

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

WILLI GONÇALEZ OSAKA

**PROPOSTA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO-TÉRMICO COM
MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE PARA A MELHORIA DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

CURITIBA
2019

WILLI GONÇALEZ OSAKA

**PROPOSTA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO-TÉRMICO COM
MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE PARA A MELHORIA
DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

Co-orientador: Prof. Dr. Stephan Hennings Och

Curitiba, PR
2019

Agradecimentos

Esta página destina-se a agradecer a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus e à minha família, especialmente meus pais, Tuyosi e Raquel Osaka, por promoverem minha educação e capacitação, colocando-as acima dos seus próprios sonhos. A eles eu credito toda minha evolução como profissional e ser humano.

Ao orientador e idealizador deste projeto, prof. Dr. Luís Mauro Moura, que, além de todo o suporte técnico, foi um exemplo que pretendo levar na minha profissão. Espero, um dia, orientar meus alunos com a mesma atenção, respeito e sabedoria.

Da mesma forma, agradeço ao co-orientador Prof. Dr. Stephan Henning Och, por todas suas contribuições no trabalho, especialmente pelo seu profundo conhecimento em simulações, fundamentais na solução do modelo matemático.

No decorrer da pesquisa, diversos profissionais colaboraram com o seu desenvolvimento. Dentre eles, agradeço ao prof. Dr. Clayton Fernandes de Souza, pelas contribuições durante as bancas de qualificação e defesa e por todo apoio técnico para a obtenção das propriedades químicas dos materiais de mudança de fase. Além dele, o prof. Dr. Helcio R. B. Orlande, pela análise da base glicerizada no calorímetro diferencial de varredura do COPPE/UFRJ. Assim como, aos professores que contribuíram significativamente durante as bancas: prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo e prof. Dr. Francis H. R. França.

Ao meu irmão e amigos que vivenciaram comigo este processo de doutoramento, Christian Gonzalez Osaka, Edilaine Duma, Wellington Meira Dancini dos Santos e Sandro Marcos de Araújo, por todo apoio emocional e palavras de incentivo.

Agradeço às instituições: PUCPR, pelos professores e infraestrutura qualificados; e ao IFPR, por viabilizar a realização do doutorado com afastamento integral.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Lista de figuras

Figura 1 – Mudança de perfil na composição da matriz elétrica brasileira nos últimos anos ..	1
Figura 2 – Recursos energéticos totais da Terra.....	4
Figura 3 – Mapa solar.....	5
Figura 4 – Média de energia FV produzida por habitante (2014)	Erro! Indicador não definido.
Figura 5 – Objetivo do projeto no contexto da energia FV	9
Figura 6 – Lingote de silício ultrapuro (esquerda) e painel FV monocristalino (direita).....	14
Figura 7 – Lingote de silício formado por aglomerado de cristais (esquerda) e painel FV policristalino (direita).....	14
Figura 8 – Painéis de filme fino.....	15
Figura 9 – Composição dos painéis FV.	17
Figura 10 – Radiação direta, difusa e refletida.....	18
Figura 11 – Eficiência elétrica de uma célula FV em função do comprimento de onda do fóton	19
Figura 12 – Modelo elétrico de uma célula FV: célula ideal e célula com perdas.....	20
Figura 13 – Curva característica de células FV.....	20
Figura 14 – Curva característica I x V da célula FV com perdas de potência.....	22
Figura 15 – Modelo térmico do painel FV	24
Figura 16 – Impacto da temperatura na eficiência dos painéis FV	26
Figura 17 – Correlação entre temperatura da célula, irradiância e convecção.	29
Figura 18 – Imagem térmica de quatro painéis fotovoltaicos com diferentes composições de materiais.....	30
Figura 19 – Modelo energético de um sistema BIPV.	32
Figura 20 – Sistema FV e Coletor Solar (a) e sistema FV e FVT (b).....	34
Figura 21 – Correlação entre velocidade de ventilação e a eficiência térmica em um sistema FVT-ar	35
Figura 22 – Comparação entre a eficiência elétrica de um painel FV com ventilação natural e com ventilação forçada ($V=3,9$ m/s) ao longo de 5 meses.....	35
Figura 23 – Exemplo de um sistema FVT-água	36
Figura 24 – Sistema FVT com coletor do tipo tubo.	37
Figura 25 – Gradiente de temperatura ao longo do coletor tipo tubo.	38
Figura 26 – Sistema FVT-água: A) coletor solar formado por tubos; B) coletor solar formado por canais.....	38
Figura 27 – Eficiência térmica e elétrica de dois sistemas FVT-água: com e sem cobertura de vidro.....	39
Figura 28 – Diferença entre a temperatura de operação de um sistema FV-MMF com um painel FV	41
Figura 29 – Análise das propriedades térmicas e físicas do ácido cáprico e palmítico como MMF no decorrer de 5.000 ciclos.....	44
Figura 30 – Análise em DSC dos pontos de fusão e solidificação de: ácidos graxos (a); ésteres de ácidos graxos (b).....	45
Figura 31 – Sistema FV com MMF com características inadequadas para o ambiente de operação	46
Figura 32 – Sistema FV com MMF com características inadequadas para o ambiente de operação (Ciclo completo do MMF)	46
Figura 33 – Comparação entre 4 configurações para diminuir a temperatura de painéis FV.	48
Figura 34 – Comparação entre configurações de aletas para melhorar a convecção entre o painel FV e o MMF.	48
Figura 35 – Comparação entre aletas e matrizes para aumentar a convecção entre o painel FV e o MMF.....	49
Figura 36 – Simulação dos resultados obtidos no controle da temperatura de um painel FV de acordo com a espessura do MMF utilizado.....	50

