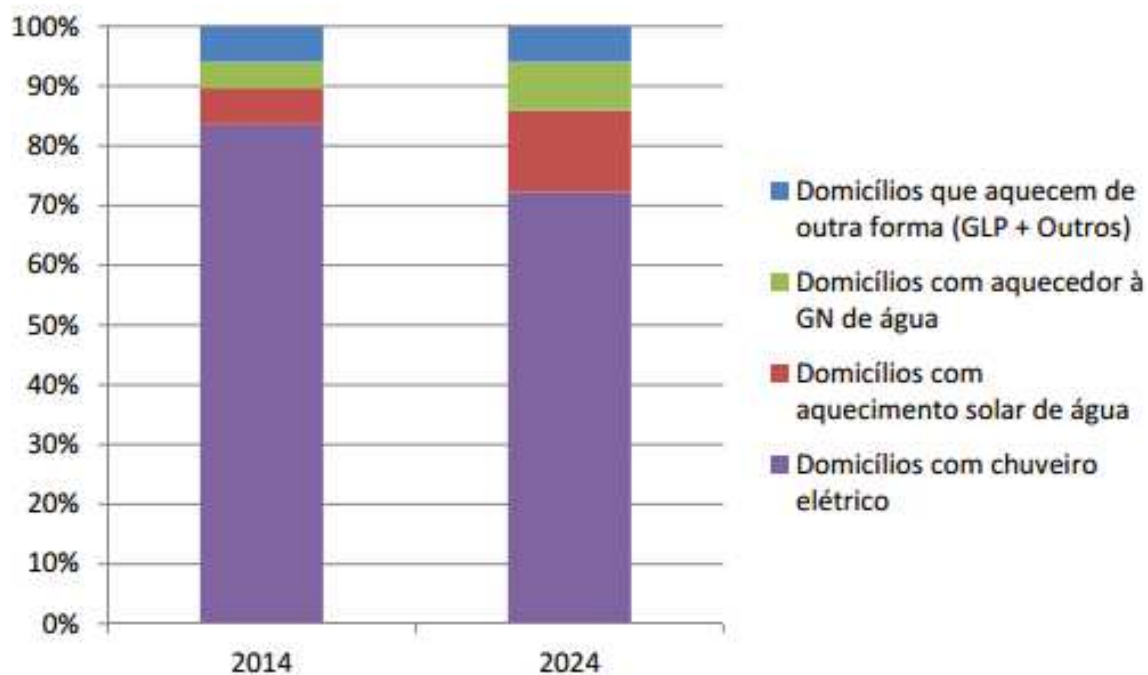


Gráfico 2.2 – Participação das fontes usadas para aquecimento de água nos domicílios.

Fonte: BRASIL, 2015.

Outro fator importante que deve ser destacado a cerca da energia solar, é a sua importancia social na geração de empregos. No Relatório Global sobre Energias Renováveis de 2016, publicado pela REN21 (2016), é visto que dentre as tecnologias renováveis mais modernas, a energia solar, sobretudo a fotovoltaica, é a maior geradora de empregos no mundo. Quando somadas a energia fotovoltaica e a térmica, temos cerca de 3,7 milhões de pessoas empregadas como pode-se observar na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Raking de Geração de Emprego através das energias renováveis.

	Mundial	China	Brasil	Estados Unidos	India	Japão	Bangladesh	União Europeia		
								Alemanha	França	Restante da EU
$\times 10^3$										
Solar PV	2,772	1,652	4	194	103	377	127	38	21	84
Biocomb. líquidos	1,678	71	821	277	35	3		23	35	47
Eólica	1,081	507	41	88	48	5	0,1	149	20	162
Aquecimento solar	939	743	41	10	75	0,7		10	6	19
Biomassa sólida	822	241		152	58			49	48	214
Biogás	382	209			85		9	48	4	14
Pequenas hidrelétricas	204	100	12	8	12		5	12	4	31
Energia geotérmica	160			35		2		17	31	55
Concentradores solares	14			4				0,7		5
<b>Total</b>	<b>8,052</b>	<b>3,523</b>	<b>918</b>	<b>769</b>	<b>416</b>	<b>388</b>	<b>141</b>	<b>355</b>	<b>170</b>	<b>644</b>

FONTE: Adaptado de REN21, 2016.

## 2.2 Energia solar fotovoltaica

A energia fotovoltaica é uma das energias renováveis que vem apresentando crescimento significativo no mundo. Reis (2009) admite que a energia solar fotovoltaica tem sido aplicada tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento, mas ainda em pequena escala quando comparado as demais fontes energéticas. Poucos são os países que investiram em grandes usinas solares fotovoltaicas como fizeram os Estados Unidos, Alemanha, China e o Japão, que são os líderes desse mercado. Muitas nações utilizam dessa fonte em pequenos sistemas isolados, como radares, iluminação e transmissores. Por Murta (2011), tal fato é justificado pelo custo, ainda pouco competitivo, da implementação de plantas para geração fotovoltaica. Entretanto, com os avanços e investimentos para popularização dessa tecnologia, Reis (2009) acredita que ela ainda será considerada uma forma atraente para a geração de eletricidade no Brasil e no mundo.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2016), a capacidade instalada no Brasil de energia fotovoltaica cresceu 8,4% entre novembro de 2015 e novembro de 2016, ficando atrás da energia eólica que teve expansão mais expressiva sendo ampliada em 43,2%. O Ministério

de Minas e Energia considerou em seu projeto “Luz para todos”, lançado em 2003 por meio do Decreto 4.873 de 11/11/2003, a energia solar fotovoltaica como alternativa na busca da universalização do acesso à energia elétrica. Desta forma, construiu em diversas comunidades isoladas, principalmente no estado do Amazonas e áreas rurais de outros estados, mini usinas fotovoltaicas melhorando as condições de moradia da população atendida (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011).

A energia solar fotovoltaica é a energia que se obtém por meio da conversão das radiações solares em eletricidade, sendo considerado um sistema de fácil instalação por Tolmasquim (2004). Segundo Lopez (2012), esse fenômeno, denominado efeito fotovoltaico, foi primeiramente relatado em 1839 por Edmond Becquerel, sendo determinado pelo aparecimento de uma diferença de potencial em material semicondutor, por meio da absorção de luz. Hinrichs et. al. (2010) aponta que o princípio do uso direto da energia solar para a produção de eletricidade foi descoberto em 1887 por Heinrich Hertz e explicado em 1905 por Albert Einstein que considerou o comportamento da luz mais próximo ao de uma partícula, nomeando-a de fóton, do que ao comportamento de uma onda. Anos depois, em 1954, pesquisadores da Bell Laboratories criaram as células solares que convertiam a energia solar em eletricidade (GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

Murta (2011) aponta que a geração de eletricidade acontece pela interação da radiação solar com materiais semicondutores como sulfeto de cádmio, arseneto de gálio ou cristais de silício, sendo esta a tecnologia mais utilizada, agrupados em um dispositivo denominado célula fotovoltaica. Este mesmo autor explica que, através desse contato há liberação de elétrons que formam pequenas correntes elétricas. Para Palz (2002), os semicondutores mais apropriados são os mais sensíveis, sendo aqueles que dão o maior produto de corrente-voltagem para a luz visível. Tolmasquim (2004) relata que, em 2001, o silício cristalino foi responsável por 86% do mercado fotovoltaico. Os demais 14% couberam principalmente as tecnologias de filmes finos: telureto de cádmio (CdTe) disseleneto de cobre-indio (CuInSe<sub>2</sub>) além do silício amorfo hidrogenado (A-Si:H). Os filmes finos vêm apresentando avanços, mas ainda não conseguiram realizar a promessa de um custo inferior às células cristalinas.

O semicondutor é um material que tem nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor (LOPEZ, 2012). Segundo Seguel (2009), os materiais semicondutores possuem uma banda preenchida por elétrons, chamada de banda de valência e uma segunda banda, chamada de banda de condução. Entre essas duas bandas existe uma banda, que os elétrons não podem ocupar, chamada de *bandgap*. Deste modo, os fótons com energia superior ao da *bandgap*, excitam os elétrons a se deslocarem para a banda de

condução. Reis (2009) explica que apenas este efeito não garante o funcionamento das células fotovoltaicas, sendo observados em semicondutores puros. Assim, faz-se necessária uma estrutura de modo que os elétrons excitados possam ser captados, gerando corrente elétrica útil. Para que isso ocorra, segue-se com um processo denominado dopagem do silício, onde é adicionado aos átomos de silício, átomos de um condutor tipo *p* que possui carga positiva, como boro e o gálio, e átomos de um semicondutor tipo *n* de carga negativa, como arsênio e o fósforo, formando uma junção *pn* (AUBRECHT, 2006).

Na junção *pn* os elétrons livres do lado *n* passam ao lado *p* onde são capturados. Assim, há um acúmulo de elétrons no lado *p*, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado *n*, que o torna eletricamente positivo. Quando a junção *pn* é exposta a fótons com energia maior que o *bandgap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; onde as cargas serão aceleradas, gerando corrente. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial, denominada efeito fotovoltaico (ABINEE, 2012). Com duas extremidades conectadas haverá circulação de elétrons como ilustra a Figura 2.2.

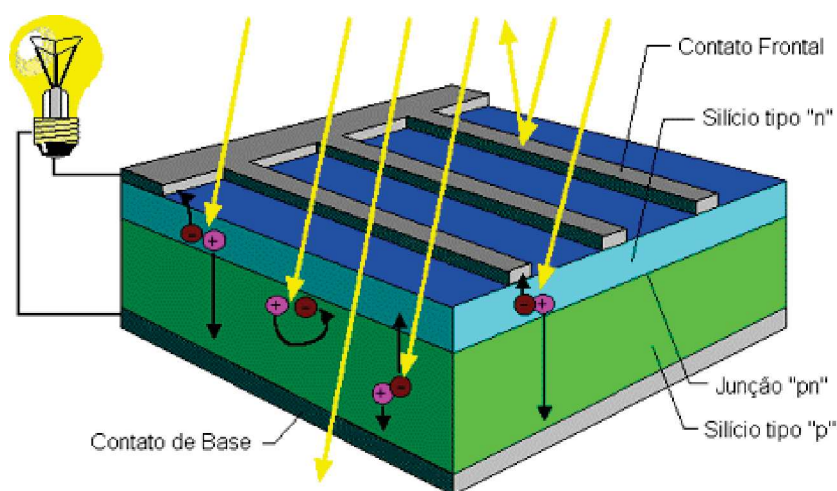


Figura 2.2 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica e o efeito fotovoltaico. Fonte: Lopez, 2012.

Para que haja uma maior produção de energia, diversas células fotovoltaicas são conectadas formando o painel fotovoltaico que é ligado a um circuito elétrico. De acordo com Lopez (2012), a maioria das células fotovoltaicas produz 0,5 Voltz. Logo, quando células são associadas, a tensão produzida é somada até que se obtenha o valor desejado. Os painéis podem ser conectados em série ou em paralelo. A corrente gerada é contínua, sendo indicada

para pequenas aplicações (12-24V), podendo ser convertida para alternada para uso em equipamentos maiores (110-240V) (GOLDEMBERG e LUCON, 2008). As medições de corrente e tensão podem ser representados por meio de uma curva característica, como visto na curva do Gráfico 2.3, e o seu formato se mostra o mesmo para qualquer painel fotovoltaico (FERREIRA, 2008). Finocchio (2006) explica que, a corrente nominal do módulo fotovoltaico -  $I_{max}$  representa o valor de corrente elétrica entregue pelo módulo em potência máxima a partir de determinadas condições de temperatura e radiação. Já a corrente de curto-circuito -  $I_{SC}$  corresponde ao valor máximo de corrente produzido quando a tensão e a potência são nulas. No eixo x,  $V_{max}$  é a tensão nominal do módulo, representando a tensão gerada à máxima potência com condições determinadas de temperatura e radiação; e  $V_{OC}$  é a máxima tensão produzida pelo painel quando a circulação de corrente e a potência são nulas. Por fim, a Potência de pico é representada em  $P_{mp}$ , correspondendo ao valor máximo de potência dado pelo módulo, consequentemente apontando onde o ponto da curva  $V \times I$  é máximo (FINOCCHIO, 2006).

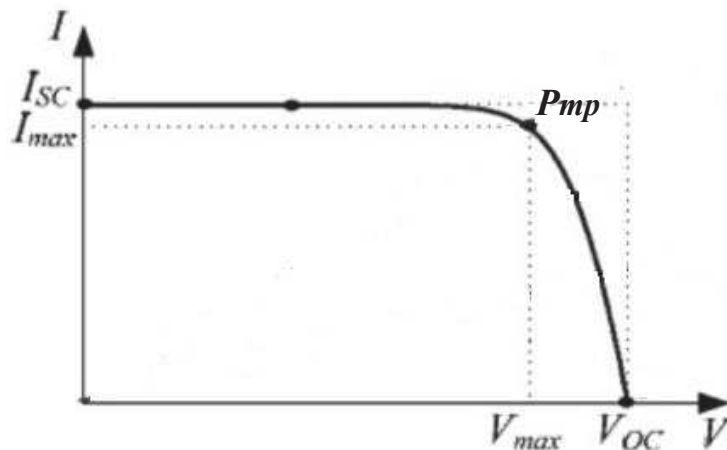


Gráfico 2.3 – Curva I-V característica de um painel genérico. Fonte: Adaptado de Ferreira, 2008.

O módulo fotovoltaico é hoje o objeto com maior busca de avanços tecnológicos para o aumento de eficiência e redução de custos, isto por sua pesada contribuição no custo total de um sistema (TOLMASQUIM, 2004). Conforme Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems – ISE (2016), nos últimos 10 anos, a eficiência dos módulos comerciais de silício aumentou de 12% para 17% e os módulos de telureto de cádmio (CdTe) de 9% para 16%. Já para as células de laboratório a eficiência registrada chega a 25,6% para monocristalino, 20,8% para a tecnologia policristalina e de 21,0% para CdTe.

Lopez (2012) explica que os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias: sistema isolado ou autônomo, sistema híbrido ou conectado a rede elétrica. Se tratando do sistema autônomo, sua configuração básica inclui a unidade de controle de potência e a unidade de armazenamento. Pode ainda ser subdividido em (1) carga contínua com armazenamento, (2) carga alternada com armazenamento, (3) carga contínua sem armazenamento e (4) carga alternada sem armazenamento, assim como esboça a Figura 2.3

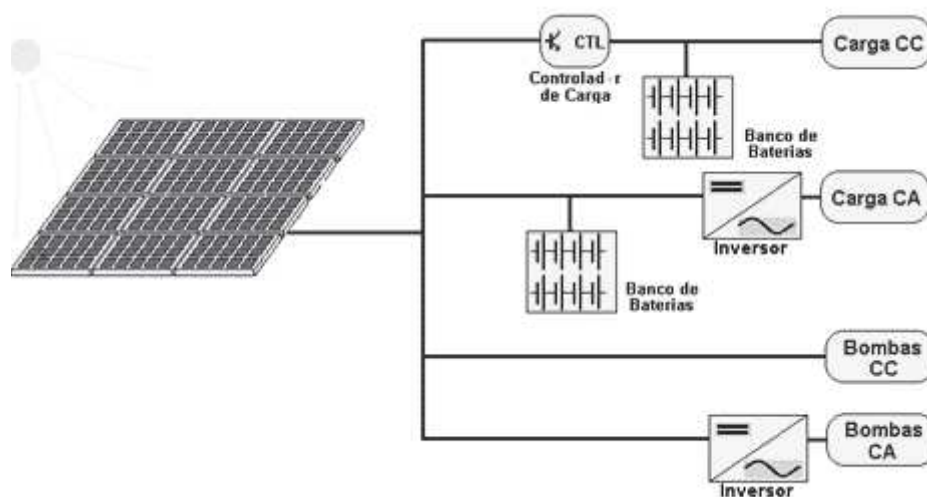


Figura 2.3 – Configurações de um sistema fotovoltaico autônomo em função da carga utilizada. Fonte: Lopez, 2012.

Nos sistemas híbridos, a configuração não se restringe apenas a geração fotovoltaica, sendo associadas outras fontes de energia como turbinas eólicas, motores a diesel e os módulos fotovoltaicos (REIS, 2009). A integração dessas fontes tem por objetivo a atender um número maior de usuários, integrando um sistema de médio a grande porte na geração de eletricidade. Por fim, o sistema conectado à rede injeta toda a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos na rede elétrica já existente, não necessitando de unidades de armazenamento. Tal sistema representa uma vantagem ao proprietário de uma pequena usina solar fotovoltaica, uma vez que se poderá vender sua energia ao mesmo preço praticado pelas grandes concessionárias (LOPEZ, 2012).

Com base nas configurações apresentadas, diversas aplicações se tornam possíveis. No Brasil e no mundo, o aproveitamento da energia solar por sistemas fotovoltaicos pode ser observado nas mais diversas atividades. Dentre estas atividades, cita-se as aplicações em meio rural como o sistema de bombeamento solar, onde bombas são acionadas pela energia elétrica fotovoltaica, bombeando água para uso em sistemas de irrigação, abastecimento residencial e



na pecuária (PEREIRA DE SÁ, 2010). Ademais, Cunha (2006) lembra que em residências rurais isoladas geralmente são sistemas autônomos quem cumprem a demanda de iluminação.

Outra aplicação viável se dá na iluminação pública por meio de sistemas autônomos, uma vez que a iluminação de vias públicas corresponde a aproximadamente 4,5% da demanda nacional, o equivalente a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano, fato que traria grande economia aos cofres públicos (CASTRO, 2011).

Conforme Castro et. al. (2011), a iluminação pública corresponde a aproximadamente 4,5% da demanda nacional, o equivalente a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano o que justifica a implementação de placas solares para alimentação dos equipamentos utilizados na iluminação pública. Sistemas fotovoltaicos se apresentam bastante adequados para alimentação de equipamentos de monitoramento que necessitam ser instalados em locais remotos, como equipamentos de medição de condições climáticas, registros sísmicos e até mesmo radares de tráfego nas estradas (BRAGA, 2008).

Outra aplicação relevante da energia solar é feita em satélites. Veissid e Baruel, 2012 apontam que a maioria dos satélites em órbita em torno da Terra atualmente, tem painéis solares gerando vários milhares de watts de potência. Segundo INPE (2011), o satélite CBERS 3 e 4 tem a capacidade de geração de 2300 Watts. Por fim, estudos mais recentes buscam avanços para os veículos solares. O primeiro carro familiar movido por células fotovoltaicas, chamado de Stella, foi desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Eindhoven e venceu em 2013 a competição “*World Solar Challenge Cruiser Class*” com uma entrada de energia externa de apenas 64 kWh, concluindo o percurso de 3022 km em 40 horas e 14 min (MATHIJSSEN, 2015). Castro et. al (2009) afirmam que uma abordagem mais aprofundada sobre os veículos solares só se deu a partir de 1990 devido as crescentes restrições sobre a emissão de gases do efeito estufa – GEE.

### **2.3 Energia solar térmica**

Além da eletricidade obtida pela energia fotovoltaica, a energia proveniente do sol pode ser aproveitada de outras maneiras, como em sistemas térmicos onde aplica-se a radiação solar na geração de calor. Diversos são os equipamentos que podem ser aplicados na captação da energia térmica do sol. Hinrichs et al. (2010) afirma que o uso do potencial térmico do Sol vem sendo usado desde a antiguidade, usando como exemplo Arquimedes que usou espelhos para concentrar os raios solares e queimar as velas de uma tropa hostil em 212 a.C. Outro exemplo, foi a construção de aquecedores solares no século XIX que produzia

vapor para movimentar motores. Por fim, no Egito, em 1912, utilizava-se da energia solar para fornecer vapor à bombas de irrigação. Pereira et al. (2012), afirma que o mercado de energia solar para aquecimento no Brasil, teve início na década de 70 através da fundação de três empresas: Tuma (1971), Pantho (1976) e Colsol (1976). Como nos anos seguintes o crescimento do mercado solar no Brasil foi significativo, foi criado do Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL) pela Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, ventilação e aquecimento – ABRAVA. A partir de 2016 este departamento deu lugar para a ABRASOL – Associação Brasileira de Energia Solar Térmica, que tem dentre seus diversos objetivos, ações que visem fomentar o Mercado e desenvolvimento da energia solar térmica (ABRASOL 2016). Em 1997, foi criado o Programa Brasileiro de Etiquetagem de coletores solares planos pelo Inmetro, Eletrobras Procel, Puc Minas e Abrava (PEREIRA et al., 2012).

Goldemberg e Lucon (2008) relatam que a China é o país que mais emprega os aquecedores de água, uma vez que esse país conseguiu deixar o sistema a um custo baixo e acessível com preços a partir de US\$190, representando valores 80% mais baixos do que os praticados nos países ocidentais. Pelo relatório da REN21 (2016), a China representa cerca de 71% da capacidade mundial instalada de energia térmica para aquecimento, seguida pelos EUA com 4%, Alemanha e Turquia com 3%, e diversos outros países com baixos valores, como é o caso do Brasil que dispõe de apenas 1,9%.

Nieters, Knaack e Rodrigues (2012) apontam que a primeira aplicação em larga escala de aquecedores solares, ocorreu em 1950 em Israel. Isso ocorreu devido ao *déficit* de energia pelo país não dispor de outras fontes naturais para a geração de eletricidade e as restrições ao acesso ao petróleo. Para estes autores, a Europa possui o mercado mais sofisticado em termos de aplicações da energia solar, sendo a Alemanha considerada líder. Tal fato é justificado por diversos países europeus possuírem leis de incentivo, reduções de impostos e obtenções de créditos que motivam a população na adesão da tecnologia. Em Barcelona, por exemplo, foi criada a Lei Solar em 2000. Tal lei obriga todos os novos edifícios a ter no mínimo 60% de energia extraída do sol, quando possuem consumo de água quente superior a 81,1 kWh.

No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente instituiu através da Portaria MMA nº238 de 21 de julho de 2009, um Grupo de trabalho com objetivo de apoiar a disseminação de Sistemas de Aquecimento Solar de Água, além de elaborar e acompanhar atividades específicas para instalação destes sistemas nas casas construídas na segunda fase do Programa Minha Casa Minha Vida (DOLABELLA e ASSAD, 2012).

Para Pereira et al. (2012), os dispositivos integrantes da tecnologia solar são divididos em coletores planos, também denominados coletores fechados uma vez que todos os seus componentes são colocados em uma caixa isolante com cobertura que garanta a penetração dos raios solares, impedindo a entrada de umidade; tubo evacuado e de ar e os coletores abertos utilizados para aquecimento de piscinas, sendo comumente fabricado de material polimérico, não possuindo cobertura. Pereira et al. (2012), apresentam ainda, a divisão destes dispositivos no mercado mundial, sendo expressados no Gráfico 2.3.