Figura 37 – Simulação para diferentes valores de espessura do MMF em um sistema FV-MMF sob condições reais de irradiância.....	51
Figura 38 – Comparação entre a potência do: painel FV; sistema FVT; e sistema FVT-MMF	53
Figura 39 – Comparação entre sistemas FV e FVT-MMF com diferentes configurações.....	54
Figura 40 – Comparação entre a tensão de circuito aberto (V_{oc}) do painel FV em três configurações: painel FV convencional, sistema FVT e sistema FVT-MMF	54
Figura 41 – Projeto e desenvolvimento da estrutura do Simulador Solar	57
Figura 42 – Simulador Solar: arranjo com 24 refletores dispostos em forma de matriz 4x6.	58
Figura 43 – Dimmer para controle da irradiância no Simulador Solar.	58
Figura 44 – Simulador Solar instalado na câmara climatizada do LST da PUCPR.	59
Figura 45 – Comparação entre os espectros: solar; lâmpada halógena; e outras lâmpadas incandescentes de diferentes temperaturas.....	60
Figura 46 – Aparato para avaliar a geração de energia elétrica e térmica pela lâmpada halógena (esquerda) e imagem térmica da célula FV (direita).	60
Figura 47 - Comparação entre o aquecimento em célula FV provocado por uma lâmpada de 300 W e 500 W.....	62
Figura 48 - Piranômetro instalado para teste de irradiância das lâmpadas halógenas.....	62
Figura 49 – Comparação entre a irradiância entre as lâmpadas halógenas de 300 e 500 W	62
Figura 50 – Caso A: distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$	64
Figura 51 – Caso A: distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$	65
Figura 52 – Caso B: simulador Solar com o material reflexivo nas laterais	66
Figura 53 – Caso B: a) Simulador Solar sem o material reflexivo nas laterais; b) Simulador Solar cercado pelo material reflexivo formando imagens virtuais nas laterais.....	66
Figura 54 – Caso B: distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$	67
Figura 55 – Caso B: distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$	68
Figura 56 – Caso C: modificações no Simulador Solar para melhorar a distribuição da irradiância.....	69
Figura 57 – Caso C: Distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$	69
Figura 58 – Caso C: Distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$	70
Figura 59 - Caso D: Distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$	71
Figura 60 - Caso D: Distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$	72
Figura 61 –Painel de ventilação com 12 coolers.....	73
Figura 62 – Circuito PWM para controle do sistema de ventilação no Simulador Solar	73
Figura 63 – Controle PWM do sistema de ventilação no Simulador Solar.....	73
Figura 64 –Sistema de ventilação do Simulador Solar.....	74
Figura 65 – Caso A: Campo da ventilação.....	75
Figura 66 – Caso B: sistema de ventilação e exaustão do Simulador Solar.....	76
Figura 67 – Caso B: Campo da ventilação no caso B.....	76
Figura 68 – Aquisição da curva característica $I \times V$ do painel FV no Simulador Solar.....	78
Figura 69 – Avaliação do Simulador Solar: curva característica do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação.....	78
Figura 70 – Avaliação do Simulador Solar: potência do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação.....	79
Figura 71 – Coeficiente de tensão para temperatura	79
Figura 72 – Coeficiente de corrente para temperatura.....	80

Figura 73 – Simulação do painel FV: curva característica do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação.....	81
Figura 74 – Simulação do painel FV: potência do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação.....	83
Figura 75 – Curva característica do painel FV: experimental x numérico (simulado)	83
Figura 76 – Modelo conceitual do sistema FVT-MMF	88
Figura 77 – Trocador de calor com aletas.....	89
Figura 78 – Reservatório para MMF	89
Figura 79 – Coletor solar	89
Figura 80 – Composição estrutural do sistema FVT-MMF	91
Figura 81 – Análise da base glicerizada no calorímetro.....	91
Figura 82 – Avaliação da base glicerizada como material de mudança de fase	92
Figura 83 – Derretimento da base glicerizada no reservatório para MMF	92
Figura 84 – Trocador de calor com 2 termopares	93
Figura 85 – Trocador de calor com pasta térmica.....	93
Figura 86 – Termopar para medir a temperatura da água na entrada e saída do coletor solar	94
Figura 87- Posicionamento dos termopares no sistema FVT-MMF.....	94
Figura 88 – Modelo do sistema FVT-MMF montado	95
Figura 89 – Configuração dos equipamentos para a avaliação do sistema FVT-MMF e do painel convencional.	97
Figura 90 – Imagem térmica do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF durante a avaliação	97
Figura 91 – Temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,026 l/s).....	99
Figura 92 – Tensão Voc do painel FV e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,026 l/s).....	99
Figura 93 – Relação entre a tensão Voc do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional (vazão = 0,026 l/s)	100
Figura 94 – Temperatura da água que sai e retorna do tanque (vazão = 0,026 l/s)	100
Figura 95 - Temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,014 l/s).....	101
Figura 96 - Tensão Voc do painel FV e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,014 l/s).....	101
Figura 97 - Relação entre a tensão Voc do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional (vazão = 0,014 l/s).....	102
Figura 98 - Temperatura da água que sai e retorna do tanque (vazão = 0,014 l/s).....	102
Figura 99 - Temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF (vazão = 0 l/s).....	103
Figura 100 - Tensão Voc do painel FV e do sistema FVT-MMF (vazão = 0 l/s).....	103
Figura 101 - Relação entre a tensão Voc do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional	104
Figura 102 – Comparação entre as tensões de saída dos painéis FV nos casos A, B e C	105
Figura 103 – Vista explodida do sistema FVT-MMF com termopares posicionados.....	106
Figura 104 – Estrutura em corte do sistema FVT-MMF.....	107
Figura 105 – Modelo matemático do sistema FTV-MMF.....	107
Figura 106 – Fluxo de calor entre o trocador de calor e o MMF: contato direto com a base de alumínio ou por meio das aletas.	110
Figura 107 – Análise em calorímetro diferencial de varredura da base glicerizada.....	111
Figura 108 – Simulação do sistema FVT-MMF para irradiância de 1000 W/m ² e vazão de 0,026 l/s.....	113
Figura 109 - Simulação do sistema FVT-MMF para irradiância de 1000 W/m ² e vazão de 0,014 l/s.....	113
Figura 110 - Simulação do sistema FVT-MMF para irradiância de 1000 W/m ² e sem vazão da água	113
Figura 111 – Simulação do sistema FVT-MMF para vazão 0,026 l/s	115
Figura 112 – Simulação do sistema FVT-MMF para vazão 0,014 l/s	115