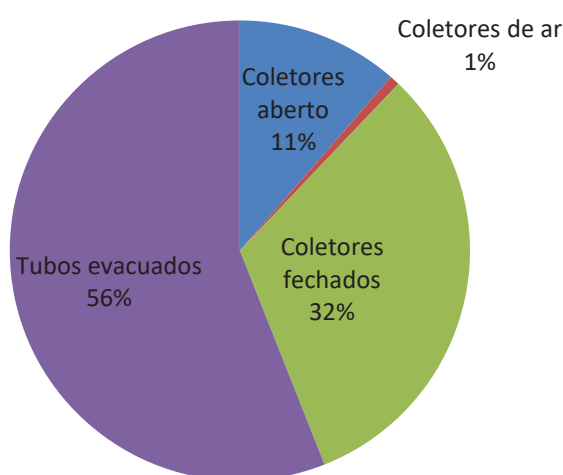


Gráfico 2.4 – Mercado internacional de coletores solares. Fonte: Peireira et al., 2012 adaptado de Weiss e Mauthner, 2011.

Para Reis (2009), as formas de aproveitamento da energia solar térmica podem ser divididas em tres sistemas, sendo o sistema solar passivo, sistema solar ativo e o sistema termo-solar. Hinrichs et al. (2010) explicam que num sistema solar ativo, o fluído de trabalho necessita de um ventilador ou bomba para circular no sistema. Em contrapartida, nos sistemas passivos o fluído circula de maneira natural, como por exemplo pelo efeito termosifão onde a água fria e a água quente circulam em função de sua densidade. Por fim, os sistemas termo solares são classificados por Reis (2009) como sistemas mais sofisticados, onde são aplicados concentradores que produzem temperaturas tão elevadas a pontos de evaporar um líquido. Assim, neste mecanismo, o vapor gerado é direcionado até as turbinas para geração de eletricidade. Em seu estudo, Kalogirou (2004) relaciona os diversos tipos de coletores solares térmicos existentes (Tab. 2.3) aplicados a mais diversas finalidades de acordo com a faixa de temperatura obtida.

Tabela 2.3 – Tipos de coletores solares em função do movimento, absorvedor e faixa de temperatura.

Movimento	Tipo de coletor	Absorvedor	Faixa de temperatura indicada [°C]
Estacionário	Coletor de placa plana	Plano	30-80
	Coletor de tubo evacuado	Plano	50-200
	Coletor Parabólico composto	Tubular	60-240
Um eixo	Reflector linear Fresnel	Tubular	60-250
	Coletor de canal parabólico	Tubular	60-300
	Coletor de calha cilíndrica	Tubular	60-300
Dois eixos	Reflector de disco parabólico	Pontual	100-500
	Coletor de campo heliostático	Pontual	150-2000

Fonte: Kalogirou, 2004.

Dentre as tecnologias utilizadas para obtenção de calor oriundo do sol, os mais populares são os de aquecimento doméstico para água ou para o ambiente, também chamados de coletores de baixa temperatura ( $< 125^{\circ}\text{C}$ ). Um sistema de aquecimento de água básico é composto de um conjunto de coletores solares, um reservatório térmico, um sistema de circulação de água e um sistema auxiliar de aquecimento elétrico, uma vez que seu desempenho pode ser afetado por parâmetros de desenho, condições climáticas ou pela eficiência do coletor solar (BASSO, 2008).

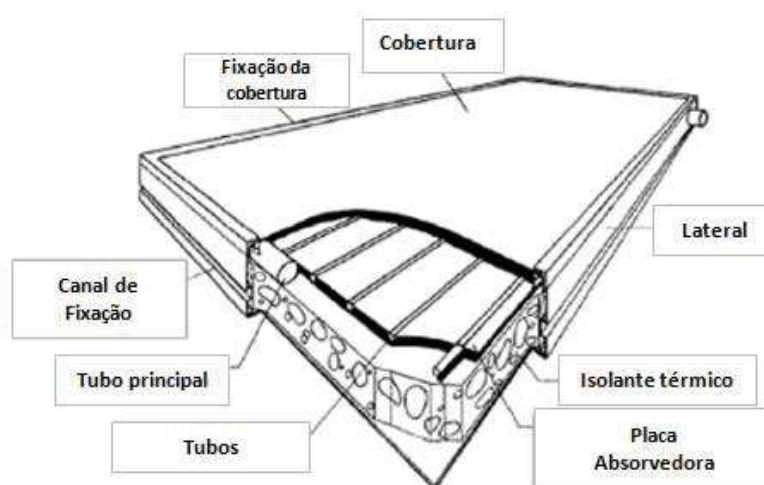


Figura 2.4 – Componentes de um Coletor solar plano. Fonte: Adaptado de Jamar et al., 2016.

O coletor solar plano fechado é um dos coletores de baixa temperatura mais populares nos domicílios (Fig. 2.4). Este coletor é constituído por uma caixa externa, geralmente fabricada em perfil de alumínio; isolamento térmico feito por lã de vidro, rocha ou espuma de poliuretano, que minimiza as perdas de calor para o meio. Possui também tubos de cobre, ou outro material com alta condutividade térmica e resistência à corrosão, por onde o fluido escoa no interior do coletor; placa absorvedora responsável pela absorção e transferência da do calor para o fluido de trabalho; a cobertura que geralmente é de vidro, policarbonato ou acrílico que permite a passagem da radiação solar e minimiza as perdas de calor por convecção e radiação e por fim a vedação, importante para manter o sistema isento da umidade externa (PARANÁ, 2017).

Os coletores solares absorvem tanto a radiação solar direta quanto a radiação difusa, requerendo baixos níveis de manutenção (FARIA, 2007). Para uso residencial, geralmente, o sistema de aquecimento solar por efeito termossifão é suficiente para garantir o fornecimento de água quente, abaixando o custo do sistema (Fig. 2.5). Já em outras edificações, como prédios, hospitais, shoppings, onde a distância entre o reservatório, as placas coletoras e os pontos de consumo são distantes, faz se necessário um sistema de aquecimento solar bombeado, onde bombas hidráulicas fazem a circulação da água quente (Fig. 2.6) (BASSO, 2008).

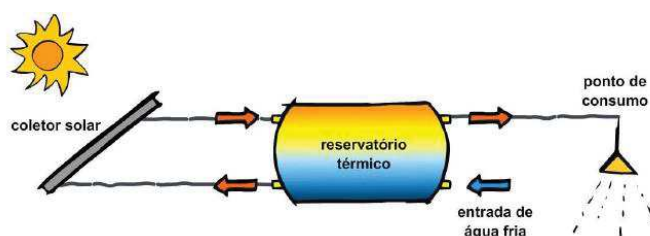


Figura 2.5 - Sistema de aquecimento solar residencial por circulação natural.

Fonte: Paraná, 2017.

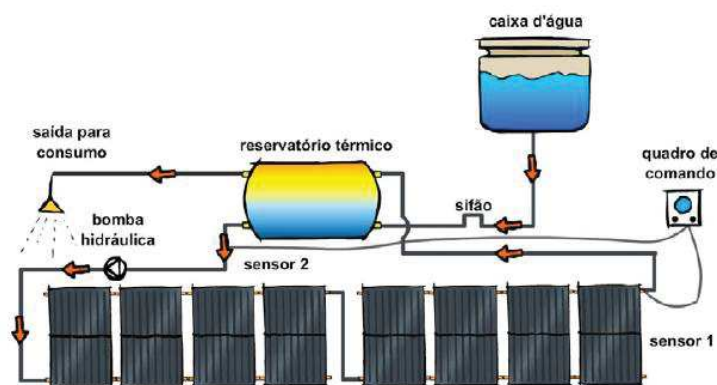


Figura 2.6 – Sistema de aquecimento solar por circulação forçada. Fonte: Paraná, 2017.

Segundo Faria (2007), a geração de energia descentralizada, realizada em pequena escala, pode ser de grande contribuição às mudanças climáticas e promover melhoria na qualidade de vida. Com isso, o autor considera os aquecedores solares promissores já que a fonte energética é limpa e gratuita e os dispositivos de conversão apresentam custo-benefício favorável. Além disso, Pereira, Carvalho e Fantinelli (2012) acrescentam que o aquecimento solar atenua o pico de demanda de eletricidade nos domicílios brasileiros, uma vez que o chuveiro elétrico possui consumo significativo de energia. Entretanto, as autoras ainda afirmam que a aplicação da energia solar pode encontrar dificuldades em construções já existentes devido às adaptações na tubulação para receber água quente ou inclusão de misturadores que apresentam baixa durabilidade.

Vasconcellos e Limberger (2012) aponta um ganho ambiental com a implementação dos sistemas de aquecimentos de água solar. Para os autores, com a energia solar, menos energia elétrica é demandada e assim os investimentos para construção de novas barragens e linhas de transmissão são suspensos, amenizando os impactos ambientais e também sociais que poderiam ser causados com os novos empreendimentos.

## **2.4 Sistema PVT**

O acoplamento de um painel fotovoltaico a um coletor solar plano é comumente chamado de coletor PVT sigla do inglês de *Photovoltaic Thermal Collector*. Deste modo, no coletor PVT, o painel fotovoltaico não está apenas produzindo eletricidade, mas também servindo de absorvedor térmico, o que possibilita a geração simultânea de eletricidade e calor (ZONDAG, 2005). Conforme é mostrado na Figura 2.7, neste coletor o módulo fotovoltaico funciona como superfície absorvedora de um coletor solar plano. Abaixo do painel, funciona o sistema hidráulico, onde o fluido de trabalho tem a função de retirar o calor do módulo. De acordo com Tripanagnostopoulos (2009) os sistemas solares tipo PVT podem ser efetivamente utilizados no mercado doméstico e industrial, principalmente para o aquecimento de água ou ar.

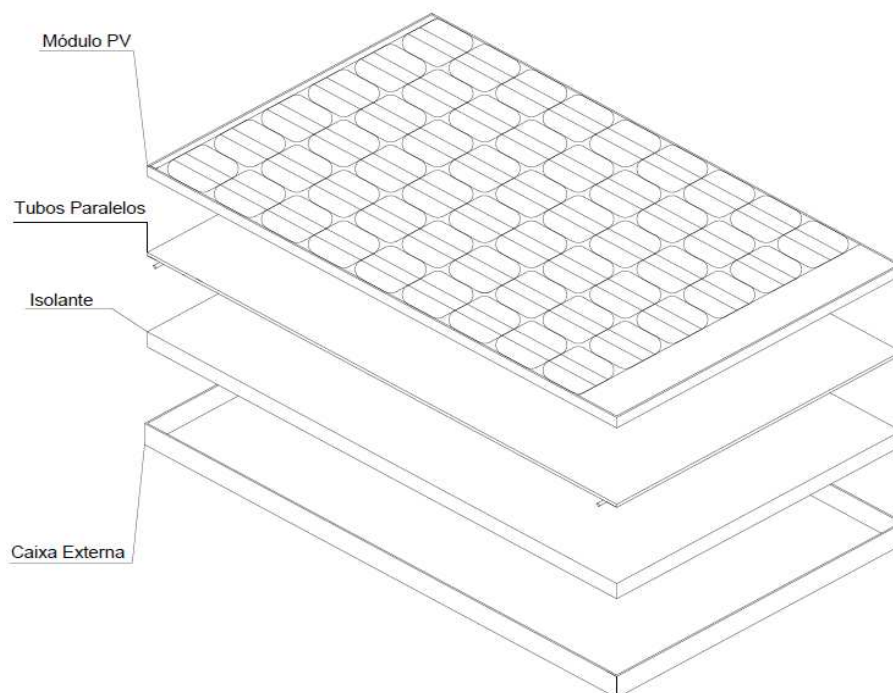


Figura 2.7 Vista explodida de um sistema PVT. Fonte: Arquivos GEPEN.

Conforme aponta Zondag et.al (2003), uma área coberta com um sistema PVT pode produzir mais energia elétrica e térmica do que este mesmo espaço coberto parcialmente de sistemas fotovoltaicos e térmicos convencionais, tendo um aproveitamento maior do espaço e sendo extremamente útil em locais onde o espaço é limitado. Este mesmo autor apresenta também como vantagem do PVT a sua uniformidade arquitetônica e a possível redução nos custos de implantação por ser necessária a instalação de apenas um sistema. Entretanto, sua comercialização se apresenta restrita por ainda não apresentarem custos competitivos para aplicações comerciais (TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2009).

A literatura a cerca dos sistemas combinados de energia fotovoltaica e térmica são bastante limitados em comparação aos sistemas convencionais (ZONDAG et al., 2003). Segundo Chow, Tiwari e Menezo (2012), os primeiros estudos teóricos e experimentais do PVT foram documentados em meados de 1970. Apesar de a validade técnica ter sido concluída prematuramente, só nos últimos anos que ela vem ganhando atenção.

Zondag (2005) realizou uma revisão detalhada do sistema PVT. Neste estudo, ele afirma que o foco inicial das pesquisas sobre o PVT foi o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos com o resfriamento de suas células por ventilação. O aproveitamento do calor para aquecimento de água ou ambientes foi uma ação desenvolvida posteriormente. Diversos autores como Palla et al. (2014), Daghigh et al. (2011), Zondag (2005) e outros afirmam que os estudos sobre o PVT foram inicialmente desenvolvidos nos Estados Unidos e Japão.

Em 1958, Hottel e Whillier desenvolveram um modelo para avaliação do desempenho térmico de coletores solares que foi amplamente utilizado pelos demais pesquisadores. Martin Wolf, em 1974 na Universidade da Pensilvânia, analisou a performance de um sistema de aquecimento de água combinada a um painel fotovoltaico para residências e concluiu claramente que esta combinação era tecnicamente viável e também rentável. Logo, em 1978 um conceito mais sólido sobre o coletor térmico e fotovoltaico usando água ou ar como o fluido de trabalho foi proposto por Kern e Russell. Neste estudo é abordado testes de desempenho de coletores híbridos, modelagem e análise econômica, demonstrando ser viável para pequenos edifícios que tenham baixa demanda de energia térmica.

Posteriormente, Riffat e Cuce (2011) apontam que Hendrie (1979) apresentou um modelo teórico para sistemas PVT usando técnicas de coletores solares térmicos convencionais. Florschuetz (1979) estendeu o conhecido modelo Hottel-Whillier desenvolvido para a análise térmica de coletores de placa plana para a análise de coletores PVT. Ademais, em 1980, Hendrie e Raghuraman, fizeram um estudo comparativo sobre coletores térmicos fotovoltaicos com ar e líquido como fluido de trabalho.

As pesquisas voltadas ao desenvolvimento do PVT foram realizadas em maior quantidade nos EUA. Entretanto, outros países também buscaram conhecimento sobre esta nova possibilidade. No Japão, foram desenvolvidos testes em protótipos do coletor PVT por Nakata et al. a partir de 1982. Karl (1979) desenvolveu pesquisas na Alemanha utilizando um protótipo com Carboneto de Silício esmaltado. Desafortunadamente, em 1982 com a queda do preço do petróleo, os investimentos a cerca das energias renováveis foram interrompidos e por isso os projetos para desenvolvimento da energia solar, sobretudo sobre o PVT ficaram limitados (ZONDAG, 2005).

Zondag (2005) afirma que o interesse em desenvolver alternativas energéticas foi retomado nos anos 90, principalmente por países da Europa como Alemanha, Países Baixos, Dinamarca, Suíça, Hungria e Grécia. Tal fato teve como uma das motivações o Relatório de Brundtland, também conhecido como “Nosso Futuro Comum”, que discursa sobre o desenvolvimento sustentável. Na Ásia, pesquisas também foram desenvolvidas. Huang et al. (1999) desenvolveu um estudo com PVT não esmaltado na Universidade de Taiwan. Chow (2003) construiu um modelo para mensurar o desempenho do sistema termosifão em um PVT. Já na Tailândia, foram desenvolvidos coletores utilizando silício amorfo (SADAMOTO, 2003).

Zondag et al.(2003) estabeleceram nove desenhos para coletores solares PVT divididos em 4 categorias, sendo (a) coletor PVT tipo chapa tubo, (b) coletor tipo canal, (c) de



fluxo livre e (d) com dois absorvedores, conforme é esquematizado na Figura 2.8. Um sistema de aquecimento de água em um coletor PVT por efeito termossifão é proposto por HE et al. (2006). A montagem desse coletor foi dada numa estrutura de alumínio e os resultados dos ensaios indicaram que a eficiência térmica diária poderia atingir cerca de 40% quando a temperatura da água na entrada é a mesma que a temperatura ambiente.

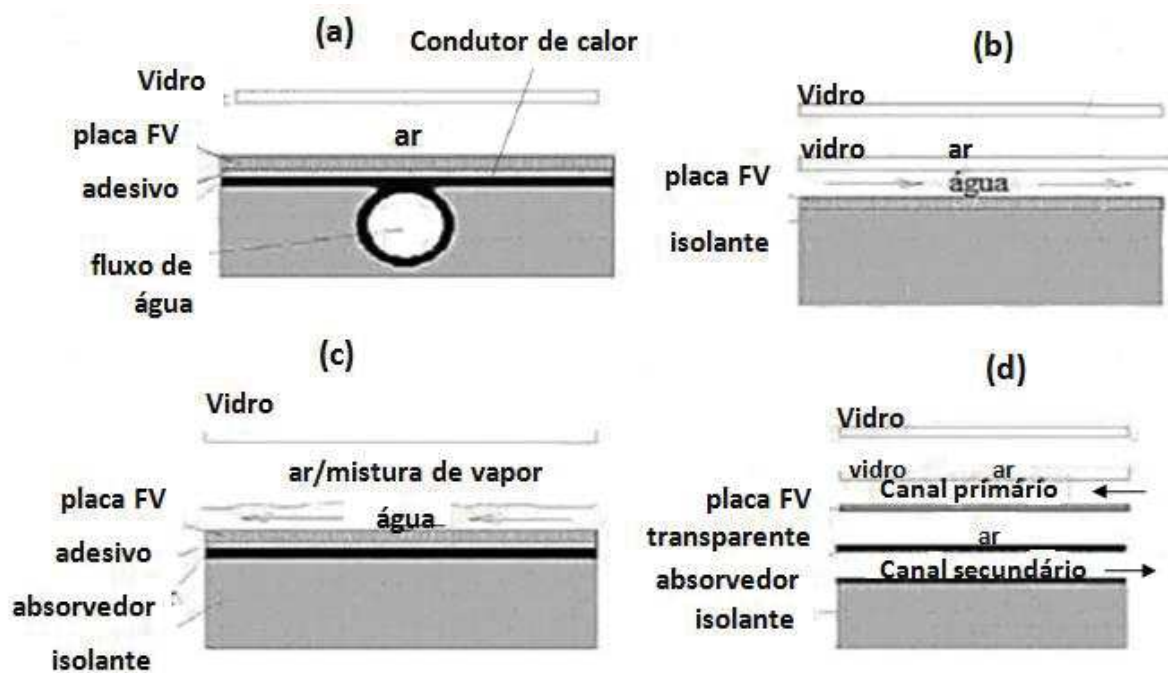


Figura 2.8: Categorias de coletores PVT, conforme Zondag (2003). Fonte: Zondag, 2003.

Um tipo de coletor PVT que possibilita a extração de calor com água ou com circulação de ar utilizando em sua superfície silício amorfo foi proposto por Tripanagnostopoulos (2007). Neste sistema é possível o fornecimento de água quente ou ar de acordo com as necessidades térmicas do edifício e, mostrou também que, mesmo sendo menos eficiente, o silício amorfo é menos influenciado pelo aumento da temperatura. Em um estudo detalhado, Tripanagnostopoulos (2009) explica que a circulação de ar natural ou forçado é um modo simples e de baixo custo para remover o calor de módulos fotovoltaicos, mas é menos eficaz em baixas latitudes onde a temperatura é superior a 20°C. Neste mesmo estudo Tripanagnostopoulos (2009) realiza testes com PVT associado a um concentrador, apontando uma elevação de 2% para eficiência elétrica. Hasan e Sumathy (2010) mostram em seu trabalho que, o sistema PVT pode atingir um rendimento térmico máximo de cerca de 60% para o ar e um valor pouco maior para o sistema arrefecido a água. E completam afirmando que, a resistência térmica é aumentada devido às camadas adicionais de matérias, por exemplo o

tedlar, deste modo é necessário manter todas as camadas entre o painel fotovoltaico e o absorvedor o mais fino possível.

Chow (2010) faz uma revisão sobre os últimos 30 anos de estudos sobre os sistemas PVT desenvolvidos, como os que são resfriados com água e os que são resfriados com ar, apontando o primeiro como sistema de maior desempenho. Logo, Chow et al. (2010) realizam a análise energética do coletor tipo PVT com e sem cobertura de vidro, concluindo que o uso da cobertura de vidro no coletor solar híbrido é favorável ao processo térmico, mas desfavorável ao processo fotovoltaico. Daghigh et al. (2011) analisaram diversas variáveis de um sistema PVT sob as condições meteorológicas da Malásia. Neste foi constatado que a eficiência das células monocristalinas são maiores do que as policristalinas; e quanto maior o número de células fotovoltaicas, menor a eficiência térmica devida às perdas por emissividade.

Treberspurg et al.(2011) relacionam os sistemas PVT mais utilizados, estando disponíveis no comércio europeu. Os autores destacam 6 sistemas PVT's que são os módulos para água com e sem cobertura de vidro, os sistema para ar com e sem cobertura de vidro, módulos PV com ventilação para fachadas e PVT com concentradores. Ibrahim et al. (2011) realizaram a avaliação de desempenho de sistema à água, ar e combinação de água e ar, baseados nos modelos de Zondag et al. (2003) vistos anteriormente. Em seu trabalho, Ibrahim et al. (2011) concluíram que o coletor tipo chapa tubo é o mais simples de ser fabricado, mas sua eficiência é cerca de 2% mais baixa comparada a outros tipos de coletores, tipo canal, fluxo livre e dois absorventes. Tyagi et al. (2012) apresentam tendências de pesquisa e desenvolvimento de avanço tecnológico para sistemas PVT, com aplicações para aquecimento solar, dessalinização de água, estufa solar, bomba de calor solar, sistema de ar condicionado, além da cogeração para fins domésticos e industriais. Este autor também realizou uma revisão sobre essa tecnologia, abordando as características dos diversos tipos de células fotovoltaicas utilizadas.

Koech et al. (2012), elaboraram em seu trabalho um modelo matemático para análise térmica do coletor PVT em fluxo natural, validado a partir de dados experimentais. Deste modo, os resultados indicaram que o aumento da vazão de massa de ar, mantendo a resistência térmica das camadas inferiores EVA e tedlar baixas, resulta num aumento significativo na quantidade de calor transferido para o ar. Também por meio de simulação numérica, Calise et al. (2012) analisaram o desempenho de um sistema térmico e fotovoltaico, discretizando todo o modelo levando em consideração os balanços de massa e energia. Com isso, o coletor demonstrou desempenho energético satisfatório, quando os níveis de radiação

são elevados. Ademais, os autores ressaltam que o sistema estudado é caro devido ao uso de células fotovoltaicas de junção tripla, deixando este dispositivo pouco rentável.