Figura 113 – Simulação do sistema FVT-MMF e sem vazão	116
Figura 114 – Comparação entre a energia elétrica gerada pelo sistema FVT-MMF e o painel FV convencional	117
Figura 115 – Comparação entre a energia global gerada pelo sistema FVT-MMF e o painel FV convencional	117

Lista de siglas e abreviaturas

A_{cel} – Área da célula FV	$[m^{-2}]$
a – Constante de idealidade do diodo	
c – Calor específico	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
EVA – <i>Ethylene Vinyl Acetate</i>	
Eg – Energia do elétron na camada de valência	$[J]$
$E_{fóton}(\lambda)$ – Energia do fóton	$[J]$
FV – Fotovoltaico(a)	
FVT – Fotovoltaico-térmico	
FVT-água – Fotovoltaico-térmico refrigerado pela água	
FVT-ar – Fotovoltaico-térmico refrigerado pelo ar	
FV-MMF – Fotovoltaico com materiais de mudança de fase	
G – Irradiação nominal	$[W \cdot m^{-2}]$
H – Calor latente do MMF	$[J \cdot kg^{-1}]$
h – Constante de Plank	$[m^2 \cdot kg \cdot m^{-1}]$
h_{fg} – Calor latente da solidificação ou liquefação	$[J \cdot kg^{-1}]$
h – Coeficiente da transferência de calor	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
I – Corrente elétrica	$[A]$
k_B – constante de Boltzman	
k_I – Coeficiente de temperatura para corrente	$[m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot k^{-1}]$
k_{Ross} – Coeficiente de Ross	$[K \cdot m^2 \cdot W^{-1}]$
k_V – Coeficiente de temperatura para tensão	
LST – Laboratório de Sistemas Térmicos	
m – Massa	$[kg]$
MMF – Materiais de mudança de fase	
$P_{máx}$ – Potência máxima	$[W]$
MPP – Ponto de máxima potência	$[W]$
PWM – modulação por largura de pulso	
NOCT – <i>Nominal operating cell temperature</i>	
Ns – Número de células do painel FV	
Q_S – Energia armazenada no sistema	$[J]$
Q_{rad} – Energia adicionada no sistema	$[J]$
RE – Retorno Energético	
ROI – Retorno de investimentos (<i>return of investments</i>)	
R_S – Resistência elétrica	$[\Omega]$
S – Fator de balanço de energia	
STC – <i>Standard Test Conditions</i>	
T – Temperatura	$[K]$
T_{FV} – Temperatura do painel FV	$[K]$

T_m	– Temperatura de fusão	[K]
T_{MMF}	– Temperatura do material de mudança de fase	[K]
T_{inf}	– Temperatura da camada inferior	[K]
T_{liq}	– Temperatura de liquefação do material de mudança de fase	[K]
T_{solid}	– Temperatura de solidif. do material de mudança de fase	[K]
T_{sup}	– Temperatura da camada superior	[K]
U_L	– Coeficiente térmico para convecção e radiação	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
V	– Diferença de potencial elétrico ou tensão elétrica	[V]
v	– Velocidade da luz no vácuo	[m · s ⁻¹]
V_{OC}	– Tensão de circuito aberto	[V]

Índices

amb - ambiente
c - célula
conv – convecção
FV - fotovoltaico
inf – inferior
liq - liquefação
max – valores no ponto de máxima potência
m - fusão
MMF – material de mudança de fase
p – paralelo
rad - radiação
ref – valores de referência
s – série
sc – curto circuito
solid - solidificação
sup – superior
T - total