O estudo de Fang e Li (2013) mostrou que os investimentos em energia solar na China cresceram nos últimos 10 anos, colocando o país em primeiro lugar como produtor de células fotovoltaicas e instalação de sistemas de aquecimento de água, popularizando também o sistema PVT. Fang e Li (2013) apresentam em seu trabalho o experimento desenvolvido também na China por Cui et al. (2009) que desenvolveu um modelo dinâmico de sistema PVT com circulação natural e analisou seu desempenho em um dia ensolarado e um nublado. Neste teste, Cui et al. (2009) percebeu que em ambos os casos a temperatura da água sobe gradualmente, mas em dias nublados as temperaturas finais podem ser até 20°C mais baixas do que em dias ensolarados.

Na Universidade Tecnológica de Stuttgart, situada na Alemanha, Palla et al. (2014) realizaram uma análise de potencial para aquecimento, resfriamento e produção de eletricidade de coletor PVT em diferentes condições climáticas, sendo os valores obtidos comparados a um modelo desenvolvido no TRNSYS. Deste modo, os resultados da simulação mostraram que o coletor PVT tem o maior potencial de resfriamento em zonas climáticas frias e moderadas onde o resfriamento é necessário apenas temporariamente. Em climas quentes e úmidos, onde o resfriamento é necessário durante todo o ano, o potencial de resfriamento do coletor é menor. O aumento da produção de eletricidade através do arrefecimento das células fotovoltaicas variou entre 0,1 e 5,8%, dependendo da temperatura de entrada e das condições meteorológicas.

Através da Figura 2.9, Dupeyrat, Ménézo e Fortuinc (2014) explicam a vantagem de um sistema PVT. Representada pela letra “b” os autores demonstram a quantidade de radiação aproveitada na geração de eletricidade, logo a maior parte da radiação recebida sobre uma placa é transformada em calor. Com isso, acoplado um sistema de troca de calor nesse módulo, uma melhor eficiência elétrica é obtida.

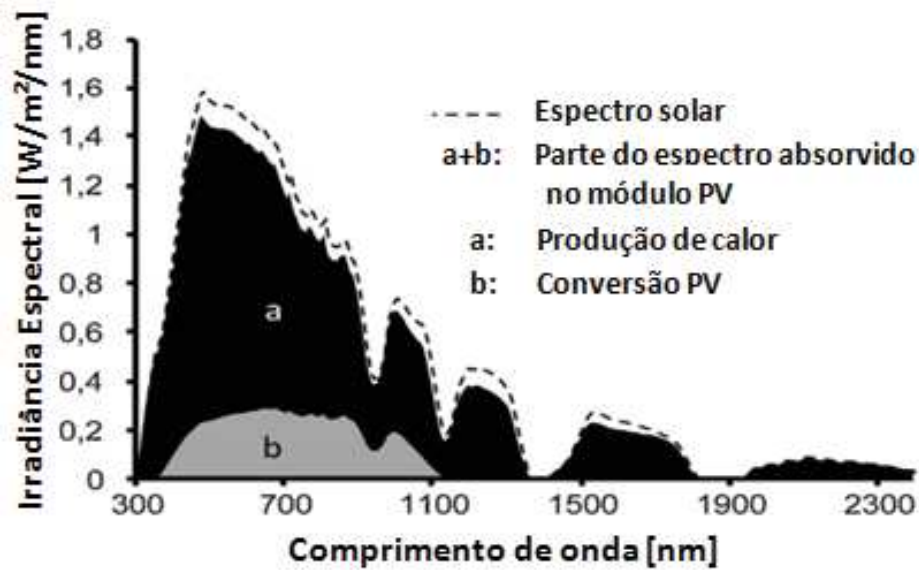


Figura 2.9: Representação espectral da absorção, reflexão e conversão fotovoltaica de uma célula solar tipo c-Si. Fonte: Dupeyrat, Ménézo e Fortuinc (2014)

Rejeb, Dhaou e Jemni (2015) desenvolveram uma investigação numérica, através do software FORTRAN, e experimental de um coletor solar PVT com base nas condições climáticas semi-áridas da Tunísia. Como visto em outras fontes pesquisadas, os resultados mostraram que o aumento da temperatura do PV diminui a eficiência elétrica do coletor PVT, no entanto, ocasiona o aumento da eficiência térmica. Rejeb, Dhaou e Jemni (2015), concluem também que o uso de muitas camadas de vidro para cobertura do PVT pode causar um aumento na eficiência térmica por reduzir as perdas de calor, entretanto promove a diminuição da eficiência elétrica por promover uma alta reflexão e baixa transmissibilidade. Logo, o uso de apenas cobertura de vidro, é um meio favorável de se manter uma compatibilidade entre a eficiência térmica e elétrica. Ferreira et al. (2015) apresentaram resultados de simulações analíticas para avaliação da eficiência elétrica quando um sistema térmico é acoplado a um painel fotovoltaico. Neste estudo, é evidenciado que o ganho na eficiência só é possível quando a água que entra no sistema tiver temperatura inferior que a superfície do módulo.

No ano seguinte, Procópio et al. (2016) propõem um modelo matemático para prever o desempenho térmico e elétrico de um coletor solar PVT em regime permanente, com variações de radiação e velocidade do vento. Com base no comportamento do vento, os autores concluíram que o aumento de sua velocidade acarreta numa redução da eficiência térmica, mas permite uma maior produção de eletricidade devido a perda de calor pelo e topo e laterais. Já valores altos de radiação incidente, para velocidade constante do vento, elevam a

eficiência térmica e diminui a elétrica. Lima et al. (2016), apresentou o desempenho de um sistema PVT por meio de simulação numérica pelo software ANSYS-CFX® 15.0 usando as informações de radiação fornecidos pelo Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, elaborado pela CEMIG.

Por fim, em sua dissertação, Procópio (2016) desenvolveu no software *Engineering Equation Solver-EES*, o modelo analítico de dois coletores solares tipo PVT, um com sistema térmico tipo serpentina e o outro tipo tubo-aleta, a fim de avaliar o desempenho térmico e elétrico desses dois dispositivos. O último coletor citado, tipo tubo aleta, é o mesmo que será abordado neste trabalho.

## 2.5 Modelo computacional

Segundo Maliska (2004), com o avanço das tecnologias computacionais, tornou-se prática o uso de métodos numéricos para análise e solução de problemas de engenharia e física. Para Santos (2008), estes métodos são aplicados, principalmente, em sistemas que envolvem escoamento de fluidos, reações químicas como a combustão e transferência de calor e massa compreendendo a disciplina de Dinâmica dos Fluidos Computacional, conhecida como *CFD (Computational Fluid Dynamics)*. Os códigos em CFD podem resolver as equações de conservação por meio da discretização do domínio de interesse em pequenas escalas, possibilitando soluções com alto nível de detalhamento (SANTOS, 2012).

Para Versteeg e Malalasekera (2007), o código de resolução por CFD é estruturado em torno de algoritmos numéricos que possuem três elementos principais: um pré-processador, um processador e um pós-processador. A fase de pré-processamento envolve a geração do domínio, a divisão do domínio em partes menores que resulta na formação da malha, a escolha do fenômeno físico e/ou químico a ser simulado, a definição das propriedades do fluido ou do material e as especificações das condições de contorno. As condições de contornos mais comuns são as condições de entrada que podem contemplar a pressão, temperatura, propriedades, quantidade, direção e sentido do fluido que entra no domínio; as condições de saída definindo a magnitude, direção e sentido do fluido que sai do domínio e as condições de fronteiras (SANTOS, 2012).

Santos (2012) explica que a fase de pré-processamento consiste em definir a região de simulação e determinar possíveis simplificações a serem realizadas na geometria para a simulação, e complementa afirmando que 50% do tempo gasto em um projeto de CFD é direcionado à geração da malha e definição da geometria. Maliska (2004), através da Figura

2.10, mostra como é dado a tarefa inicial do método numérico, discretizando o domínio em pequenos elementos denominados volumes de controle.

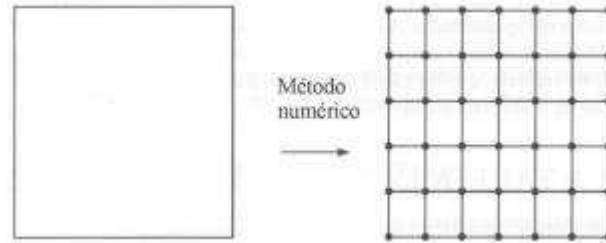


Figura 2.10: Discretização de domínio por método numérico. Fonte: Maliska, 2004.

Depois de inseridas as condições de simulação, no módulo processador o sistema é colocado a resolver as equações para descrever o fenômeno a ser avaliado. Dentre os métodos mais aplicados para resolução das equações na malha estão diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos que é o mais utilizado em códigos comerciais como CFX, devido às suas características conservativas (SANTOS, 2012). Por fim, com a obtenção dos dados, é possível realizar a análise dos resultados chegando ao módulo pós-processador, por meio de gráficos, tabela de dados e imagens (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Na simulação numérica por CFD são solucionadas as equações fundamentais de balanço de massa (Equação 2.1), momentum que se refere ao campo de velocidade do fluido (Equação 2.2, 2.3 e 2.4) e energia (Equação 2.5) apresentadas conforme Versteeg e Malalasekera (2007) para fluidos Newtonianos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_i \quad (2.5)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica [Kg/m<sup>3</sup>]

$t$  = tempo [s]

$u, v, w$  = velocidades de x, y e z, respectivamente [m/s]

$\mu$  = viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>/s]

$k$  = condutividade térmica [W/m.K]

$T$  = Temperatura [K]

$S$  = Termo fonte [variável]

$i$  = Energia térmica interna [J]

Para Santos (2012), apesar do nível de detalhamento e outras vantagens apresentadas pelos códigos CFD, ainda há a necessidade de validar a metodologia e os resultados obtidos. Deste modo, para a validação desses modelos numéricos, pode-se optar por métodos analíticos e experimentais que permitam confrontar os resultados. Diversos autores, como visto na seção 2.4, apresentaram modelos matemáticos e computacionais a cerca do PVT. Alguns deles ainda fizeram a comparação com teste experimental obtendo compatibilidade entre os resultados. Desde modo, a modelagem computacional e analítica se mostra fundamental para conhecimento de potencialidades e pontos de melhoria no desenvolvimento de dispositivos para energia solar, e também em outras finalidades, antes do gasto de recursos em ensaios experimentais.

## 2.6 Transferência de calor em coletores solares

Como visto anteriormente, os coletores solares são os dispositivos que transformam a radiação solar em energia térmica através da troca de calor entre um fluido de trabalho e o absorvedor. Dessa forma, Faria (2007) define como as partes mais importantes de um coletor para aquecimento de um líquido, (1) a superfície absorvedora que transfere o calor para o fluido, (2) a cobertura transparente que reduz as perdas por convecção para a atmosfera e (3) o

isolamento térmico que reduz as perdas por condução.

Conforme apresentado por Duffie e Beckman (2013), a energia útil definida por  $Q_u$  de um coletor é dada pela Equação (2.7):

$$Q_u = A_c[S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (2.7)$$

Em que:

$A_c$  = Área do Coletor [ $m^2$ ]

$U_L$  = Coeficiente global de transferência de calor [ $W/m^2.K$ ]

$T_{pm}$  = Temperatura da placa absorvedora [ $K$ ]

$T_a$  = Temperatura ambiente [ $K$ ]

$S$  = Radiação absorvida pelo coletor solar de acordo com sua área [ $W/m^2$ ] é definida por:

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (2.8)$$

Onde:

$I_b$  = Radiação direta [ $W/m^2$ ]

$I_d$  = Radiação difusa [ $W/m^2$ ]

$\rho_g$  = Sobrescrito de referência para Albedo

$\beta$  = ângulo entre o plano inclinado e o plano horizontal [graus]

$\tau\alpha$  = Transmitância e Absortância Transmitância do vidro [adimensional]

$\rho$  = Densidade [ $Kg/m^3$ ]

O calor será transferido para o fluido devido a um gradiente de temperatura. Assim, Duffie e Beckman (2013) definem pela Equação (2.9) a eficiência térmica de um coletor solar.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (2.9)$$



Para discorrer sobre o fluxo de calor, Procópio (2016) esboça o circuito térmico de um coletor solar tipo PVT (Fig. 2.11).

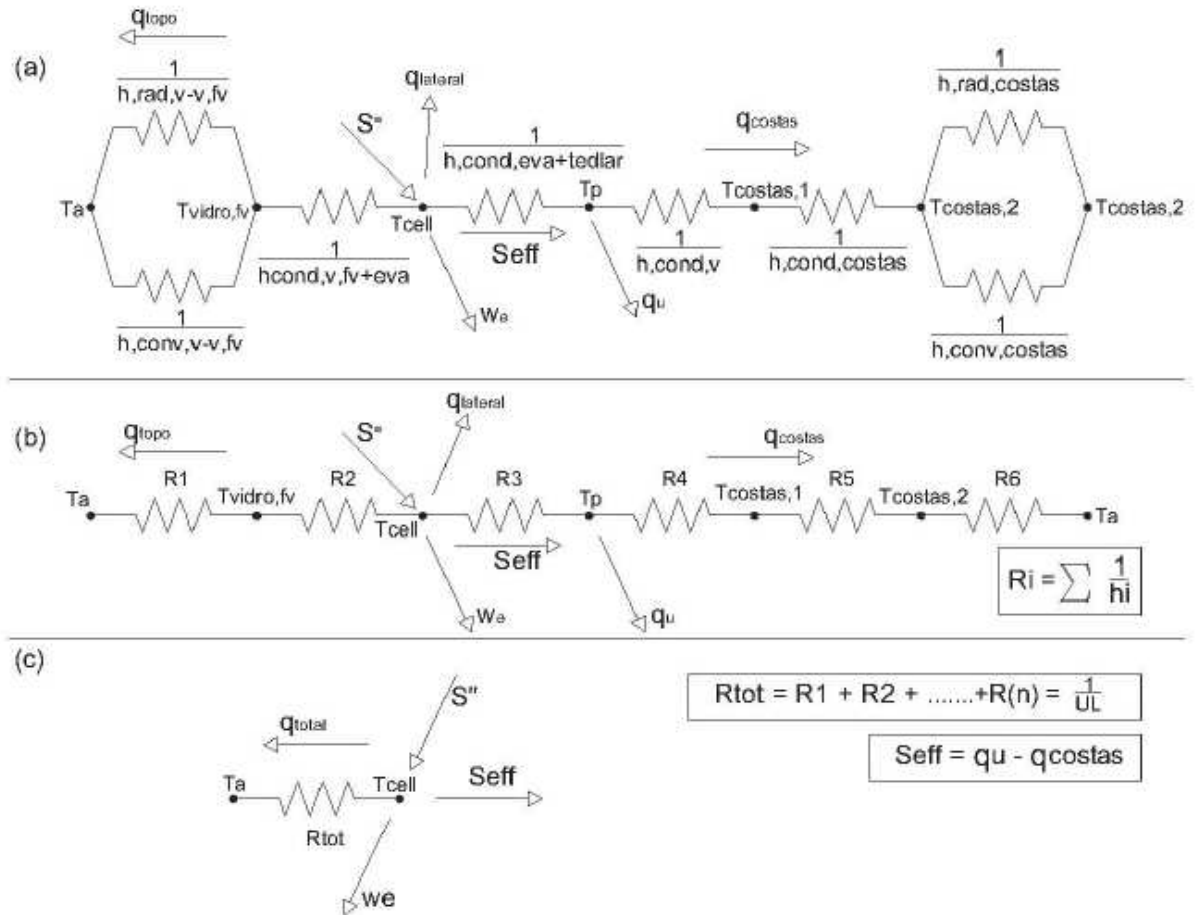


Figura 2.11: Circuito térmico para um coletor PVT a) em termos de condução, convecção e radiação; (b) em termos de resistências (c) em termos do coeficiente global de perdas térmicas. Fonte: Procópio, 2016.

O referido autor explica que  $S$  representa a quantidade de radiação absorvida pelas células fotovoltaicas, localizadas abaixo da cobertura de vidro, e é dada pela Equação (2.10). O balanço de energia é representado pelas Equações (2.11), (2.12) e (2.13).

$$S = I (\tau \alpha_{fv}) \quad (2.10)$$

$$S = w_e + q_{\text{topo}} + S_{\text{eff}} \quad (2.11)$$

$$S_{\text{eff}} = q_u + q_{\text{costas}} \quad (2.12)$$

$$S = w_e + h_{cond,vfv+eva}(T_{cell} - T_{vidro.fv}) + h_{cond,eva+tedlar}(T_{cell} - T_{vidro.fv}) + q_{costas} \quad (2.13)$$

Pela Equação 2.14 avalia-se a quantidade de energia disponível para conversão em calor útil, após a energia elétrica ter sido gerada em uma incidência normal de radiação sobre o PVT (PROCÓPIO, 2016).

$$S_{eff} = I(\tau\alpha_{fv}) + \eta_e\tau_{v,fv} \quad (2.14)$$

Todas as equações e os detalhes do balanço de energia do sistema PVT, como as perdas térmicas, coeficientes convectivos, fator de remoção, entre outros, podem ser vistos em Procópio (2016), Procópio et al. (2016) e no Apêndice 7.1 deste documento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Ensaio Experimental

Os ensaios realizados têm como objetivo a avaliação do desempenho térmico de um coletor solar tipo PVT, a partir de diferentes temperaturas da água na entrada do coletor. Com os resultados obtidos experimentalmente será possível a validação de um modelo numérico desenvolvido nesse trabalho.

Os ensaios foram baseados nas recomendações da Norma Brasileira ABNT NBR 15747-2 de 2009, sendo realizados nos meses de janeiro, fevereiro e março no laboratório do GEPEN – Grupo de Estudo e Pesquisa em Energia, situado no Centro Universitário de Belo Horizonte – UNIBH, bairro Estoril.

##### 3.1.1 Coletor Solar PVT

O coletor solar em estudo foi construído com recursos do projeto de P&D 498: “Desenvolvimento de soluções PVT para aumento da eficiência de usinas solares” financiado pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG com o objetivo de aperfeiçoar a construção de coletores solares planos que além de gerar água quente, também tem a função de resfriar um painel fotovoltaico acoplado em sua parte superior. O protótipo foi construído pela empresa Solider para testes e análises deste projeto, pois se trata de um modelo não encontrado no mercado solar brasileiro (Fig 3.1 e 3.2).



Figura 3.1 e 3.2: Detalhe da construção do coletor PVT em teste. Fonte: Arquivos GEPEN.

As características construtivas do sistema térmico, dimensões e componentes, são apresentadas na tabela 3.1. Os componentes do coletor PVT foram minuciosamente medidos para conhecimento de todas as suas dimensões e construção fidedigna em desenho assistido por computador do protótipo no programa Solidworks® versão 2015, necessário para a

simulação numérica. Após, na Tabela 3.2, observa-se as características referentes ao módulo fotovoltaico disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 3.1 – Características construtivas do coletor solar tipo PVT em estudo

<b>Medida</b>	<b>Dimensão (m)</b>
Largura	0,99
Comprimento	1,662
Espessura total do PV/T	0,05
Espessura do vidro	0,003
Espessura do EVA sobre a célula	0,0005
Espessura do EVA abaixo da célula	0,0005
Espessura do Tedlar	0,0001
Espessura da cola	0,00005
Espessura da aleta	0,0006
Espessura do isolamento das costas	0,045
Espessura do isolamento lateral	0,0225
Espessura do fechamento da parte posterior	0,001
Diâmetro do manifold	0,022
Diâmetro dos aletas verticais	0,01
Quantidade de aletas (unidades)	10

Fonte: Autora

Tabela 3.2 – Características do módulo Fotovoltaico

<b>Dados do Fabricante</b>	
Modelo	KD245GH-4FB
Fabricante	KYOCERA
Material das células	Multi-cristalino
<b>Condições padrão de operação - STC</b>	
Potência Máxima	245 W
Tensão de Máxima potência ( $V_{mp}$ )	29,80 V
Corrente de Máxima potência ( $I_{mp}$ )	8,23 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	36,90 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	8,91 A
Eficiência	14,80 %
<b>Condições Normais de Operação - NOCT</b>	
Máxima potência	175 W
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	26,80 V
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	6,58 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	33,70 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	7,21 A
Temperatura de operação ( $T_{noct}$ )	45 °C
<b>Outras Características Elétricas</b>	
Coefficiente de temperatura para a Tensão Voc	-0,36 %/°C
Coefficiente de temperatura para a corrente $I_{sc}$	0,06 %/°C
Coefficiente de temperatura para a máxima potência	-0,46 %/°C
<b>Dimensões</b>	
Comprimento	1662 mm
Largura	990 mm
Espessura do conjunto	46 mm

Fonte: Arquivos GEPEN.

### 3.1.2 Instrumentação e variáveis medidas

O coletor solar utilizado, junto às mangueiras de direcionamento da água e sensores que foram acoplados na placa, foram colocados em um rastreador solar, denominado *Tracker* (Figura 3.3). O *Tracker* foi construído pela empresa germânica PSE – Projects in Solar Energy, com sede em Freiburg, Alemanha. Este equipamento possui um sistema de ventilação artificial, capaz de gerar correntes de ar com velocidades que variam de 0 a 10 m/s, precisão de rastreamento de um grau, capacidade de carga para até 200 kg, além de ser biaxial. O sistema vem acompanhado de um software que pode operar automaticamente ou manualmente, onde se insere o valor de ângulo desejado. Para este teste, o sistema foi usado em modo automático, para que o coletor permanecesse à normal aos raios solares.

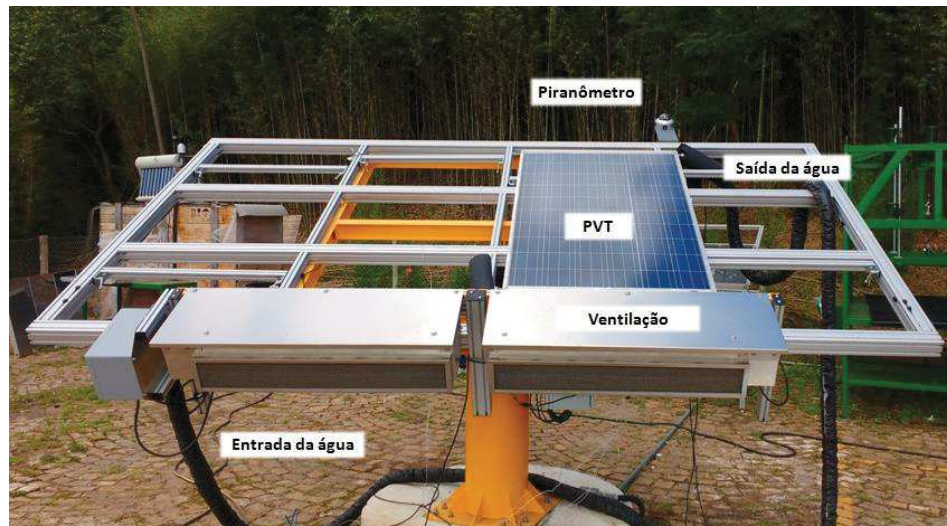


Figura 3.3: Posicionamento de elementos do teste sobre o sistema de rastreamento solar.  
Fonte: Autora.

A radiação solar foi medida pelo piranômetro da marca Delta T – Devices Ltda, modelo SPN1 mostrado na Figura 3.3. Este, possui alcance de até  $2.000 \text{ W.m}^{-2}$ , resolução de  $0,6 \text{ W.m}^{-2}$  e margem de erro de  $5\% \pm 10 \text{ W.m}^{-2}$  à média horária. O piranômetro foi acoplado ao rastreador para medir a radiação incidente na placa à normal dos raios solares.



Figura 3.4: Piranômetro utilizado nos testes experimentais. Fonte: Autora.

A temperatura ambiente foi medida pelo transmissor de temperatura e umidade do ar modelo WTUTA-5800 da empresa Warme. Para temperatura, o fabricante apresenta faixa de indicação de 0 a 60 °C, resolução de 0,1 °C e precisão de 0,2%. Conforme visto na Figura 3.5, este transmissor possui 0,2 kg, o material da caixa é feito de policarbonato e possui dimensões de 100x65x40mm. O transmissor foi colocado no container, para não ter os valores medidos comprometidos pelos raios solares conforme orienta a Norma ABNT 15747-2: 2009.



Figura 3.5: Transmissor de temperatura e umidade do ar WTUTA-5800. Fonte: Autora.

Para medição das temperaturas de entrada e saída da água, foram utilizados dois termopares do tipo PT 100, por serem considerados sensores de alta precisão em comparação com os demais, com valores médios de 0,3% de precisão. Conforme orientação da Norma ABNT 15747-2: 2009, os termopares foram cobertos por isolantes térmicos espumados para que não tenham os valores medidos influenciados por condições externas, como mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6: Posicionamento do PT100 para medição da temperatura de entrada da água com proteção térmica. Fonte: Autora.

Conforme citado anteriormente, o Tracker utilizado possui sistema de ventilação artificial que foi acionado e configurado para 5 m/s. Entretanto, os valores variam de acordo com o comprimento do coletor solar, sendo necessário o uso de valores médios. Para definição destes valores, foi utilizado um anemômetro de molinete modelo 416 fabricado pela empresa portuguesa Testo. Este equipamento possui resolução de 0,1 m/s, faixa de medição de 0,6 a 40 m/s e exatidão em cerca de 0,2 m/s ou 1,5% do valor médio. Logo, para estabelecer valores médios para velocidade do vento, o coletor solar foi medido em 4 posições horizontais (Figura 3.7). Em cada ponto, foram retirados valores do lado esquerdo (medição 1), meio (medição 2) e lado direito (medição 3) conforme apresenta a Tabela 3.3. Na aquisição dos dados, cada valor mostrado abaixo, é uma média de três valores calculada automaticamente pelo equipamento.

	Medição(m/s)		
	1	2	3
<b>Ponto 1</b>	6,4	6,1	6
	5,9	6,5	6,1
	6	6,2	5,6
<b>Ponto 2</b>	3,7	4,6	4,2
	4,2	4,8	4,1
	4,2	4,4	4,3
<b>Ponto 3</b>	2,8	3,3	3,2
	3,2	3,6	3,5
	3,1	3,3	3
<b>Ponto 4</b>	2,9	2,9	3
	3,4	2,9	3,1
	2,6	3,4	3,1



Tabela 3.3 e Figura 3.7: Pontos medidos para determinação da velocidade do vento. Fonte: Autora.



Os dados obtidos foram inseridos em uma plataforma do software *ANSYS CFX® 15.0* que estabeleceu, por meio de interpolação, o perfil da velocidade do vento sobre o coletor solar PVT. Os resultados obtidos são mostrados no Gráfico 3.1, onde a posição 0 do eixo z representa a area central do coletor (a cerca dos pontos 2 e 3), a parte com maior velocidade do vento se refere a parte inferior, mais próxima a ventilação artificial (ponto 1) e consequentemente, os valores mais baixos estão localizados na parte superior da placa (ponto 4).

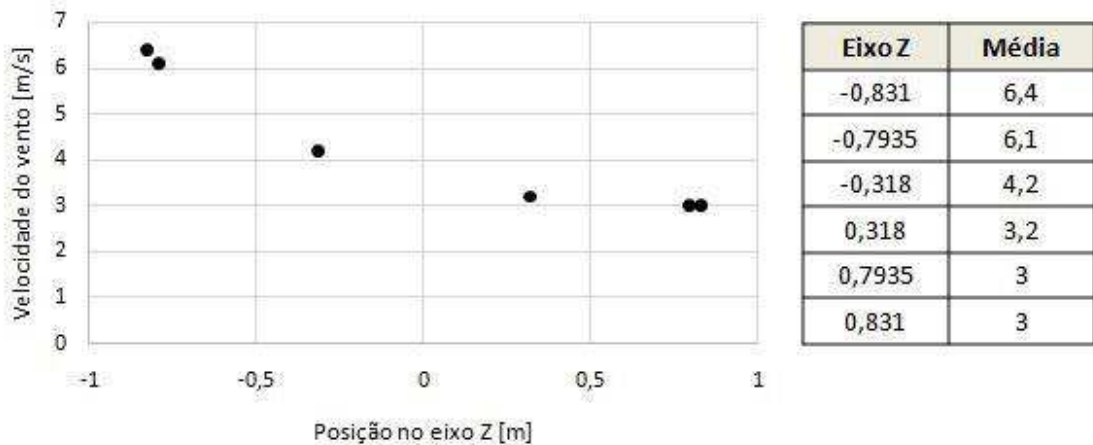


Gráfico 3.1: Valores finais para velocidade do vento. Fonte: Autora.

Como os valores de temperatura de entrada da água precisam ser predefinidos e permanecer em regime permanente, foi necessário o uso de um sistema de refrigeração. O *Chiller* utilizado no ensaio foi o modelo Unistat 425 fabricado pela empresa Huber (Figura 3.8). O equipamento possui visor para acompanhamento dos valores obtidos e faixa operacional de - 40 °C a 250 °C em temperatura ambiente mínima de 5° C e máxima de 40° C.



Figura 3.8: *Chiller* utilizado na regulagem de temperatura da água. Fonte: Autora.

Foi utilizado um sistema de circulação de água forçada, para obter valores permanentes de vazão. Na figura 3.9 apresenta-se a bomba hidráulica, o medidor de pressão, os pontos de entrada e saída da água do reservatório e as entradas e saídas de água da placa. O medidor de vazão se encontra atrás da bomba. Na Figura 3.10 têm-se as especificações da bomba responsável pelo fluxo da água na placa.



Figura 3.9: Sistema hidráulico do ensaio experimental. Fonte: Autora.

3~Motor DCSKh 71-B2			IM V18 IP55		CE		
INS.CL.F IEC 60034-1			11/14 14614941				
Art.nr: 3710021003			cosφ 0,76		S1		
V	Hz	min <sup>-1</sup>	kW	A	η[%]	U <sub>V</sub>	A <sub>MAX</sub>
230 D	50	2865	0,37	1,6	76,0	207-253	2,4
400 Y	50	2865	0,37	0,95	76,0	360-440	1,4
230 D	60	3430	0,37	1,6	76,0	207-276	2,4
400 Y	60	3430	0,37	0,95	76,0	360-480	1,4

Figura 3.10: Característica da bomba hidráulica utilizada. Fonte: Autora.

Todos os equipamentos de medição foram conectados a um Multímetro de Multivarredura, da empresa Agilent LXI (Figura 3.11). Este aparelho realiza a leitura de todos os parâmetros medidos e armazena em banco de dados.



Figura 3.11: Multímetro de Multivarredura "Agilent LXI". Fonte: Autora.

As medições também foram transmitidas para um software que apresenta os dados obtidos esquematicamente, facilitando o acompanhamento sobre o comportamento das variáveis. A interface deste software é apresentada na Figura 3.12 e 3.11, desenvolvido pela empresa alemã PSE.



Figura 3.12: Detalhe da interface de inserção de dados sobre o teste. Fonte: Autora.

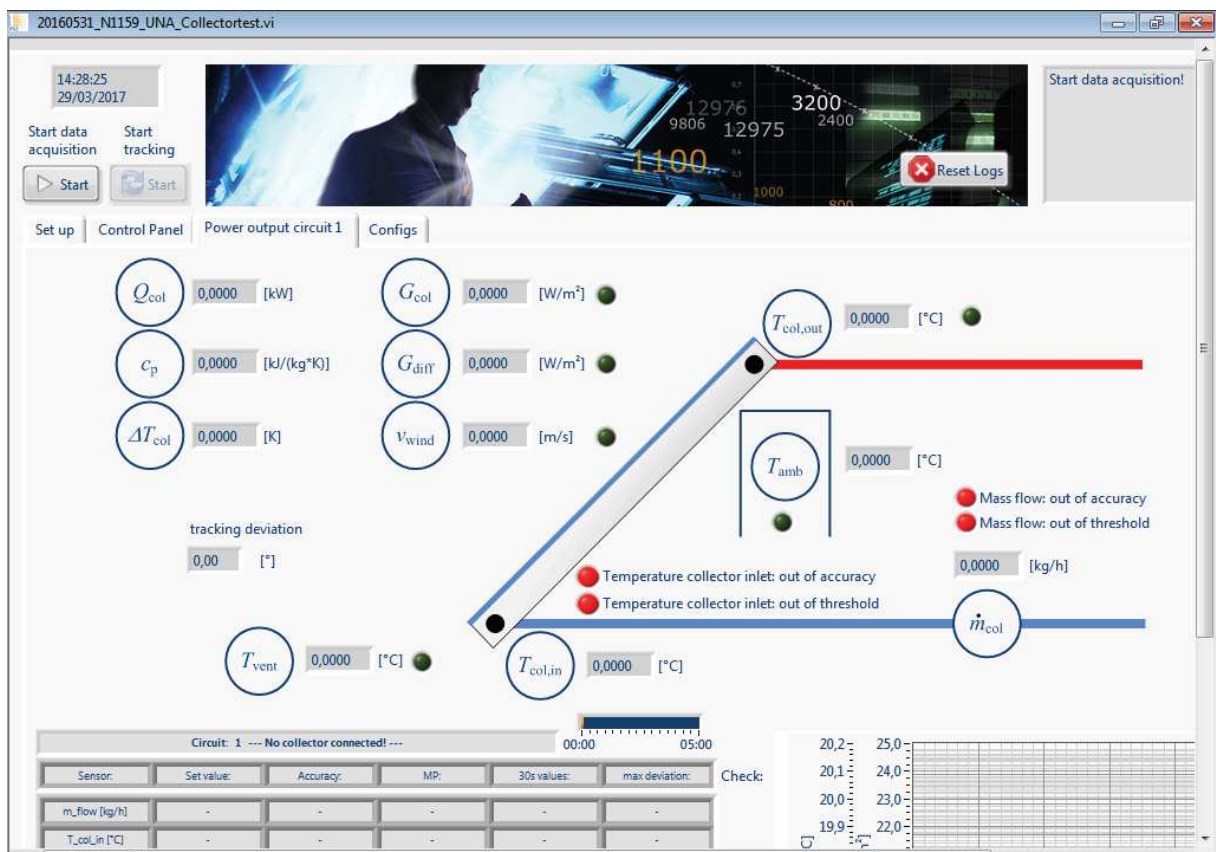


Figura 3.13: Detalhe da interface do software de acompanhamento dos dados do ensaio experimental. Fonte: Autora.

Outra característica fundamentalmente observada para o teste foi a condição do céu, que preferencialmente deveria estar com ausência de nuvens. Partículas presentes na

atmosfera dispersam os raios solares fazendo com que a radiação direta incidente sobre a placa caia afetando o regime permanente do sistema. PALZ (2002) explica que há diferentes tipos de nuvens. Segundo este autor, as nuvens podem ser caracterizadas por sua altitude como baixas, médias e altas e também por sua aparência como cirrus, estratus e cumulos. Logo, as nuvens caracterizadas como cirrus são mais altas, finas e, portanto pouco densas afetando menos a radiação solar. As demais são mais densas e fibrosas causando impacto significativo nos dados experimentais.

### **3.1.3 Procedimento Experimental**

O procedimento experimental foi realizado pela autora com o auxílio de um membro do GAMSET e alguns membros do GEPEN, sendo dividido nas seguintes etapas:

Passo 1: Instalação do coletor: O coletor foi fixado no rastreador solar para garantir a incidência normal da radiação solar durante todo o teste. Logo, foram conectadas nos pontos de entrada e saída da água as magueiras ligadas à bomba responsável pela circulação da água no sistema e os sensores PT 100 para medição das temperaturas de entrada e saída.

Passo 2: Pressurização da bomba: Afim de retirar todo o ar existente no circuito, bombas auxiliares foram utilizadas para inserir água de um reservatório no sistema. A mangueira para saída da água foi colocada em um recipiente com água para observação da saída de bolhas de ar. Quando apenas água saia do sistema, as bombas auxiliares eram desligadas, a válvula de saída da água fechada e a válvula do sistema aberta. Deste modo, quando a pressão do sistema ultrapassava 2,5 bares as bombas para circulação interna da água podiam ser acionadas.

Passo 3: Os equipamentos e programas de leitura eram acionados ao mesmo tempo, para aquisição e armazenamento de dados.

Passo 4: Com o sistema acionado, realizava-se a inspeção em todo o sistema a fim de identificar possíveis pontos de vazamento de água, conforme previsto na Norma NBR ABNT 15747-2: 2009.

Passo 5: Os dados medidos são acompanhados pela interface do software, apresentado pela Figura 3.13. Sendo observado pouca variação entre os valores obtidos por no mínimo 10 minutos, os dados da temperatura de entrada da água eram alterados, para obtenção dos demais pontos.

Passo 6: Após a obtenção dos dados, realiza-se o tratamento dos dados com uma análise minuciosa da planilha gerada. Os períodos de regime permanente foram

estabelecidos, com o auxílio da norma ABNT NBR 15747-2 de 2009, que apresenta os desvios permitidos de cada parâmetro conforme visto na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Desvio permitido dos parâmetros para definição de regime permanente

Parâmetros	Desvio permitido do valor médio
Radiação solar global de ensaio	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Temperatura do ar ambiente	$\pm 1 \text{ K}$
Vazão mássica da água	$\pm 1\%$
Temperatura de entrada da água	$\pm 0,1 \text{ K}$

Fonte: ABNT NBR 15747-2: 2009.

### 3.2 Metodologia Numérica

A simulação numérica foi realizada com base no método de volumes finitos, através do programa comercial, *ANSYS CFX® 15.0*. A elaboração da simulação não requer inserção das equações envolvidas, mas sim a definição da geometria, a geração da malha, definições dos materiais e condições de contorno, como será detalhado nos próximos tópicos. As simulações foram realizadas no laboratório do GAMSET, situado no Campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais.

#### 3.2.1 Elaboração do modelo geométrico

O modelo geométrico tridimensional do coletor PVT foi elaborado com o auxílio do programa Solidworks® versão 2015, podendo ser observado na Figura 3.14 em perspectiva isométrica, que indica os pontos de entrada e saída da água e a posição das células fotovoltaicas.

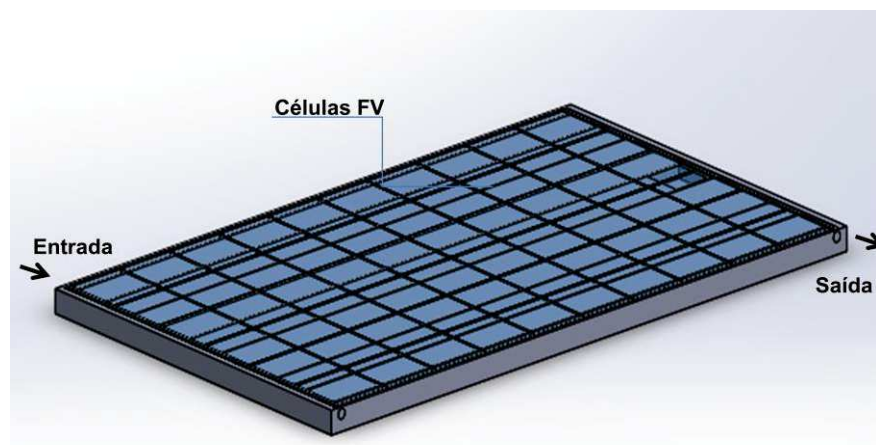


Figura 3.14 – Perspectiva isométrica do coletor PVT construído pelo Solidworks® versão 2015. Fonte: Autora

O coletor PVT analisado possui trocador de calor tipo tubo aleta, e pode ser visto em perspectiva explodida na Figura 3.15. Os parâmetros construtivos utilizados na construção deste modelo foram medidos a partir do mesmo protótipo utilizado no ensaio experimental e foram apresentados na Tabela 3.1.

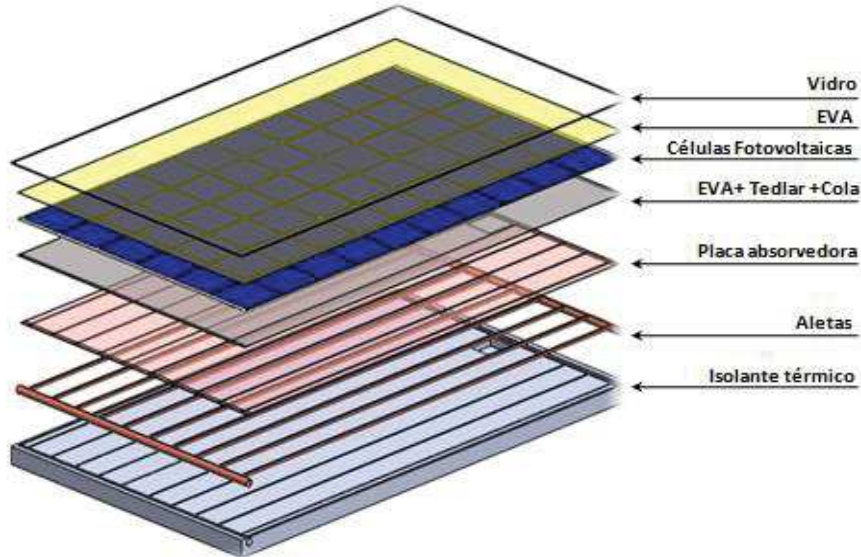


Figura 3.15 – Modelo tridimensional detalhado do coletor solar PVT. Fonte: Autora.

### 3.2.2 Geração da malha

Após a elaboração e importação da geometria para o *ANSYS CFX® 15.0*, a malha foi construída utilizando o Ansys Meshing, ferramenta disponível na plataforma do Ansys Workbench®. Como afirma Versteeg e Malalasekera (2007), a geração da malha requer bastante cautela uma vez que, o uso de uma malha grosseira pode gerar resultados pouco precisos e a aplicação de uma malha muito refinada pode acarretar longo tempo de simulação.

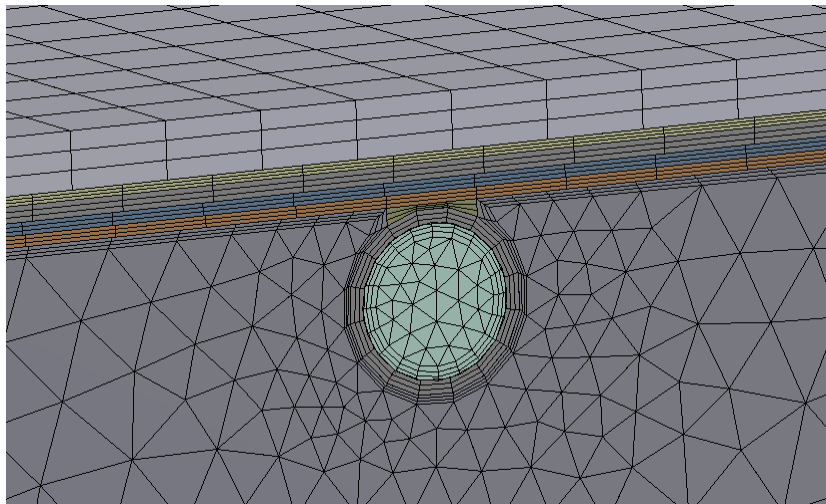


Figura 3.16 - Detalhe da malha gerada para o coletor solar PVT. Fonte: Autora.

As malhas foram refinadas de forma gradativa. Celik et al. (2008) define em seus estudos o critério do valor de comprimento do elemento de malha ( $h$ ) para se proceder ao seu refinamento por meio da Equação (3.1), onde:  $\Delta V_i$  é o volume do elemento de malha e  $N$  é o número total de elementos da malha.

$$h = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

A partir da determinação do  $h$  é possível definir o fator de refinamento da malha ( $r$ ), dado pela Equação (3.2), que consiste na razão entre o  $h_{mg}$  de uma malha grosseira e o  $h_{mr}$  da malha refinada. Celik *et al.* (2008) aconselha que o fator de refinamento da malha seja maior do que 1,3 e também homogêneo entre todas as malhas avaliadas.

$$r = \frac{h_{mg}}{h_{mr}} \quad (3.2)$$

A placa foi dividida em diversos domínios referentes as suas propriedades específicas. Pela Tabela 3.5 tem-se a estatística de toda malha do coletor simulado. Tais valores foram precisamente extraídos do software *ANSYS CFX® 15.0*.

Tabela 3.5: Resumo das estatísticas da malha de cada componente do coletor

Domínio	Número de nós	Número de elementos
Fluido	1705411	3195755
Tubos e Placa de cobre	1272632	933069
Caixa junção	3528	2800
Placa absorvedora	242776	180501
Isolante Manifold inferior	102631	502582
Isolante Manifold superior	103997	510982
Vidro	265084	197220
EVA	257664	191697
Celulas PV	257648	191694
Cola+Tedlar+EVA	257624	191655
Tubos manifold inferior	41718	124082
Tubos manifold superior	41589	123758
Isolante central	1222531	6497513
<b>TOTAL</b>	<b>5774833</b>	<b>12843308</b>

Fonte: Autora.

### 3.2.3 Configurações das simulações

Posterior a geração da malha, é necessário inserir as características dos componentes do dispositivo a ser simulado e a propriedade desses materiais, dados apresentados pela Tabela 3.6 e 3.7. É necessário também informar as condições de contorno visto na Tabela 3.8.