Abreviações: letras gregas

α_{vidro}	– Coeficiente de absorção do vidro	
τ	– Transmitância do vidro	
η	– Eficiência fotovoltaica	[%]
ΔT	– Diferença entre temperatura nominal e padronizada	[K]
Δt	– Intervalo de tempo	[s]
λ	– Comprimento de onda	[m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Justificativa.....	6
1.3	Objetivos.....	10
1.3.1	Objetivo geral.....	10
1.3.2	Objetivos específicos.....	10
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1	Painéis FV.....	12
2.1.1	Princípios de funcionamento das células FV.....	12
2.1.2	Composição dos painéis FV.....	12
2.1.3	Conexão série e paralela das células FV.....	16
2.1.4	Estrutura dos painéis FV.....	16
2.1.5	Radiação solar.....	17
2.1.6	Modelo elétrico e matemático do painel FV.....	20
2.1.7	Modelo térmico do painel FV.....	23
2.2	Avaliação dos painéis FV.....	24
2.3	Influência da temperatura na eficiência elétrica FV.....	25
2.4	Melhoria da eficiência do painel FV através do seu gerenciamento térmico.....	31
2.4.1	Painel FV integrado à estrutura (BIPV).....	31
2.4.2	Sistema fotovoltaico-térmico (FVT).....	32
2.4.3	FVT-ar.....	34
2.4.4	FVT-água.....	36
2.5	Painel fotovoltaico com materiais de mudança de fase.....	40
2.5.1	Tipos de MMF.....	41
2.5.2	Modelo matemático dos sistemas FV-MMF.....	41
2.5.3	Quesitos para sistemas FV-MMF.....	43
2.5.4	Espessura do MMF.....	49
2.6	Sistema fotovoltaico-térmico com materiais de mudança de fase (FVT-MMF).....	52
2.7	Avaliação de sistemas fotovoltaicos em ambiente indoor.....	55
3	DESENVOLVIMENTO.....	57
3.1	Desenvolvimento do Simulador Solar.....	57
3.1.1	Projeto e desenvolvimento conceitual.....	57
3.1.2	Desenvolvimento do sistema de irradiância.....	59
3.2	Avaliação do sistema de irradiância.....	63
3.2.1	Caso A.....	63
3.2.2	Caso B.....	65

3.2.3	Caso C.....	68
3.2.4	Caso D.....	70
3.3	Desenvolvimento do sistema de ventilação.....	72
3.4	Avaliação do sistema de ventilação.....	74
3.4.1	Caso A.....	74
3.4.2	Caso B.....	75
3.5	Avaliação do Simulador Solar com painel FV.....	77
3.6	Resultados da avaliação do Simulador Solar.....	84
4	PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FVT-MMF.....	87
4.1	Trocador de calor com aletas.....	88
4.2	Reservatório para MMF.....	88
4.3	Coletor solar.....	89
4.4	Montagem do sistema FVT-MMF.....	90
5	RESULTADOS.....	98
5.1	Caso A: avaliação do sistema FVT-MMF com vazão de 0,026 l/s.....	98
5.2	Caso B: avaliação do sistema FVT-MMF com vazão de 0,014 l/s.....	100
5.3	Caso C: avaliação do sistema FVT-MMF sem vazão.....	103
5.4	Comparação entre os casos A, B e C.....	104
6	MODELO MATEMÁTICO.....	106
6.1	Temperatura do painel FV (T_{pv}).....	108
6.2	Temperatura no MMF (T_1 e T_2).....	109
6.3	Temperatura da água no coletor solar (T_w).....	110
6.4	Simulação do sistema FVT-MMF.....	110
6.5	Resultados da simulação.....	112
7	CONCLUSões.....	118
7.1	Trabalhos futuros.....	121
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
	APÊNDICES.....	126
	APÊNDICE A. Incertezas nas medições.....	126
	A.1. Incerteza na leitura da tensão.....	126
	A.2. Incerteza na leitura da corrente.....	127
	A.3. Incerteza na leitura da temperatura.....	128
	APÊNDICE B. Rotina para simulação de painel fotovoltaico em Scilab.....	129
	APÊNDICE C. Desenho técnico: Trocador de calor com aletas.....	133
	APÊNDICE D. Desenho técnico: Reservatório para MMF.....	134
	APÊNDICE E. Desenho técnico: Coletor solar.....	135