Tabela 3.6 – Configurações para simulação do coletor PVT

<b>Domínio</b>	<b>Configuração</b>
Painel FV	Silício policristalino
Aletas	Cobre
Isolante térmico	Lã de vidro
Fechamento lateral e inferior	Alumínio
Fluido de trabalho	Água

Fonte: Autora.

Tabela 3.7 – Propriedade dos materiais

Condutividade térmica do vidro	1.40 W/m·K
Condutividade térmica do EVA	0.35 W/m·K
Condutividade térmica do Tedlar	0.2 W/m·K
Condutividade térmica da cola	0.85 W/m·K
Condutividade térmica do isolante	0.038W/m·K
Condutividade térmica das costas do coletor	237 W/m·K
Condutividade térmica da placa absorvedora e tubos	401 W/m·K
Emissividade do vidro	0.9
Emissividade das costas do coletor	0.8
Transmissividade-absortividade do vidro	0.78
Condutividade da solda	5000 W/m·K

Fonte: Procópio, 2016.

Tabela 3.8 – Condições de contorno

<b>Área</b>	<b>Condição de contorno</b>
Topo da placa	Fluxo de calor prescrito - Radiação
Topo da placa	Perda de calor por convecção forçada e radiação
Lateral esquerda	Perda de calor por convecção forçada e radiação
Lateral direita	Perda de calor por convecção natural e radiação
Lateral superior	Perda de calor por convecção natural e radiação
Lateral inferior	Perda de calor por convecção forçada e radiação
Entrada da água no sistema	Vazão mássica e temperatura

Fonte: Autora.

Ressalta-se que as perdas de calor por convecção ocorrem pela ação dos ventos, por meio da ventilação instalada no *Tracker* que fica posicionada na base do coletor, além dos ventos naturais, já que o teste foi realizado ao ar livre.



### 3.3 Modelo analítico

Para solução do balanço de energia do PVT, foi utilizado o modelo matemático proposto por Procópio et al. (2016) implementado no programa EES. Deste modo, aqui serão apresentadas apenas as equações adaptadas de acordo com a realidade dos testes realizados neste trabalho, referente as perdas térmicas por convecção do PVT. Todas as equações utilizadas no EES são apresentadas no Apêndice 7.1 e o detalhamento de cada uma delas é explicado no trabalho de Procópio et al. (2016) e citado na seção 2.6 deste trabalho.

Os fluxos de calor a partir das células fotovoltaicas e as temperaturas envolvidas no balanço energético são esquematizados pela Figura 3.17. As perdas de calor para o ambiente se dão por convecção e radiação nas superfícies externas do PVT.

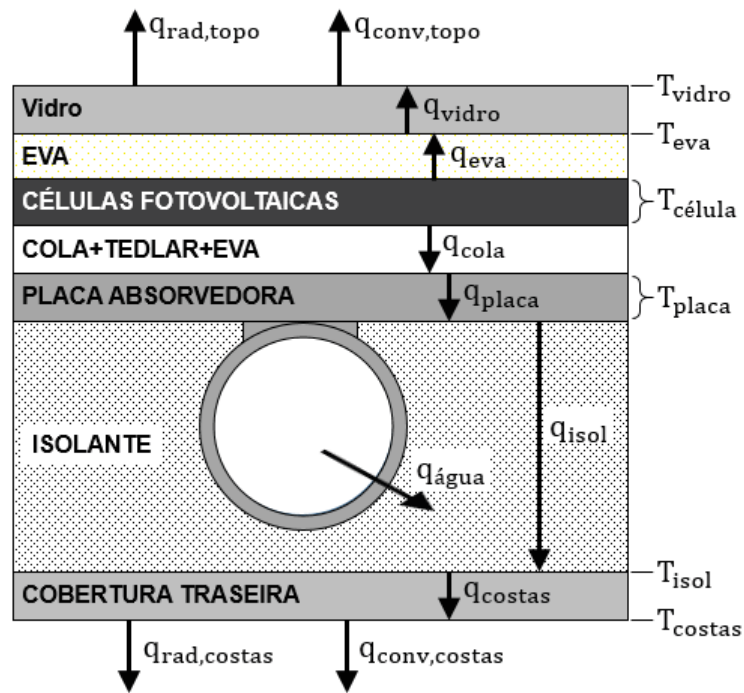


Figura 3.17 – Fluxos de calor e temperaturas no PVT. Fonte: Autora.

Pela lei de resfriamento de Newton, o fluxo de energia para o ambiente é definido pela Equação 3.3 definida por Incropera et al. (2014), onde o subscrito  $s$  refere-se à superfície exposta à temperatura ambiente e o coeficiente de transferência de calor  $h$  é calculado para cada condição de contorno, como será descrito adiante.

$$q = h(T_s - T_{ambiente}) \quad (3.3)$$

### 3.3.1 Perdas térmicas por convecção

Perdas de calor por convecção no topo e nas costas do PVT podem ocorrer de duas formas: forçada, na presença de vento, ou natural, por efeitos de forças de empuxo no ar devido ao aquecimento do mesmo. Como no presente experimento foi utilizado um ventilador na base do PVT, a convecção natural no topo foi desprezada, sendo considerado apenas o processo de convecção forçada. Deste modo, o coeficiente de transferência de calor convectivo no topo do PVT,  $h_{vento}$ , é calculado pela Equação empírica (3.4) apresentada por Duffie e Beckman, 1991, onde  $V_w$  é a velocidade média do vento, medida em m/s.

$$h_{vento} = 2,8 + 3V_w \quad (3.4)$$

Para a base do PVT, apenas a convecção natural foi considerada, uma vez que a estrutura de suporte do coletor protege as costas tanto do vento soprado pelo ventilador quanto do vento ambiente. O coeficiente de transferência de calor por convecção natural médio de uma superfície exposta à temperatura ambiente é dado em função do número médio de Nusselt,  $\overline{Nu}$ , e definido pela Equação (3.5):

$$h_{conv} = \frac{k_{ar}}{\overline{Nu}L} \quad (3.5)$$

Onde,

$k$  - condutividade térmica do ar à temperatura de filme [W/m.K]

$L$  - comprimento da superfície [m]

Em uma placa inclinada com ângulo  $\theta$  em relação à vertical com superfície aquecida voltada para baixo,  $\overline{Nu}$  é calculado através de correlações empíricas. Segundo Incropera et. al.(2014), para  $0 \leq \theta \leq 60^\circ$  utiliza-se a correlação entre as Equações (3.6) ou (3.7):

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,670Ra^{1/4}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{para } Ra \leq 10^9 \quad (3.6)$$

$$\overline{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{para } Ra > 10^9 \quad (3.7)$$

Sendo  $Ra$  o número de Rayleigh definido pela equação (3.8):

$$Ra = \frac{g \cos(\theta) \beta (T_s - T_{ambiente}) L^3}{\nu \alpha} \quad (3.8)$$

Onde,

$g$  - aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]

$\beta$  - coeficiente de expansão térmica volumétrica [adimensional]

$\nu$  - viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>/s]

$\alpha$  - difusividade térmica [m<sup>2</sup>/s]

Para  $\theta > 60^\circ$  e  $10^5 < Ra < 10^{11}$ , é utilizado a correlação dada pela equação (3.9) (Fujji e Imura, 1972):

$$\overline{Nu} = 0,56(Ra)^{1/4} \quad (3.9)$$

De modo que as propriedades do fluido são calculadas para a temperatura de filme, através da Equação (3.10)

$$T_{filme} = T_{costas} - 0,25(T_{costas} - T_{ambiente}). \quad (3.10)$$

### 3.4 Equações aplicadas na análise

Para melhor apreciação e entendimento dos resultados, a determinação da eficiência térmica foi dada pela Equação (3.11) e colocada em função da Temperatura reduzida (Equação 3.12) que permite a análise da eficiência, considerando as temperaturas de entrada e saída da água e da radiação conforme Zondag et. al. (2003).

$$\eta_{th} = \dot{m} \frac{c(T_{sai} - T_{ent})}{G} \quad (3.11)$$

$$T_{red} = \frac{T_{ent} - T_{amb}}{G} \quad (3.12)$$

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de entrada, extraídos experimentalmente, e posteriormente utilizados nas simulações realizadas são apresentados na Tabela 4.1. Os valores de entrada utilizados para início das simulações são temperatura de entrada da água e ambiente, radiação solar e vazão. Assim como é sugerido pela NBR ABNT 15747-2: 2009, cada ponto abaixo, é resultado da média de 4 valores retirados de um intervalo de tempo de 10 minutos. O fluido apresentou vazão mínima de 0,02 kg/s em todos os pontos conforme orienta esta mesma norma. Para alcance de altas temperaturas nos ensaios, esta norma recomenda que o teste seja feito com incidência mínima de 1000 W/m<sup>2</sup> de radiação e temperatura ambiente entre 20 e 40°C. Ambos os quesitos foram cumpridos, uma vez que todos os valores de radiação foram superiores a 1000 W/m<sup>2</sup> e a temperatura ambiente variou de 26°C a 31°C. A temperatura de entrada era alterada à medida que se obtinha um tempo de permanência com o valor inserido no sistema. Deste modo, foram obtidos 11 pontos com temperaturas entre 26° C e 48°C. Todos os valores utilizados para definição dos pontos abaixo são apresentados no Apêndice 7.3.

Tabela 4.1 Dados experimentais utilizados como dados de entrada nas simulações

<b>DADOS DE ENTRADA - VALORES EXPERIMENTAIS</b>					
<b>Ponto</b>	<b>Temperatura de entrada da água [K]</b>	<b>Radiação [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Vazão mássica [kg/s]</b>	<b>Temperatura ambiente [K]</b>	<b><math>\theta</math> [rad]</b>
1	299,78	1077,70	0,03	299,81	1,31
2	305,61	1147,41	0,03	303,43	1,10
3	306,37	1093,64	0,02	302,42	0,74
4	307,19	1116,66	0,02	302,65	0,97
5	307,88	1091,50	0,02	302,62	1,03
6	309,60	1136,55	0,03	304,37	1,22
7	311,32	1059,03	0,02	301,05	1,20
8	311,94	1054,63	0,02	301,56	1,06
9	313,15	1089,32	0,03	299,63	1,09
10	317,29	1086,10	0,03	299,62	1,04
11	321,91	1130,96	0,03	301,58	1,07

Fonte: Autora.

Com os resultados acima, calcula-se a temperatura reduzida de cada ponto pela Equação (3.12). Os valores encontrados serão utilizados para análise da eficiência térmica,

mais adiante. Deste modo, os valores de temperatura reduzida encontrados para cada ponto são conhecidos através Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Temperatura reduzida dos pontos medidos

Ponto	Temperatura Reduzida [K.m <sup>2</sup> /W]	Ponto	Temperatura Reduzida [K.m <sup>2</sup> /W]
1	-2,87E-05	7	0,009
2	0,002	8	0,010
3	0,003	9	0,012
4	0,004	10	0,016
5	0,005	11	0,018
6	0,004		

Fonte: Autora.

Os dados de entrada obtidos foram utilizados nos softwares *ANSYS*® e *EES* para obtenção da temperatura de saída da água e, conseqüentemente, os dados de eficiência térmica. Com isso, os dados de temperatura de saída obtidos experimentalmente e os dados alcançados por simulação são expostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultados obtidos pelas simulações e ensaio experimental

Ponto	RESULTADOS					
	EXPERIMENTAL		EES		Simulação CFX	
	Temperatura de saída da água [K]	Eficiência Térmica $\eta_T$	Temperatura de saída da água [K]	Eficiência Térmica $\eta_T$	Temperatura de saída da água [K]	Eficiência Térmica $\eta_T$
1	303,97	0,32	303,38	0,45	305,20	0,41
2	310,18	0,33	309,20	0,42	311,00	0,39
3	312,25	0,27	311,44	0,38	313,75	0,34
4	312,29	0,27	311,58	0,38	313,64	0,34
5	313,63	0,28	312,43	0,37	314,52	0,32
6	313,10	0,26	312,81	0,38	314,33	0,35
7	314,94	0,21	314,45	0,30	315,86	0,26
8	315,25	0,20	314,90	0,30	316,23	0,26
9	315,61	0,18	315,27	0,26	316,23	0,23
10	318,87	0,12	318,93	0,20	319,63	0,17
11	323,53	0,11	323,45	0,17	324,06	0,15

Fonte: Autora.

Observa-se que os valores de temperatura de saída encontrados nas três situações expostas são bastante próximos, apresentando variações entre 0,5 e 1,5 graus. Avaliando as duas tabelas, com o auxílio do Gráfico 4.1, onde são plotados as temperaturas de saída em cada ponto nos três testes e a temperatura de entrada da água, é percebido que a variação de temperatura da saída e entrada da água diminui a medida que a temperatura se eleva. Quando a temperatura de entrada da água alcança cerca de 315 K ou  $\cong 42^{\circ}\text{C}$ , há uma remoção menor de calor da placa, já que a temperatura da água sofre uma diferença baixa após circular pelo PVT, fato que também pode ser observado pela Figura 4.1, na placa 11.

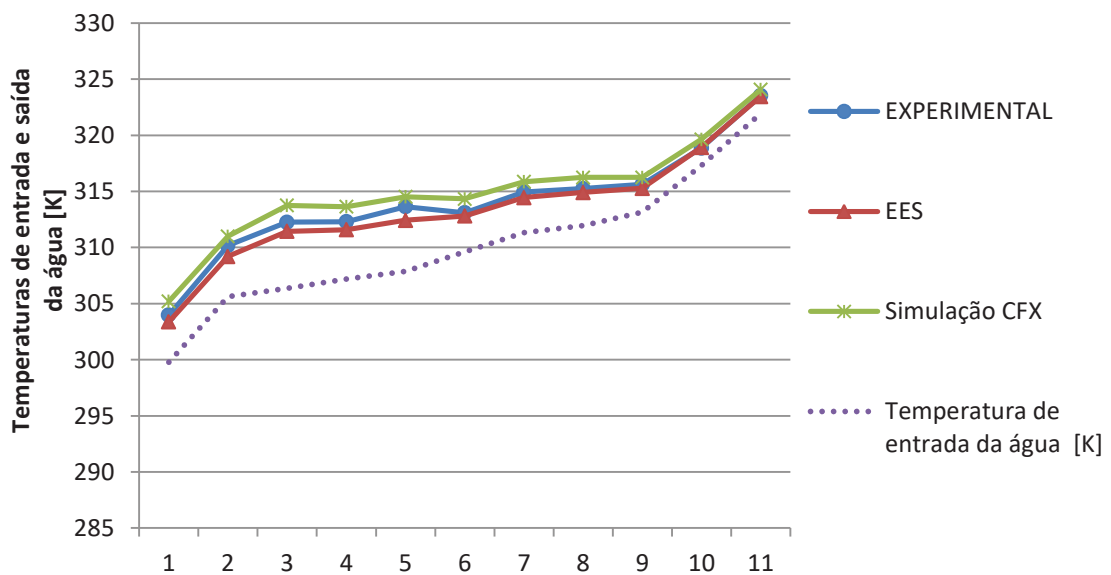


Gráfico 4.1: Temperaturas de saída e entrada de água em cada ponto do PVT. Fonte: Autora.

Para Corgozinho (2016), a temperatura da placa pode revelar importantes detalhes acerca do desempenho do coletor solar. Pela Figura 4.1 são apresentados os perfis de temperatura em perspectiva transversal de 4 dos 11 pontos medidos. Por esta figura, são apresentados os dois pontos de menor valor e os dois pontos de maior valor de temperatura de entrada da água. Tais imagens foram obtidas pelo programa de simulação *ANSYS*® versão 2015.

Nos pontos 1 e 2 nota-se um gradiente de temperatura mais evidente, que sugere maior remoção do calor pela água, uma vez que os pontos mais frios estão localizados nas proximidades das aletas, onde se tem a passagem do fluido de trabalho. Já nos pontos 10 e 11 percebe-se certa uniformidade da temperatura no topo da placa. Observa-se então que à medida que a temperatura da água aumenta, a remoção de calor da superfície pela água

diminui, resultando em valores de saída semelhantes aos valores de entrada da água. Além de conhecer sobre o desempenho do coletor, tal informação pode ser útil no dimensionamento do reservatório de água, quando for empregado o sistema de termosifão.

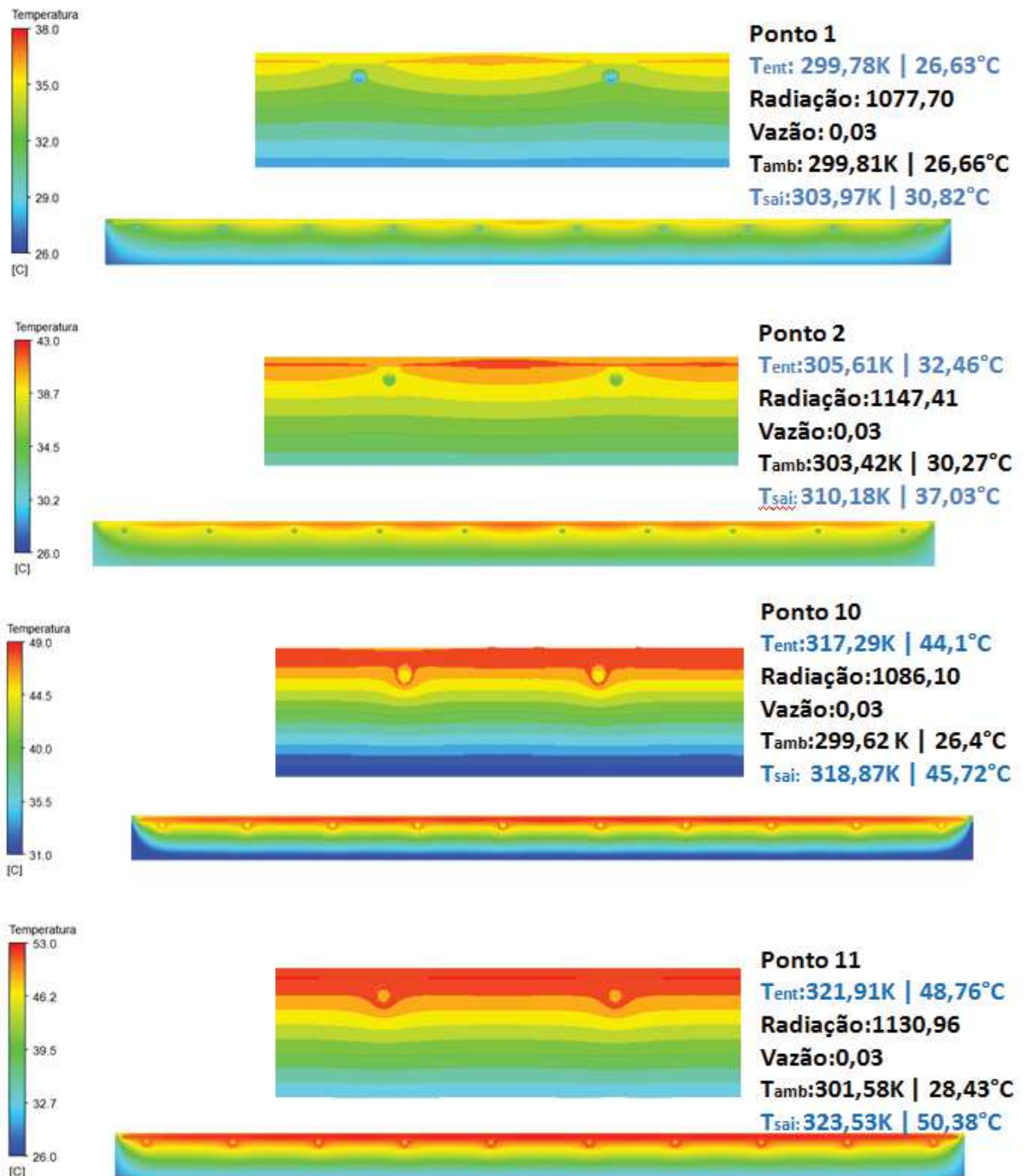


Figura 4.1 – Perfil de temperatura na seção transversal em alguns pontos no topo do PVT. Fonte: Autora

Na Figura 4.2 os mesmos pontos apresentados acima são mostrados em vista superior para apresentação do perfil de temperatura na superfície da placa. É possível observar que as laterais dos coletores apresentam temperatura menor que as regiões centrais, o que evidencia a perda de calor por convecção em ambos os lados da placa.

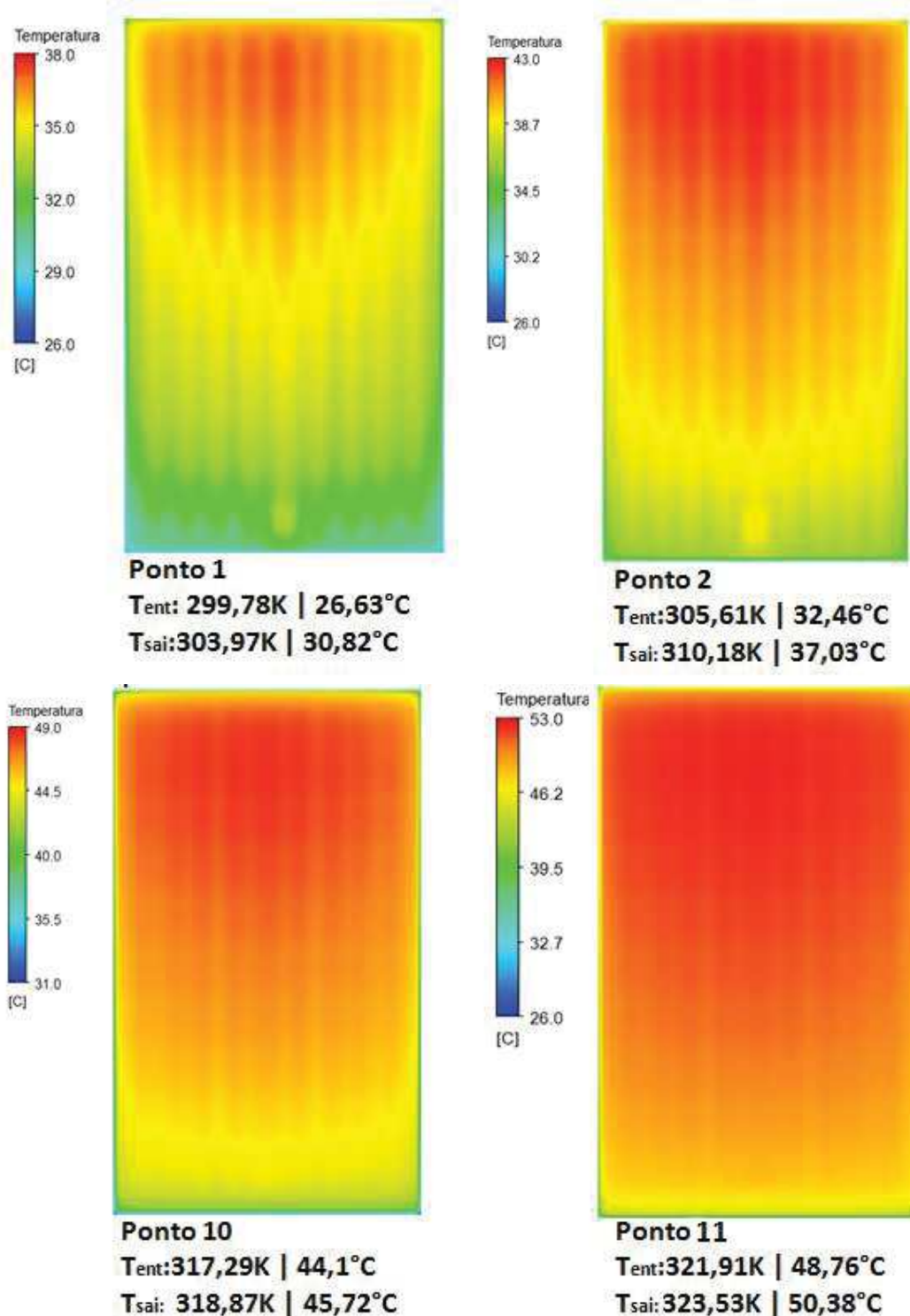


Figura 4.2 – Perfil de temperatura do coletor PVT em alguns pontos.

Fonte: Autora.



Nas imagens apresentadas é possível perceber a diferença de temperatura entre o fluido e os componentes da placa. A temperatura da placa absorvedora é superior a temperatura do fluido, alcançando valores superiores a 5 graus. Desta forma, percebe-se que parte do calor absorvido não é aproveitado, sendo perdido por meio de convecção ou radiação. Tal fato é discutido por Duffie e Beckmann (2008), demonstrando que estas diferenças podem ser inerentes as condições operacionais e características do coletor.

Avaliando os resultados experimentais e simulados é possível observar grande proximidade nos valores de temperatura de saída encontrados, mas diferenças maiores nos valores de eficiência. A variação da eficiência térmica, vista no Gráfico 4.2, é dada em função da temperatura ambiente, da temperatura de entrada da água e da radiação solar. O modelo em EES apresenta maiores valores na eficiência, entretanto vale lembrar que trata-se de um modelo integral, tendo uma abrangência menor dos dados e características do ensaio. Percebe-se que, a diferença entre as eficiências são maiores entre o modelo EES e o ensaio experimental. Já as simulações em CFX, que permitem uma proximidade maior com as condições da realidade do ensaio, teve valores de eficiência mais próximos aos obtidos experimentalmente. Tais relações também são plotadas no Gráfico 4.2.

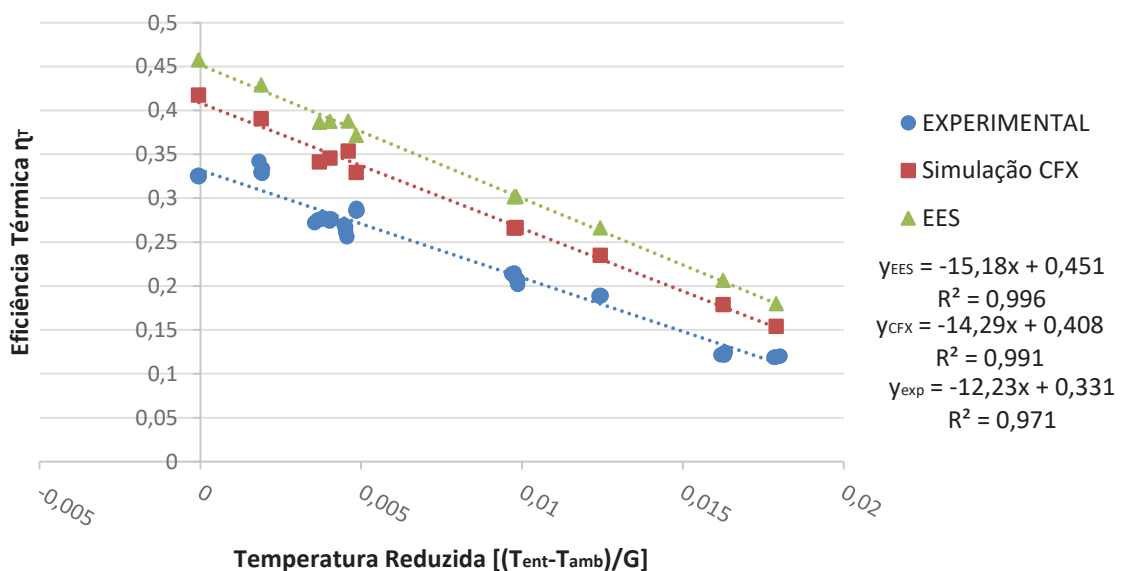


Gráfico 4.2: Eficiência Térmica do PVT em função da Temperatura reduzida. Fonte: Autora.

Mesmo apresentando diferenças nos valores de eficiência, percebe-se que as três situações demonstram proporcionalidade em sua linha de tendência. Logo, afirma-se que o modelo numérico proposto é válido, pois apresenta coeficiente de correção satisfatório com os

dados obtidos experimentalmente. O coeficiente de correlação entre os dados do modelo simulado no Ansys e os dados experimentais é  $r = 0,984$ , já o coeficiente de correlação entre os dados do EES e os experimentais é igual a  $r = 0,986$ . Contudo, hipóteses sobre as diferenças encontradas devem ser levantadas. Intempéries, precisão da instrumentação utilizada e a calibração dos equipamentos podem ser os motivadores das variações encontradas.

## 5 CONCLUSÕES

Com bases nos resultados encontrados conclui-se que quanto menor a temperatura do fluido, neste estudo a água, maior eficiência térmica obtida. De modo geral, o melhor desempenho encontrado do PVT, se deu quando a temperatura da água na entrada foi inferior a 32°C. Com o fluido a temperaturas superiores a 40°C, há uma queda significativa em sua eficiência, onde a temperatura de saída da água apresenta valores próximos a temperatura de entrada. Logo, percebe-se o quanto a temperatura do fluido de trabalho influencia na eficiência do coletor solar PVT. Em cálculos para dimensionamento de reservatórios, tal informação é importante a fim de retardar a estagnação da temperatura da água dentro do reservatório.

Experimentalmente o coletor PVT obteve as maiores eficiências térmicas quando a água era inserida do sistema tinha 26 a 32°C alcançando aproximadamente 33% de eficiência. Já nas simulações, o software EES com resolução integral obteve 45% e a simulação numérica em CFX alcançou 41%, considerando a menor temperatura de entrada estudada. Embora possa não apresentar resultados muito precisos para uma análise quantitativa, o modelo apresentado é adequado para estudos qualitativos, para análise de diversas variáveis e condições de ensaio.

Na tentativa de justificar as diferenças obtidas, precisa-se levar em consideração as condições adversas durante ensaio experimental, uma vez que o teste realizado a céu aberto. Além disso, a precisão dos equipamentos utilizados podem ter influenciado as variações encontradas. A velocidade do vento, por exemplo, pode ser um valor de influência significativo, uma vez que no EES o valor é fixo, no ANSYS® o valor medido é alocado de acordo com os pontos da placa, e no experimental nos deparamos com correntes de ar repentinas.

Em comparação a um coletor solar de placa plana, o PVT apresenta eficiência inferior devido a substituição da cobertura de vidro pelo painel fotovoltaico, uma vez que o painel fotovoltaico apresenta maior refletividade. Contudo, essa troca permite a geração de energia elétrica, considerada a energia mais nobre pelo mercado energético. Outro ponto positivo, é o resfriamento que a água promove no painel fotovoltaico, aumentando a sua eficiência e consequentemente a produção de eletricidade. Entretanto, para a geração de uma quantidade razoável que energia elétrica, mais painéis fotovoltaicos devem ser associados ao sistema, o que mostra que o aquecimento da água é o melhor produto de um coletor solar tipo PVT.

Deste modo, deve ser avaliado a eficiência total obtida com o sistema térmico e fotovoltaico para justificar a sua construção.

O sistema PVT subsidia a obtenção de energia térmica e elétrica em um mesmo dispositivo, sendo uma alternativa viável em locais com pouco espaço, limitações estruturais ou quando se busca simetria estética. Além disso, mesmo gerando diminuição na eficiência térmica, tem-se a possibilidade da geração de receita com uma maior produção de eletricidade. Tal lucro é promovido ao conectar o sistema à rede fornecendo energia à concessionária e ao economizar energia elétrica ao direcionar a água aquecida no sistema para os chuveiros.

Por fim, outro ponto relevante que deve ser considerado é a proporcionalidade entre as simulações realizadas e a análise experimental, dado através do coeficiente de correlação encontrado. Assim, ressalta-se a importância da realização das simulações numéricas para identificação de pontos de melhorias nos dispositivos desejados, além de possibilitar a simulação com diversas variáveis e conceitos sem a necessidade de se contruir um modelo. Na simulação numérica, utilizando o método de volumes finitos, como realizado neste trabalho, pode-se discretizar um modelo para aplicar as equações governantes em cada domínio de acordo com suas características, como realizado no coletor PVT. Assim, pode-se prever a distribuição de propriedades, como a temperatura, ao longo de todo o coletor, fato que modelos matemáticos integrais não permitem.

### **5.1 Sugestões de trabalhos futuros**

A fim de aperfeiçoar o presente estudo, sugere-se as seguintes ações para trabalhos futuros:

- Realizar teste em simulador solar, onde se possa controlar totalmente a velocidade do vento.
- Realizar os testes com as mesmas temperaturas de entrada, avaliando os parâmetros necessários para análise da eficiência elétrica do sistema e associar a eficiência térmica obtida neste trabalho.
- Traçar metodologia para definição de eficiência global do coletor solar PVT.
- Simular o sistema PVT em regime não permanente para definição das eficiências elétricas e térmicas.
- Realizar o presente estudo com coletor solar PVT com sistema hidráulico tipo Serpentina.

## 6 REFERÊNCIAS

ABINEE, Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. São Paulo: LCA/PSR, 2012.

ABRASOL, Associação Brasileira de Energia Solar Térmica. **Estatuto da ABRASOL**. São Paulo: Abrasol, 2016. Disponível em: < <https://drive.google.com/file/d/0B3Fe532oqZQxZzdfSWdMV3p5WE0/view> > Acesso em 10 de junho de 2017.

AUBRECHT, Gordon J. **Energy: physical, environmental, and social impact**. 3ed. Ohio: Pearson Addison Wesley, 2006

BASSO, Luiz Henrique. **Utilização da energia solar em sistemas de aquecimento de água residencial**. Cascavél: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2008. Disponível em: < <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp066999.pdf> > Acesso realizado em 13 de janeiro de 2017.

BRAGA, Renata Pereira. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 19 de abril de 2012.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Informativo Luz para Todos nº35**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015.

BRASIL. **Decreto 4.873 de 11 de novembro de 2003**. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - "LUZ PARA TODOS" e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 12 de novembro de 2003.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Portaria nº 238 de 21 de julho de 2009**. Diário Oficial da União, seção 1, nº138, de 22 de julho de 2009. Ministério do Meio Ambiente, 2009.

CALISE, Francesco; PALOMBO, Adolfo; VANOLI, Laura. **A finite-volume model of a parabolic trough photovoltaic/thermal collector: Energetic and exergetic analyses**. Naples: Energy/Elsevier, 2012.

CASTRO, Angelo K.; et. al.. **Sistemas de Propulsão Automóvel: Motor Eléctrico e Sistemas Alternativos de Propulsão Automóvel**. Porto: Universidade do Porto, 2009.

CASTRO, Nivalde J; DANTAS, Guilherme; et. al.. **Eficiência energética na iluminação pública e o plano nacional de eficiência energética**. Rio de Janeiro: UFRJ/GESEL, 2011.

CELIK, I.B.; GHIA, U.; ROACHE, P.J.; FREITAS, C.J.; COLEMAN, H.; RAAD, P.E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, p. 078001-1 - 078001-4, 2008.

CHOW, T.T. **Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model**. Hong Kong: Solar Energy, 2003.

CHOW, T.T. **A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology**. Hong Kong: Applied Energy, 2010.

CHOW. T.T; PEI, G; FONG, K.F; LIN, Z; CHAN, A.L.S; JI, J. **Energy and exergy analysis of photovoltaic–thermal collector with and without glass cover**. Applied Energy, 2010.

CHOW, T.T.; TIWARI, G. N. e MENEZO C.; **Hybrid Solar: A Review on Photovoltaic and Thermal Power Integration**. International Journal of Photoenergy, 2012. Disponível em: < <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2012/307287/> > Acesso realizado em 03 de março de 2017.

CORGOZINHO, Ivan M. **Modelagem e simulação computacional de um coletor solar de placa plana utilizando o método de volumes finitos**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: CEFETMG, 2016.

CUI, W.Z.; YU, S.Q.; LI, L.J.. **Dynamic characteristics analysis of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar energy system**. Journal of Engineering Thermophysics, 2009.

CUNHA, José Luiz. P. A.. **Eletrificação de edificações rurais isoladas utilizando energia solar fotovoltaica**. Trabalho de especialização em Fontes Alternativas de Energia. Lavras: Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, 2006.

DAGHIGH, R; RUSLAN, M.H.; ZAHARIM, A.; SOPIAN, K.. **Effect of Packing Factor on the Performance of PV/T Water Heater**. Malaysia: Solar Energy Research Institute/Universiti Kebangsaan Malaysia, 2011.

DELTA T. **User manual for the sunshine pyranometer type SPN1**. Cambridge: Delta T Devices Ltd, 2016. Disponível em: < <http://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/SPN1-UM-4.0.pdf> > Acesso em 01 de abril de 2017.

DOLABELLA, Ana Lucia L.B.; ASSAD, Eduardo D. **Plano Nacional: estratégia para disseminar a tecnologia no Brasil**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

DUFFIE J. A. e BECKMAN W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Fourth Edition. John Wiley & Sons Inc., 2013.

DUPEYRAT, P.; MÉNÉZO, C.; FORTUINC, S. **Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system.** Energy and Buildings 68, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balço Energético Nacional 2016 ano base 2015.** Rio de Janeiro: Ministério Minas e Energia, 2016.

FANG, Xiande; LI, Dingkun. **Solar photovoltaic and thermal technology and applications in China.** Nanjing: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.

FARIA, Lucas P.P. **Modelagem matemática e avaliação experimental da não uniformidade do escoamento da água em coletores solares planos.** Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: PUCMinas, 2007.

FERREIRA, André G.; et al. **Otimização da eficiência elétrica de módulos fotovoltaicos através do acoplamento de trocadores de calor tipo tubo-aleta.** Sauipe: VIII CITENEL, 2015.

FERREIRA, Ricardo. **Painéis Fotovoltaicos.** Universidade do Porto, 2008. Disponível em: < [http://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro\\_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html](http://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html) > Acesso em: 10 de junho de 2017.

FINOCCHIO, Marco Antonio F. **Curso de energia solar fotovoltaica.** Cornélio Procópio: Ministério da Educação/Universidade Federal do Paraná, 2006.

FLORSCHUETZ, LW. **Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors.** Solar Energy, 1979.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, ISE. **Photovoltaics Report.** Freiburg: ISE, 2016. Disponível em: < <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> > Acesso em 15 de março de 2017.

FUJII, T., IMURA, H. **Natural convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination.** , Volume 15, Issue 4, April 1972, Pages 755-764. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972.

GOLDEMBERG, José. LUCON, Oswaldo. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento.** 3 ed. rev. ampl. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

HASAN, M. Arif; SUMATHY, K. **Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review.** Fargo: North Dakota State University/ Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.

HE, W.; CHOW, T.T.; JI, J.; LU, J.; PEI, G.; CHAN, I. **Hybrid Photovoltaic and Thermal Solar-Collector Designed for Natural Circulation of Water.** Applied Energy, 2006.

HENDRIE, S.D.; RAGHUARAMAN, P. **Comparison of theory and experimental for photovoltaic thermal performance.** San Diego: 14th IEEE Photovoltaic Specialist conference, 1980.

HENDRIE, S.D. **Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors**. Atlanta: ISES Solar World Congress Atlanta, USA, 1979.

HINRICHS, Roger A.; et al. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

HOTTEL, H.C.; WHILLIER, A. **Evaluation of flat-plate solar collector performance**. Tucson: University of Arizona Press, 1958.

HUANG, B.J.; LIN, T.H.; HUNG, W.C.; SUN, F.S. **Solar photo-voltaic/thermal cogeneration collector**. Jerusalem: ISES SolarWorld Congress, 1999.

IBRAHIM, Adnan; OTHMAN, Mohd Yusof; RUSLAN, Mohd Hafidz; MAT, Sohif; SOPIAN, Kamaruzzaman. **Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors**. Malaysia: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 7 ed. Editora LTC, 2014.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas. **Descrição CBERS 3 e 4**. 2011. Disponível em: < [http://www.cbbers.inpe.br/sobre\\_satelite/descricao\\_cbbers3e4.php](http://www.cbbers.inpe.br/sobre_satelite/descricao_cbbers3e4.php)> Acesso em 15 de março de 2017.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Renewable capacity statistics 2016**. IRENA: Abu Dhabi, 2016.

JAMAR, A; MAJID, Z.A.A.; AZMI, W.H.; NORHAFANA, M.; RAZAK, A.A. **A review of water heating system for solar energy applications**. Malaysia: International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar thermal collectors and applications**. Cyprus: Progress in Energy and Combustion Science 30, 2004.

KANNAN, Nadarajah; VAKEESAN, Divagar. **Solar energy for future world: A review**. Sri Lanka: Elsevier, 2016.

KARL, H. **Photovoltaischer Hybridkolektor**. Munchen: Fourth international congress laser, 79 opto-electronics, 1979.

KERN, E; RUSSEL, M. **Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems**. Washington, D.C.: Photovoltaic Specialists Conference, 1978.

KOECH, R. K.; ONDIEKI, H.O; TONUI, J.K.; ROTICH, S.K. **Performance Analysis of a PV/T Air system based on heat transfer perspective**. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, 2012.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

MATHIJSSEN, Django. **Redefining the motor car**. Reinforced Plastics/Elsevier Ltda. Volume 60, May–June 2016, Pages 154–159.



MURTA, Aurélio Lamare S.. **Energia: O vício da civilização, crise energética e alternativas sustentáveis**. Rio de Janeiro: Garamond, 2011.

NAKATA, Y.; KOBE, T.; SHIBUYA, N.; MACHIDA, T.; TAKEMOTO, T.; TSUJI, T. **A 30kWp concentrating photovoltaic/thermal hybrid system application**. San Diego: IEEE PSC, 1982.

NIETERS, Andreas; KNAACK, Jan; RODRIGUES, Delcio. **Alemanha e outras experiências no uso da energia solar térmica**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

PALLA, Nansi; et. al. **Development of Multivalent PV-Thermal Collectors for Cooling, Heating and Generation of Electricity**. International Plea Conference. Ahmedabad: CEPT University, 2014.

PALZ, Wolfgang. **Energia Solar e fontes alternativas**. Curitiba: Hemus, 2002.

PARANÁ, Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Noções iniciais sobre o aquecimento solar**. Curitiba: Fórum Paranaense de Mudanças Climáticas. Disponível em: < <http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/manualiniciais.pdf> > Acesso em 02 de fevereiro de 2017.

PEREIRA DE SÁ, Daniel Augusto. **Sistemas Fotovoltaicos para bombeamento de água**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010.

PEREIRA, Elizabeth M.D.; et al. **Aquecimento solar: panorama da evolução do Mercado**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

PEREIRA, Elizabeth M.D.; CARVALHO, Luciana P.; FANTINELLI, Jane T. **Balanco do Diagnóstico Nacional**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

PROCÓPIO, Othon L.; et al. **Análise do desempenho térmico e elétrico de um modulo fotovoltaico acoplado a um coletor solar plano**. Belo Horizonte: VI CBENS, 2016.

PROCÓPIO, Othon. **Modelo Analítico para Avaliação do Desempenho Térmico e Elétrico de Módulos Fotovoltaicos Acoplados a Coletores Solares de Placa Plana Tipo Tubo-aleta e Serpentina**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: CEFETMG, 2016.

PSE, Projects in solar energy. **Tracker for Testing CPV Module Systems**. Freiburg: PSE AG, 2017. Disponível em: < <http://www.pse.de/test-equipment/photovoltaic-modules/tracker/cpv-module-systems/> > Acesso em 01 de abril de 2017.

REIS, Lineu B., et al.. **Energia, recursos naturais e a prática de desenvolvimento sustentável**. Barueri: Editora Manole, 2009.

REJEB, Oussama; DHAOU, Houcine; JEMNI, Abdelmajid. **A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector**. Monastir: Renewable Energy, 2015.

REN 21. **Renewables 2016 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2016. Disponível em: < [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_Full\\_Report.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf) > Acesso em 18 de fevereiro de 2017.

RIFFAT, Saffa B.; CUCE, Erdem. **A review on hybrid photovoltaic/thermal collectors and systems**. Oxford: Low-Carbon Tech/Oxford Academic, 2011.

RODRIGUES, D. SwisscamBrasil. Revista da Câmara de Comércio Suiço-Brasileiro. Número 42, setembro de 2005.

SADAMOTO, K.; SUPANICH, P.; NUALBOONRUENG, T.; SICHANUGRIST, P. **a-Si hybrid solar collector**. Osaka: Third WCPEC, 2003.

SANTOS, André A. C. D. **Modelagem numérica com validação experimental de escoamento através do bocal inferior de um elemento combustível nuclear**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, André A. C. D. **Investigação numérica e experimental do escoamento de água em feixe de varetas representativo de elementos combustíveis nucleares de reatores do tipo PWR**. Tese de doutorado. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

TESTO. **Anemômetro de molinete 416 Dados técnicos e acessórios**. Ílhavo, Portugal, 2012. Disponível em < <https://logismarketpt.cdnwm.com/ip/testo-portugal-anemometros-catalogo-anemometro-testo-416-815816.pdf> > Acesso em 01 de abril de 2017.

TOLMASQUIM, Maurício Tiommo. **Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2004.

TOLMASQUIM, Maurício Tiommo. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TREBERSPURG, Martin; DJALILI, Mariam; STALLER, Heimo. **New technical solutions for energy efficient buildings -State of the Art Report Photovoltaic/Thermal Systems (PV/T)**. London: SCI, 2011.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. **Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems**. Solar Energy, 2007.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Yiannis. **Advanced solar collectors**. Prague: Solnet Course, 2009.

TYAGI, V.V.; KAUSHIKA, S.C.; TYAGI, S.K. **Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology**. New Delhi: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.

VASCONCELLOS, Luiz E.M.; LIMBERGER, Marcos A.C. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobras Procel e Parceiros**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

VEISSID, Nelson; BARUEL, Mario F.. **Energia Solar e Sua Aplicação em Satélites**. São José dos Campos: SindCT, 2012.

VERSTEEG, H. K. E MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics –The finite volume method**. Prentice Hall. Second Edition, 2007.

WARME. **Série Wtuta 5800 Transmissor de umidade relativa e temperatura**. Itaquaquecetuba: Warme, 2012. Disponível em < <http://www.warme.com.br/manuais/WTUTA-5800.pdf> > Acesso em 01 de abril de 2017.

WOLF, Martin. **Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences**. Philadelphia: Department of Electrical Engineering and Science/ University of Pennsylvania, 1974. Disponível em: < [http://ac-els-cdn-com.ez27.periodicos.capes.gov.br/0013748076900188/1-s2.0-0013748076900188-main.pdf?\\_tid=b2a6dd9a-284a-11e7-ac45-00000aacb35d&acdnat=1492968874\\_b48aa7699742286dd6582a69791a1ce1](http://ac-els-cdn-com.ez27.periodicos.capes.gov.br/0013748076900188/1-s2.0-0013748076900188-main.pdf?_tid=b2a6dd9a-284a-11e7-ac45-00000aacb35d&acdnat=1492968874_b48aa7699742286dd6582a69791a1ce1) > Acesso em 05 de janeiro de 2017.

ZONDAG, H.A. **Flat-plate PV-Thermal Collectors and Systems: A Review**. The Netherlands: Science Direct, 2005.

ZONDAG, H.A.; VRIES, D.W.; van HELDEN, W.G.J.; van ZOLINGEN, R.J.C.; van STEENHOVEN, A.A. **The yield of different combined PV-Thermal collector designs**. The Netherlands: Solar Energy, 2003.

## 7 APÊNDICE

### Apêndice 7.1 – Equações completas simuladas pelo EES

Procedure **nusselt**<sub>tubos;verticais</sub> (Re<sub>wa</sub>; fa; Pr<sub>wa</sub>; Nu<sub>4</sub>)

If ( Re<sub>wa</sub> >= 3000 ) Then

$$Nu_4 := \frac{\frac{fa}{8} \cdot (Re_{wa} - 1000) \cdot Pr_{wa}}{1 + 12,7 \cdot \left[ \frac{fa}{8} \right]^{(1/2)} \cdot (Pr_{wa}^{(2/3)} - 1)}$$

Equação de Gnielinski , Incropera 6ª Ed, pag 324,

x := 1

Else

If ( Re<sub>wa</sub> < 3000 ) Then

Nu<sub>4</sub> := 4,36 Nusselt escoamento laminar, e fluxo constante, retirado do Incropera, 6ª Ed, pagina 333

x := 2

Else

**Endif**

End **nusselt**<sub>tubos;verticais</sub>

Procedure **nusselt**<sub>natural;back</sub> (T<sub>costas</sub>; Ta; Ra<sub>costas;Fuji</sub>; Ra<sub>costas</sub>; Pr<sub>2</sub>; Nu<sub>2</sub>)

If ( T<sub>costas</sub> >= Ta ) Then

If ( ( Ra<sub>costas;Fuji</sub> > 10<sup>5</sup> ) and ( Ra<sub>costas;Fuji</sub> < 10<sup>11</sup> ) ) Then

$$Nu_2 := 0,56 \cdot Ra_{costas;Fuji}^{(1/4)}$$

Else

If ( Ra<sub>costas</sub> < 10<sup>9</sup> ) Then

$$Nu_2 := 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra_{costas}^{(1/4)}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr_2} \right)^{\left( \frac{9}{16} \right)} \right]^{(4/9)}}$$

Else

$$Nu_2 := \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{costas}^{(1/6)}}{\left( 1 + \left[ \frac{0,492}{Pr_2} \right]^{\left[ \frac{9}{16} \right]} \right)^{\left( \frac{8}{27} \right)}} \right]^2$$

**Endif**

**Endif**

Else

If ( ( Ra<sub>costas</sub> <= 2,2<sup>9</sup> ) and ( Ra<sub>costas</sub> > 2,2<sup>6</sup> ) ) Then

$$Nu_2 := 0,507 \cdot Ra_{costas}^{(1/4)}$$

Else

$$Nu_2 := 0,59 \cdot Ra_{costas}^{(1/4)}$$

Endif

**Endif**

End **nusselt**<sub>natural;back</sub>

Call **nusselt**<sub>natural;back</sub> ( T<sub>costas</sub> ; Ta ; Ra<sub>costas;Fujii</sub> ; Ra<sub>costas</sub> ; Pr<sub>2</sub> : Nu<sub>2</sub> )

Call **nusselt**<sub>tubos;verticais</sub> ( Re<sub>wa</sub> ; fa ; Pr<sub>wa</sub> : Nu<sub>4</sub> )

#### CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO COLETOR

$$A_c = L_h \cdot L_v$$

$$D_{man} = 0,022 \quad \text{Diâmetro do tubo manifold}$$

$$L_{tube} = L_v$$

$$L_v = 1,65 \quad \text{Altura do Coletor}$$

$$L_h = 0,99 \quad \text{Comprimento do coletor}$$

$$\delta_{isol;costas} = 0,047675 \quad \text{Espessura do isolante nas costas do coletor}$$

$$\delta_{isol;lat} = \frac{\delta_{isol;costas}}{2} \quad \text{Espessura da lateral do coletor}$$

$$D_{t,e} = 0,00952 \quad \text{Diâmetro externo dos tubos verticais do coletor}$$

$$D_{t,i} = 0,0081 \quad \text{Diâmetro interno dos tubos verticais}$$

$$n = 10 \quad \text{Número de tubos do coletor}$$

$$\delta_{PVT} = \delta_{aleta} + \delta_{isol;costas} + \delta_{pv} + \delta_2$$

$$\delta_{aleta} = 0,0006 \quad \text{Espessura da aleta do coletor}$$

$$\delta_{TG} = \frac{T_{fi} - T_a}{I}$$

#### PERDAS TÉRMICAS NO TOPO DO COLETOR

$$h_{topo} = h_w + h_{rad;cs}$$

$$\beta = 70 \cdot \pi / 180$$

inclinação do coletor

$$P_{atm} = 101325 \quad [\text{Pa}] \quad \text{Pressão atmosférica}$$

$$E_c = 0,9 \quad \text{emissividade da cobertura de vidro do módulo PV}$$

$$q = h_w \cdot (T_{pv2} - T_a) + h_{rad;cs} \cdot (T_{pv2} - T_s) \quad \text{Energia térmica perdida no topo do coletor}$$

coletor por convecção com o ar ambiente e radiação

$$h_{rad;cs} = 5,670E-08 \quad [\text{W/m}^2\text{-K}^4] \cdot E_c \cdot (T_{pv2}^2 + T_s^2) \cdot (T_{pv2} + T_s) \quad \text{Coeficiente de troca}$$

radiante entre a cobertura e o céu

$$T_s = T_a \quad \text{Temperatura do céu igual a temperatura ambiente}$$

$$h_w = 2,8 \text{ [W/m}^2\text{-K]} + 3 \text{ [W-s/m}^3\text{-K]} \cdot V_w \quad \text{retirada do artigo}$$

Advanced solar collectors SOLNET COURSE, Prague, 4-9 Feb 2009 pag 19

$$q = U_t \cdot (T_p - T_a) \quad \text{Troca de calor entre a célula do módulo PV e o ambiente}$$

$$q = \frac{T_{\text{cell}} - T_{\text{pv2}}}{R_{\text{vidro;eva}}}$$

$$\delta_{\text{vidro}} = 0,003 \quad \text{Espessura da camada de vidro sobre o PV}$$

$$k_{\text{vidro}} = 1,4 \quad \text{Condutividade do vidro sobre o PV}$$

$$\delta_{\text{eva}} = 0,0005 \quad \text{Espessura da camada de EVA sobre o PV}$$

$$k_{\text{eva}} = 0,35 \quad \text{Condutividade do EVA}$$

$$k_{\text{arc}} = 32 \quad \text{ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$\delta_{\text{arc}} = 1,0 \times 10^{-7} \quad \text{ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$\rho_{\text{arc}} = 2400 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$C_{\text{arc}} = 691 \text{ [J/kg-K]}$$

removido o arc, pois o Tcell já é a temperatura da superfície do arc. Dados do arc devem ser inseridos na perda pelas costas

$$R_{\text{vidro;eva}} = \frac{1}{\frac{k_{\text{eva}}}{\delta_{\text{eva}}} + \frac{k_{\text{vidro}}}{\delta_{\text{vidro}}}}$$

#### PERDAS TERMICAS PELAS COSTAS DO COLETOR

$$h_{\text{costas}} = h_{\text{conv;total;back}} + h_{\text{rad;back;sup}}$$

$$q_{\text{back}} = \frac{T_{\text{cell}} - T_p}{R_{\text{back}}} \quad \text{Fluxo de calor da da célula PV para a aleta}$$

$$R_{\text{back}} = R_{\text{eva}} + R_{\text{tedlar}} + R_{\text{glue}} + R_{\text{cell;total}} \quad \text{Resistência de condução de calor da célula PV para a aleta}$$

$$R_{\text{eva}} = \frac{\delta_{\text{eva2}}}{k_{\text{eva}}} \quad \text{Resistência de condução do eva nas costas do PV}$$

$$R_{\text{tedlar}} = \frac{\delta_{\text{tedlar}}}{k_{\text{tedlar}}} \quad \text{Resistência de condução do tedlar nas costas do PV}$$

$$R_{\text{glue}} = \frac{\delta_{\text{glue}}}{k_{\text{glue}}} \quad \text{Resistência de condução da cola de acoplamento do PV ao coletor térmico nas costas do PV}$$

$$R_{\text{cell;total}} = R_{\text{arc}} + R_{\text{cell}} + R_{\text{rear;contact}}$$

$$C_{\text{cell;total}} = \frac{\rho_{\text{arc}} \cdot \delta_{\text{arc}} \cdot C_{\text{arc}} + \rho_{\text{cell}} \cdot \delta_{\text{cell}} \cdot C_{\text{cell}} + \rho_{\text{rear;contact}} \cdot \delta_{\text{rear;contact}} \cdot C_{\text{rear;contact}}}{\rho_{\text{arc}} \cdot \delta_{\text{arc}} + \rho_{\text{cell}} \cdot \delta_{\text{cell}} + \rho_{\text{rear;contact}} \cdot \delta_{\text{rear;contact}}}$$

$$k_{\text{cell;total}} = \frac{0,0005}{R_{\text{cell;total}}} \quad \text{Condutividade da célula para espessura de 0,5 mm, conforme datasheet da célula, considerando } R_{\text{cell;total}}$$

derando  $R_{\text{cell;total}}$

$$\rho_{\text{cell;total}} = \frac{\rho_{\text{arc}} \cdot \delta_{\text{arc}} + \rho_{\text{cell}} \cdot \delta_{\text{cell}} + \rho_{\text{rear;contact}} \cdot \delta_{\text{rear;contact}}}{\delta_{\text{arc}} + \delta_{\text{cell}} + \delta_{\text{rear;contact}}}$$

$$R_{\text{arc}} = \frac{\delta_{\text{arc}}}{k_{\text{arc}}}$$

$$R_{\text{rear;contact}} = \frac{\delta_{\text{rear;contact}}}{k_{\text{rear;contact}}}$$

$$R_{\text{cell}} = \frac{\delta_{\text{cell}}}{k_{\text{cell}}}$$

$$R_{\text{aleta}} = \frac{\delta_{\text{aleta}}}{k_{\text{aleta}}} \quad \text{Resistência de condução de calor da placa absorvedora. NÃO É UTILIZADO NAS CONTAS}$$

$$k_{\text{rear;contact}} = 237 \quad \text{condutividade da proteção plástica do FV ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$k_{\text{cell}} = 130 \quad \text{NOTTON (2005), direto do fabricante PHOTOWATT}$$

$$\delta_{\text{cell}} = 0,0002 \quad \text{NOTTON (2005), direto do fabricante PHOTOWATT}$$

$$\rho_{\text{cell}} = 2330 \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$C_{\text{cell}} = 677 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$\delta_{\text{eva2}} = 0,0005 \quad \text{condutividade do EVA ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$\delta_{\text{tedlar}} = 0,0001 \quad \text{condutividade do Tedlar ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$\delta_{\text{rear;contact}} = 0,00001 \quad \text{ver Armstrong, S; Hurley, W.G (2010)}$$

$$\rho_{\text{rear;contact}} = 2700 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$C_{\text{rear;contact}} = 900 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$\delta_{\text{glue}} = 0,0001 \quad \text{Espessura da camada de cola nas costas do PV}$$

$$k_{\text{tedlar}} = 0,2 \quad \text{Condutividade do Tedlar}$$

$$k_{\text{glue}} = 0,85 \quad \text{Condutividade da cola que une o PV a placa plana de cobre do coletor térmico}$$

$$\delta_{\text{pv}} = \delta_{\text{eva2}} + \delta_{\text{tedlar}} + \delta_{\text{glue}} + \delta_{\text{eva}} + \delta_{\text{vidro}} + \delta_{\text{cell}} + \delta_{\text{arc}}$$

$$Re = V_w \cdot \frac{L_h}{\nu} \quad \text{Número de Reynolds, para o escoamento de ar nas costas do coletor, baseado na velocidade do vento } V_w \text{ incidindo lateralmente}$$

$$x_c = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\nu_2}{V_2} \quad \text{Comprimento crítico da placa nas costas do coletor, considerando incidência}$$

lateral de vento

$$Re_{xc} = 5 \cdot 10^5 \quad \text{Número de Reynolds crítico para escoamento em placa plana}$$

$$\nu_2 = \frac{\mu_2}{\rho_2} \quad \text{viscosidade cinemática do ar escoando atrás da placa}$$

$$Pr_2 = Pr(\text{Air}; T = T_{m_{\text{costas}}}) \quad \text{Número de Prandtl para o ar nas costas do coletor}$$

$$\mu_2 = \text{Visc}(\text{Air}; T = T_{m_{\text{costas}}}) \quad \text{viscosidade do filme de ar sobre as costas do PVT}$$

$$T_{m_{\text{costas}}} = \frac{T_{\text{costas}} + T_a}{2} \quad \text{Temperatura média das costas do coletor}$$

$$\rho_2 = \rho(\text{Air}; T = T_{m_{\text{costas}}}; P = P_{\text{atm}}) \quad \text{densidade do ar nas costas do coletor}$$

$$q_{\text{back}} = \frac{k_{\text{isol;costas}}}{\delta_{\text{isol;costas}}} \cdot (T_p - T_{\text{back1}}) \quad \text{Calor por condução da aleta para costas do coletor}$$

$$k_{\text{isol;costas}} = 0,038 \quad \text{Coeficiente de condução térmica da lã de vidro, Incropera 6ª Ed. Pag 595, tabela A.3}$$

$$q_{\text{back}} = \frac{k_2}{\delta_2} \cdot (T_{\text{back1}} - T_{\text{costas}}) \quad \text{Calor por condução através da placa metálica utilizada para proteger}$$

as costas do coletor

$$k_2 = 237 \quad \text{Coeficiente de condução térmica da lâmina de alumínio utilizada pra fechar as costas do coletor, Incropera 6ª Ed. Pag 589, tabela A.1}$$

$$\delta_2 = 0,0006 \quad \text{Espessura da chapa de alumínio colocada nas costas do coletor para proteção do isolamento e vedação}$$

$$q_{\text{back}} = h_{\text{conv;total;back}} \cdot (T_{\text{costas}} - T_a) + h_{\text{rad;back;sup}} \cdot (T_{\text{costas}} - T_{\text{sup}}) \quad \text{Calor perdido nas costas do coletor com troca radiante entre as costas do coletor, o céu e o solo}$$

$$h_{\text{conv;total;back}} = (h_{\text{conv;back;forçado}}^3 + h_{\text{conv;back}}^3)^{(1/3)} \quad \text{Coeficiente convectivo total nas costas do coletor, considerando escoamento natural e forçado}$$

$$h_{\text{rad;back;sup}} = 5,670E-08 \quad [W/m^2 \cdot K^4] \cdot E_{\text{back}} \cdot ((T_{\text{costas}}^2 + T_{\text{sup}}^2) \cdot (T_{\text{costas}} + T_{\text{sup}})) \quad \text{coeficiente de troca de calor radiante entre as costas do coletor e a superfície abaixo}$$

$$h_{\text{rad;back;ceu}} = 5,670E-08 \quad [W/m^2 \cdot K^4] \cdot E_{\text{back}} \cdot (T_{\text{costas}}^4 + T_s^4) \cdot (T_{\text{costas}} + T_s) \quad \text{coeficiente de troca radiante entre as costas do coletor e o céu}$$

$$h_{\text{conv;back}} = Nu_2 \cdot \frac{ka_2}{L_v} \quad \text{Coeficiente convectivo natural da troca de calor nas costas do coletor}$$

$$ka_2 = k(\text{Air}; T = T_{m_{\text{costas}}}) \quad \text{Condutividade do ar nas costas do coletor}$$

$$Ra_{\text{costas}} = \frac{9,807 \quad [m/s^2] \cdot \cos(\beta) \cdot [|T_{\text{costas}} - T_a|] \cdot L_v^3}{T_{m_{\text{costas}}} \cdot \alpha_2 \cdot \nu_2} \quad \text{numero de Rayleigh para o ar escoando}$$



nas costas do coletor

$$zz = |T_{\text{costas}} - T_a|$$

$$z = \cos(\beta)$$

$C_{p2} = C_p(\text{Air}; T = T_{m_{\text{costas}}})$  Calor específico do ar escoando nas costas do coletor

$$\alpha_2 = \frac{k_{a2}}{\rho_2 \cdot C_{p2}} \quad \text{Difusidade térmica do ar nas costas do coletor}$$

$E_{\text{back}} = 0,8$  Emissividade da cobertura das costas do coletor, Incropera 6ª ed, pag 613, tabela A.11

$T_{\text{sup}} = T_a$  Temperatura da superfície atrás dos coletores considerada igual a do ambiente para simplificação

$h_{\text{conv;back;forçado}} = 0 \quad k_{a2} \cdot N_{u2,\text{forçado}} / L_h$ . Coeficiente convectivo em escoamento laminar forçado nas costas do coletor, com incidência de vento lateral. Tornou-se zero pois nas costas não bate o vento do ventilador

$q_{\text{back}} = U_b \cdot (T_p - T_a)$  Calor perdido pelas costas do coletor considerando um coeficiente de perdas

térmicas das costas  $U_b$

### PERDAS TÉRMICAS PELAS LATERAIS DO COLETOR

$$U_e = \frac{k_{\text{isol;lat}}}{\delta_{\text{isol;lat}}} \cdot \frac{A_{\text{lat}}}{A_c} \quad \text{coeficiente de perdas térmicas nas laterais do coletor}$$

$k_{\text{isol;lat}} = k_{\text{isol;costas}}$  Espessura do isolante na lateral do coletor

$$A_{\text{lat}} = 2 \cdot L_h \cdot \delta_{PVT} + 2 \cdot L_v \cdot \delta_{PVT}$$

$U_L = U_t + U_e + U_b$  Coeficientes de perdas globais no coletor

$q_{\text{loss}} = U_L \cdot (T_p - T_a)$  Perda total de calor na lateral do coletor

$q_{\text{lat}} = U_e \cdot (T_p - T_a)$  Perda de calor pela lateral do coletor

$$q_{\text{lat}} = \frac{k_{\text{isol;lat}}}{\delta_{\text{isol;lat}}} \cdot (T_p - T_{\text{lateral}})$$

$$q_{\text{lat}} = h_{\text{lateral}} \cdot (T_{\text{lateral}} - T_a)$$

### CALOR CONDUZIDO DAS CÉLULAS PARA OS TUBOS

$$W = \frac{L_h}{n} \quad \text{Distância entre os tubos do coletor}$$

$$F = \frac{\tanh \left[ m \cdot \left( \frac{W - D_{t,e}}{2} \right) \right]}{m \cdot \left[ \frac{W - D_{t,e}}{2} \right]} \quad \text{Eficiência da aleta do coletor}$$

$$m = \left[ \frac{U_L}{\delta_{aleta} \cdot K_{aleta}} \right]^{0,5}$$

$$K_{aleta} = 401 \quad \text{Coeficiente de condução da aleta do coletor}$$

$$F! = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \cdot \left[ \frac{1}{U_L \cdot (D_{t,e} + (W - D_{t,e}) \cdot F)} + \frac{1}{h_{conv,f} \cdot 3,142 \cdot D_{t,i}} + \frac{1}{C_b} \right]} \quad \text{Fator}$$

de eficiência do coletor

$$h_{conv,f} = k_{wa} \cdot \frac{Nu_4}{D_{t,i}} \quad \text{Coeficiente de transferência de calor do tubo para o fluido de trabalho}$$

$k_{wa} = k$  ( water ; T = T<sub>fm</sub> ; P = P<sub>atm</sub> ) Condutividade da água baseado na temperatura média de entrada e saída T<sub>fi</sub> e T<sub>fo</sub>

$$Pr_{wa} = Pr$$
 ( water ; T = T<sub>fm</sub> ; P = P<sub>atm</sub> ) Número de Prandtl, para água escoando

dentro de um tubo verticais do coletor

$$Re_{wa} = \frac{\rho_{wa} \cdot V_{wa} \cdot D_{t,i}}{\mu_{wa}} \quad \text{Número de Reynolds para escoamento de água dentro}$$

dos tubos verticais dos coletores

$$\rho_{wa} = \rho$$
 ( water ; T = T<sub>fm</sub> ; P = P<sub>atm</sub> ) Densidade do fluido escoando dentro

dos tubos verticais

$$V_{wa} = \frac{4 \cdot \frac{\dot{m}}{n}}{\rho_{wa} \cdot 3,142 \cdot D_{t,i}^2} \quad \text{Velocidade do escoamento de água nos tubos verticais,}$$

proporcional ao número de tubos n

$$\mu_{wa} = \text{Visc}$$
 ( water ; T = T<sub>fm</sub> ; P = P<sub>atm</sub> ) Viscosidade da água dentro dos tubos dos coletores

$$fa^{-0,5} = -2 \cdot \frac{\ln \left[ \frac{e}{3,7 \cdot D_{t,i}} + \frac{2,51}{Re_{wa} \cdot fa^{0,5}} \right]}{\ln(10)} \quad \text{Equação para fator de atrito em escoamento interno}$$

$$e = 0,001 \quad \text{rugosidade do estimada para o tubo de cobre}$$

$$K_{tube} = 401 \quad \text{Coeficiente de condução térmica do cobre puro, segundo Incropera 6ª Edição, pag 589}$$

$$C_b = 5000 \quad \text{Condudância do material utilizado na solda entre tubo e aleta}$$

### VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO FLUIDO AO ENTRAR ATÉ SAIR DO COLETOR

$$\frac{T_{fo} - T_a - \frac{S_{ef}}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S_{ef}}{U_L}} = \exp \left[ \frac{-U_L \cdot A_c \cdot F_I}{m \cdot C_{pw}} \right]$$

$C_{pw} = C_p$  ( water ;  $T = T_{fm}$  ;  $P = P_{atm}$  ) Calor específico da água

### FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR E FATOR DE FLUXO

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_{pw}}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{-A_c \cdot U_L \cdot F_I}{m \cdot C_{pw}} \right) \right] \quad \text{Fator remoção de calor}$$

$$F_{II} = \frac{m \cdot C_{pw}}{A_c \cdot U_L \cdot F_I} \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{-A_c \cdot U_L \cdot F_I}{m \cdot C_{pw}} \right) \right] \quad \text{Fator fluxo , que é uma relação entre}$$

o fator de remoção de calor do coletor e e fator de eficiência do coletor

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{\frac{Q_u}{A_c}}{F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_{II})$$

$$Q_u = A_c \cdot (S_{ef} - U_L \cdot (T_p - T_a))$$

$$T_p = T_{fi} + \frac{\frac{Q_u}{A_c}}{F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_R) \quad \text{Temperatura média da placa de cobre}$$

$$S_{ef} = I \cdot \tau_{\alpha,eff}$$

Equações relativas ao desempenho elétrico do PVT

$\tau_{\alpha,eff} = \tau_{\alpha} - \eta_{e,l} \cdot \tau_{pv}$  Fator de transmissividade-absortividade para a absorção de calor pelo módulo fotovoltaico

$T_{ref} = 298,15$  Temperatura de referencia da STC que é 25°C

$TC = 0,0042$  coeficiente de variação da potência em função da temperatura para potência do módulo

$\tau_{\alpha} = 0,78$  Transmissividade-absortividade do módulo PV

$\tau_{pv} = 1$  Transmissividade do coletor PVT sem nenhuma cobertura de vidro

$$P_{FV} = P_{FV;0} \cdot \frac{I}{I_{ref}} \cdot (1 - TC \cdot (T_{cell} - T_{ref})) \quad \text{Martin,1998; Geraud Multon; Ahmed,2002}$$

$P_{FV;0} = 245$  [-W] Potência do módulo na STC

$I_{ref} = 1000$  [-W/m<sup>2</sup>] Radiação de referência para a STC

$W_e = P_{FV}$

## PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

$$\eta_{t,zondag} = \frac{\dot{m}}{A_c} \cdot C_{p_w} \cdot \left[ \frac{T_{fo} - T_{fi}}{I} \right]$$

$$\eta_{t,l} = \frac{Q_u}{I \cdot A_c} \quad \text{Duffie e Beckman, eq. 6.2.2b}$$

$$\eta_{e,l} = \frac{W_e}{I \cdot A_c}$$

$$\eta_{total,l} = \eta_{t,l} + \eta_{e,l}$$

$$e_i = h_i - h_o - T_o \cdot (S_i - S_o) + \frac{V_{wa}^2}{2} + 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot z_i$$

$$e_f = h_f - h_o - T_o \cdot (S_f - S_o) + \frac{V_{wa}^2}{2} + 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot z_f$$

$$z_i = 0$$

$$z_f = \sin(\beta) \cdot L_v$$

$$h_i = h(\text{water}; T = T_{fi}; P = P_{atm})$$

$$h_f = h(\text{water}; T = T_{fo}; P = P_{atm})$$

$$h_o = h(\text{water}; T = T_o; P = P_{atm})$$

$$T_o = 298,15$$

$$S_o = s(\text{water}; T = T_o; P = P_{atm})$$

$$S_i = s(\text{water}; T = T_{fi}; P = P_{atm})$$

$$S_f = s(\text{water}; T = T_{fo}; P = P_{atm})$$

$$\eta_{t,II} = \frac{\dot{m} \cdot (e_f - e_i)}{\left[ 1 - \frac{T_o}{T_{sol}} \right] \cdot I \cdot A_c}$$

$$\eta_{e,II} = \frac{W_e}{\left[ 1 - \frac{T_o}{T_{sol}} \right] \cdot I \cdot A_c}$$

$$\eta_{tot,II} = \eta_{t,II} + \eta_{e,II}$$

$$T_{sol} = 5777$$

$$\eta_{e,l} = 3,37800031E-01 - 6,29935721E-04 \cdot T_{cell}$$

## Apêndice 7.2 – Nomenclatura do apêndice 7.1

$A_c$	Área de abertura dos coletores ou PVT's
$C_b$	Condutância da solda que une os tubos verticais a aleta dos absorvedores do PVT, igual a 5000 W/mK
$C_{cell}$	Calor específico da célula
$C_{p_2}$	Calor específico do ar escoando nas costas do coletor
$C_p$	Calor específico a pressão constante
$D_{man}$	Diâmetro do tubo manifold
$D_{t:e}$	Diâmetro externo dos tubos verticais do coletor
$D_{t:i}$	Diâmetro interno dos tubos dos tubos verticais do coletor
$D_{t:i}$	Diâmetro interno dos tubos verticais do coletor
$E_{back}$	Emissividade de cobertura das costas do coletor
$E_c$	Emissividade da cobertura de vidro do módulo PV
$ef$	Exergia específica do fluido na saída dos coletores ou PVT's (J/kg);
$ei$	Exergia específica do fluido à entrada dos coletores ou PVT's (J/kg);
$F_I$	Fator de eficiência do coletor
$F_{II}$	Relação entre Fator de remoção e Fator de Eficiência do coletor
$F_R$	Fator de remoção de calor do coletor dos absorvedores
$F$	Fator de eficiência da aleta do absorvedor
$fa$	ator de atrito (adimensional)
$h_{conv:f}$	Coefficiente convectivo de transferência de calor do tubo para o fluido
$h_{conv;back}$	Coefficiente convectivo natural nas costas do coletor (W/m <sup>2</sup> K);
$h_{conv;back;forçado}$	Coefficiente convectivo forçado nas costas do coletor
$h_{conv;total;back}$	Coefficiente convectivo total nas costas do coletor
$h_{conv;total;back;forçado}$	Coefficiente convectivo forçado nas costas do coletor
$h_{costas}$	Coefficiente de transferência de calor pelas costas do coletor
$h_l$	Perdas maiores (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> );
$h_{lateral}$	Coefficiente de transferência de calor pela lateral
$h_{rad;back;ceu}$	Coefficiente de troca radiante entre as costas do coletor e o céu
$h_{rad;back;sup}$	Coefficiente de troca de calor radiante entre as costas do coletor e a superfície
$h_{rad;cs}$	Coefficiente de trocas radiantes entre o céu e a superfície
$h_{topo}$	Coefficiente de transferência de calor pelo topo do coletor

$h_w$	Coeficiente de transferência de calor pelo vento
$h$	Coeficiente de transferência de calor
$h_f$	Coeficiente de transferência de calor do fluido
$h_o$	Entalpia específica de referência, tomada a “ $T_o$ ” para o fluido de trabalho dos coletores ou PVT’s (J/kg)
$I_{ref}$	Radiação de referência
$I$	Radiação solar
$k_{wa}$	Condutividade do fluido
$k_2$	Coeficiente de condução térmica da lâmina de alumínio utilizada para fechar as costas do coletor
$ka_2$	Condutividade do ar nas costas do coletor
$k_{aleta}$	Condutividade térmica da aleta do absorvedor do coletor (W/mK);
$k_{cell}$	Condutividade da célula
$k_{eva}$	Condutividade térmica do EVA
$k_{glue}$	Condutividade térmica da cola que une o PV a placa plana que de cobre do coletor térmico
$k_{isol:costas}$	Condutividade térmica da lã de vidro
$k_{tedlar}$	Condutividade do tedlar
$k_{tube}$	Condutividade térmica do tubo
$k_{vidro}$	Condutividade do vidro
$L_h$	Comprimento horizontal dos coletores ou PVT’s
$L_{tube}$	Comprimento dos tubos
$L_v$	Comprimento vertical dos coletores ou PVT’s
$\dot{m}$	Vazão mássica
$n$	Número de tubos do PVT
$Nu$	Número de Nusselt (adimensional)
$P_{FV}$	Potência do módulo fotovoltaico
$P_{atm}$	Pressão atmosférica
$Pr$	Número de Prandtl (adimensional)
$Pr_2$	Número de Prandtl para o ar nas costas do coletor
$Pr_{wa}$	Número de Prandtl para escoamento do fluido dentro dos tubos
$P$	Pressão
$Q_u$	Calor útil

$q$	Fluxo de calor
$Ra_{costas}$	Número de Reyleigh para o escoamento de ar pelas costas do PVT
$R_{back}$	Resistência de condução de calor da célula FV para a aleta (m.K/W)
$R_{cell}$	Resistência de condução de calor das células FV
$R_e$	Número de Reynolds (adimensional)
$R_{eva}$	Resistência de condução do eva nas costas do FV (m.K/W)
$Re_{wa}$	Número de Reynolds para o escoamento de água $\rho_{wa}$ – Densidade do fluido bombeado
$Re_{xc}$	Número de Reynolds crítico para escoamento em placa plana
$R_{glue}$	Resistência de condução da cola de acoplamento do PV ao coletor térmico nas costas do FV (m.K/W)
$R_{tedlar}$	Resistência de condução do tedlar nas costas do FV (m.K/W)
$R_{vidro;eva}$	Resistência de condução do vidro para o eva (m.K/W)
$S_{ef}$	Quantidade máxima de energia disponível para conversão em calor útil nos coletores PVT's
Si	Quantidade máxima de energia disponível para conversão em calor e ou eletricidade nos coletores PVT's, após atingir o plano do absorvedor das células fotovoltaicas
So	Entropia específica de referência para o fluido de trabalho dos coletores ou PVT's
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_{costas}$	Temperatura das costas do coletor (K);
$T_{fi}$	Temperatura do fluido inicial
$T_{fm}$	Temperatura média do fluido
$T_{fo}$	Temperatura do fluido na saída
$T_{lateral}$	Temperatura na lateral do coletor
$Tm_{costas}$	Temperatura média nas costas do coletor
$T_o$	Temperatura de referência igual a 298,15 K
$T_{pv}$	Temperatura média do absorvedor (células fotovoltaicas)
$T_s$	Temperatura da superfície
$T_{sol}$	Temperatura do sol, igual a 5777 K
TC	Coefficiente de variação da potência em função da temperatura para potência do módulo

$\delta_{TG}$	Temperatura reduzida
$U_L$	Coefficiente total de perdas térmicas pelas costas do PVT
$U_b$	Coefficiente Total de perdas térmicas pelas costas do coletor
$U_e$	Coefficiente de perdas térmicas nas laterais do coletor
$U_t$	Coefficiente Total de perdas térmicas pelo topo do coletor PVT
$V_1$	Velocidade do fluido à entrada (m/s)
$V_2$	Velocidade do fluido na saída (m/s)
$V_w$	Velocidade do vento
$W$	Distância entre eixos dos tubos do absorvedor de tubo aleta (m);
$x_c$	Comprimento crítico da placa nas costas do coletor considerando incidência lateral do vento
$z_f$	Altura do fluido na saída (m/s);
$z_i$	Altura do fluido à entrada (m/s);
$\alpha_2$	Difusividade térmica do ar nas costas do coletor
$\delta_{PVT}$	Espessura total do coletor PVT
$\delta_2$	Espessura da chapa de alumínio colocada nas costas do coletor para proteção do isolamento e vedação
$\delta_{aleta}$	Espessura da aleta do coletor
$\delta_{eva}$	Espessura da camada de EVA
$\delta_{glue}$	Espessura de camada nas costas do PV
$\delta_{isol:costas}$	Espessura do isolamento nas costas do coletor (m);
$\delta_{isol;costas}$	Espessura do isolante nas costas do coletor
$\delta_{isol,lat}$	Espessura do isolamento lateral dos coletores ou PVT's
$\delta_{pv}$	Espessura da camada absorvedora
$\delta_{vidro}$	Espessura da camada de vidro
$\eta_e$	Eficiência elétrica do coletor
$\eta_{pv}$	Eficiência da célula fotovoltaica
$\eta_t$	Eficiência térmica do coletor
$\eta_{total}$	Eficiência total
$\mu_2$	Viscosidade do ar sobre as costas do PVT
$\mu_{wa}$	Viscosidade dinâmica do fluido de trabalho
$\rho_2$	Densidade do ar nas costas do coletor;
$\rho_{cell}$	Densidade da célula FV ( $kg/m^3$ )



$\rho_{wa}$	Densidade do fluido de trabalho
$\tau_{pv}$	Transmissividade da célula fotovoltaica
$\tau_{\alpha}$	Fator de transmissividade-absortividade

## Apêndice 7.3 – Dados completos simulados no EES

	Radiação [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura a entrada	Vazão	Vento [m/s]	Temperatura ambiente[K]	$\eta_t$	Temperatura saída [K]	Sef	h topo	h costas	h lateral
<b>Ponto 1</b>	1147	305,61	0,0328	4,156	303,43	0,429	309,2	734,714	21,2838	5,7558	0,3316
<b>Ponto 2</b>	1137	309,6	0,0328	4,156	304,37	0,3877	312,81	729,917	21,3996	5,9314	0,3316
<b>Ponto 3</b>	1091	306,38	0,0328	4,156	304,37	0,3862	311,44	699,159	21,267	5,9247	0,3316
<b>Ponto 4</b>	1121	307,2	0,0237	4,156	302,68	0,3874	311,58	718,459	21,2953	5,8924	0,3316
<b>Ponto 5</b>	1084	307,89	0,0212	4,156	303,63	0,3714	312,43	695,067	21,3032	5,8779	0,3316
<b>Ponto 6</b>	1059	311,35	0,0246	4,156	301,01	0,3014	314,9	680,117	21,2996	5,7711	0,3316
<b>Ponto 7</b>	1053	311,98	0,026	4,156	301,63	0,3017	315,27	676,867	21,3328	5,8084	0,3316
<b>Ponto 8</b>	1090	313,16	0,0328	4,156	299,61	0,2662	318,93	700,492	21,2843	5,8098	0,3316
<b>Ponto 9</b>	1084	317,3	0,0328	4,156	299,67	0,2063	303,38	698,937	21,3725	5,8348	0,3316
<b>Ponto 10</b>	1079	299,79	0,0328	4,156	299,84	0,4572	323,45	686,832	21,0164	5,6547	0,3316
<b>Ponto 11</b>	1136	321,96	0,0328	4,156	301,61	0,1798	323,45	735,616	21,5586	5,9621	0,3316

## Apêndice 7.4 – Dados experimentais de cada ponto medido

Ponto	Temperatura de entrada da água [°C]	Temperatura de entrada da água [K]	Temperatura de saída da água [°C]	Temperatura de saída da água [K]	Radiação [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura ambiente [K]	cp [kJ/(kg·K)]	Vazão [kg/h]	Vazão [kg/s]	ΔT	Eficiência [%]	Temperatura Reduzida [°C.m <sup>2</sup> /W]
1	26,636553	299,786553	30,819646	303,969646	1077,1558	26,667571	299,817571	4178,849	117,973312	0,03277036	4,183093	0,32427472	-2,8796E-05
	26,632641	299,782641	30,828016	303,978016	1077,70072	26,667571	299,817571	4178,849	118,208495	0,03283569	4,195375	0,3257104	-3,2412E-05
	26,63767	299,78767	30,835849	303,985849	1079,69882	26,707586	299,857586	4178,848	117,898589	0,03274961	4,198179	0,32447195	-6,4755E-05
	26,636557	299,786557	30,846466	303,996466	1081,06115	26,720923	299,870923	4178,847	118,023045	0,03278418	4,209909	0,32531148	-7,804E-05
2	32,411194	305,56194	37,031577	310,181577	1132,1942	30,342157	303,492157	4178,644	118,376649	0,0328824	4,619637	0,34185504	0,00182812
	32,444366	305,594366	37,031021	310,181021	1161,89315	30,25546	303,40546	4178,644	117,775929	0,03271554	4,586655	0,32906027	0,00188391
	32,475113	305,625113	37,030469	310,180469	1140,91318	30,268798	303,418798	4178,645	118,065225	0,0327959	4,555356	0,3336421	0,00193381
	32,515919	305,665919	37,034945	310,184945	1153,90078	30,295474	303,445474	4178,647	118,293864	0,03285941	4,519026	0,32788981	0,00192429
3	33,220392	306,370392	39,07548	312,22548	1094,04878	29,328477	302,478477	4178,748	71,819502	0,01994986	5,855088	0,27204388	0,00355735
	33,228226	306,378226	39,12814	312,27814	1093,23135	29,228444	302,378444	4178,751	72,065388	0,02001816	5,899914	0,27527101	0,00365868
	33,236047	306,386047	39,174075	312,324075	1089,41682	29,148416	302,298416	4178,754	71,420339	0,01983898	5,938028	0,27553104	0,00375213
	33,244441	306,394441	39,218876	312,368876	1084,0583	29,108403	302,258403	4178,756	71,079699	0,01974436	5,974435	0,27726206	0,00381533
4	34,042472	307,192472	39,11357	312,26357	1113,5756	29,528546	302,678546	4178,789	85,356025	0,02371001	5,071098	0,27511899	0,00405354
	34,04749	307,19749	39,134857	312,284857	1121,74963	29,535214	302,685214	4178,791	85,259281	0,02368313	5,087367	0,27368002	0,00402253
	34,050295	307,200295	39,163983	312,313983	1119,75152	29,481863	302,631863	4178,792	85,496754	0,0237491	5,113688	0,27635454	0,00407986
	34,05029	307,20029	39,198719	312,348719	1127,7439	29,521877	302,671877	4178,794	85,560166	0,02376671	5,148429	0,2764652	0,00401546
5	34,726555	307,876555	40,499671	313,649671	1095,0478	29,408505	302,558505	4178,905	76,422872	0,02122858	5,773116	0,28517845	0,00485645
	34,734956	307,884956	40,497422	313,647422	1087,96367	29,461856	302,611856	4178,905	76,338715	0,0212052	5,762466	0,28619035	0,00484676
	34,743897	307,893897	40,478375	313,628375	1079,88047	29,495202	302,645202	4178,905	76,722927	0,02131192	5,734478	0,28837627	0,00486044
	34,750058	307,900058	40,450355	313,600355	1076,06592	29,495201	302,645201	4178,903	76,223543	0,02117321	5,700297	0,28580096	0,0048834
6	36,372767	309,522767	39,85585	313,00585	1138,00683	31,175773	304,325773	4178,969	118,125263	0,03281257	3,483083	0,2559084	0,00456675
	36,357654	309,507654	39,921408	313,071408	1136,28122	31,222456	304,372456	4178,972	117,782718	0,03271742	3,563754	0,26147283	0,0045193
	36,346463	309,496463	39,971268	313,121268	1133,3749	31,215787	304,365787	4178,975	118,089056	0,03280252	3,624805	0,26732781	0,0045269
	36,344226	309,494226	40,01554	313,16554	1136,82617	31,26247	304,41247	4178,978	117,827919	0,03272998	3,671314	0,2693391	0,00447013

Ponto	Temperatura de entrada da água [°C]	Temperatura de entrada da água [K]	Temperatura de saída da água [°C]	Temperatura de saída da água [K]	Radiação [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura ambiente [K]	cp [kJ/(kg*K)]	Vazão [kg/h]	Vazão [kg/s]	ΔT	Eficiência [%]	Temperatura Reduzida [°C.m <sup>2</sup> /W]
7	38,170964	311,320964	41,7815	314,9315	1058,35555	27,861311	301,011311	4179,249	88,468526	0,02457459	3,610536	0,21363912	0,0097412
	38,184973	311,334973	41,807856	314,957856	1058,53717	27,847973	300,997973	4179,253	88,586505	0,02460736	3,622883	0,21461896	0,00976536
	38,208497	311,358497	41,819626	314,969626	1059,53623	27,948008	301,098008	4179,256	88,54238	0,02459511	3,611129	0,21361464	0,00968394
	38,228092	311,378092	41,836444	314,986444	1060,80773	27,854643	301,004643	4179,259	88,002637	0,02444518	3,608352	0,21189507	0,00977882
8	38,781425	311,931425	42,084235	315,234235	1056,44827	28,354813	301,504813	4179,327	93,364585	0,02593461	3,30281	0,20662246	0,0098695
	38,818386	311,968386	42,120119	315,270119	1051,7255	28,481524	301,631524	4179,334	93,542127	0,02598392	3,301733	0,20787752	0,00982848
	38,850879	312,000879	42,152074	315,302074	1052,81537	28,488192	301,638192	4179,34	93,559481	0,02598874	3,301195	0,2076673	0,00984283
	38,892323	312,042323	42,172262	315,322262	1054,08688	28,488192	301,638192	4179,345	91,567663	0,02543546	3,279939	0,20169418	0,00987028
9	40,005455	313,155455	42,468874	315,618874	1088,41778	26,474173	299,624173	4179,474	118,152078	0,03282002	2,463419	0,18930379	0,01243207
	40,011048	313,161048	42,468865	315,618865	1090,23422	26,48751	299,63751	4179,474	118,05243	0,03279234	2,457817	0,18839959	0,01240425
	40,014418	313,164418	42,477286	315,627286	1092,50477	26,434161	299,584161	4179,475	117,965983	0,03276833	2,462868	0,1882565	0,01243039
	40,023942	313,173942	42,488493	315,638493	1089,41682	26,440829	299,590829	4179,477	117,843731	0,03273437	2,464551	0,18872342	0,01246824
10	44,145813	317,295813	45,716403	318,866403	1086,32887	26,440828	299,590828	4180,272	118,396849	0,03288801	1,57059	0,12119923	0,016298
	44,148617	317,298617	45,727634	318,877634	1085,87477	26,574208	299,724208	4180,273	117,96143	0,03276706	1,579017	0,1214522	0,01618456
	44,145247	317,295247	45,73998	318,88998	1082,69597	26,514187	299,664187	4180,274	118,090545	0,03280293	1,594733	0,12315583	0,01628441
	44,148617	317,298617	45,754016	318,904016	1079,33553	26,520856	299,670856	4180,276	118,044802	0,03279022	1,605399	0,12431742	0,01633205
11	48,744083	321,894083	50,360098	323,510098	1132,82997	28,468185	301,618185	4181,516	117,81903	0,03272751	1,616015	0,11903742	0,01789845
	48,783963	321,933963	50,403945	323,553945	1129,10623	28,421503	301,571503	4181,529	117,898737	0,03274965	1,619982	0,11980455	0,01803414
	48,832272	321,982272	50,447235	323,597235	1140,00493	28,454847	301,604847	4181,542	118,507858	0,03291885	1,614963	0,11890308	0,01787486
	48,872715	322,022715	50,489377	323,639377	1143,91028	28,461516	301,611516	4181,555	118,389381	0,03288594	1,616662	0,11850358	0,01784336