RESUMO

A eficiência elétrica das células fotovoltaicas é influenciada diretamente pela sua temperatura de operação, podendo sofrer uma redução de até 0,65%/K acima dos 25 °C. Diante deste problema, este trabalho propôs um sistema para a melhoria da eficiência elétrica fotovoltaica através da redução da sua temperatura de operação, chamada na literatura de gerenciamento térmico. A proposta integrou duas tecnologias promissoras e complementares entre si, para o gerenciamento térmico dos painéis fotovoltaicos, sendo elas: sistema híbrido (fotovoltaico-térmico - FVT) e o uso de materiais de mudança de fase (MMF). Utilizou-se uma base glicerizada como material de mudança de fase (MMF). Na avaliação experimental do sistema foi projetado e desenvolvido um ambiente *indoor*, chamado de simulador solar, capaz de controlar a irradiância (com dispersão máxima de 5,6%), ventilação e temperatura ambiente com significativa precisão. No simulador solar o sistema um protótipo do sistema FVT-MMF foi avaliado, experimentalmente, sob três configurações diferentes de irradiância, temperatura ambiente e vazão da água no coletor solar. Em todos os casos avaliados houve uma redução na temperatura de operação do painel FV, chegando à um aumento na tensão de até 14% e no aproveitamento da energia global (elétrica e térmica) de 539,7%. A avaliação do sistema foi realizada por meio computacional através de um modelo matemático, cuja solução teve como princípio a definição dos coeficientes de troca de calor dos materiais usados por identificação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados. A simulação do modelo matemático resultou em uma significativa correlação com os resultados obtidos experimentalmente, possibilitando a avaliação do sistema FVT-MMF sob condições climáticas adaptadas a outras regiões.

Palavras-chave: painel fotovoltaico, eficiência elétrica e térmica, materiais de mudança de fase.

ABSTRACT

The electrical efficiency of photovoltaic cells is directly influenced by their operating temperature and it may be reduced by up to 0.65% / K above 25 °C. Therefore, this work proposed a system to improve photovoltaic electrical efficiency by reducing its operating temperature (thermal management). The proposal integrated two promising and complementary technologies for the thermal management of photovoltaic panels: photovoltaic-thermal systems (PVT) and phase change material materials (PCM), resulting in the photovoltaic-thermal system with phase change material (PVT-PCM). For the evaluation of the system was designed and developed an indoor environment - solar simulator, able to control irradiance (with maximum dispersion of 5.6%), ventilation and ambient temperature with significant accuracy. In the solar simulator the PVT-PCM prototype was experimentally evaluated under three different irradiance configurations, ambient temperature and water flow in the solar collector. In all cases evaluated, there was a reduction in the operating temperature of the PV panel, reaching an increase in voltage of 14% and the global energy (electrical and thermal) of 539.7%. The validation of the system was performed through a mathematical model, using parameters identification by the least squares method to define the heat exchange coefficients of the PVT-PCM materials. The simulation of the mathematical model resulted in a significant correlation with the experimental results, validating them and allowing the evaluation of the FVT-MMF adapted to other regions.

Keywords: photovoltaic panel, electrical and thermal efficiency, phase change materials.

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização da proposta, colocando em evidência a importância das fontes de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável, especialmente a energia FV, a justificativa para a busca pela melhoria da eficiência elétrica de sistemas FV e seu impacto no retorno de investimentos e os objetivos geral e específicos deste trabalho.

1.1 Contextualização

As frequentes crises energéticas brasileiras, “apagões”, ocorridas a partir de 2001 devido ao mal planejamento decenal por parte dos órgãos competentes e aos atípicos eventos de longa estiagem ocorridos nas últimas décadas, resultaram em grandes perdas financeiras em todos os setores produtivos e chamaram a atenção para o início de um novo problema envolvendo um sistema energético à beira do colapso, derrubando sua credibilidade e limitando o desenvolvimento de um país emergente (Reis, 2011).

Romero e Reis (2011) definem que o suprimento de energia, em suas diversas formas, a um custo aceitável e alta confiabilidade, é um dos pilares para o desenvolvimento de uma região e melhoria na qualidade de vida de uma comunidade, tal como a educação, o saneamento e a saúde, tornando-se condição essencial para a cidadania.

Essas crises exigiram uma mudança no perfil da matriz energética nacional, com soluções emergenciais e de curto prazo, cujos resultados podem ser observados ao longo dos últimos anos (Figura 1).

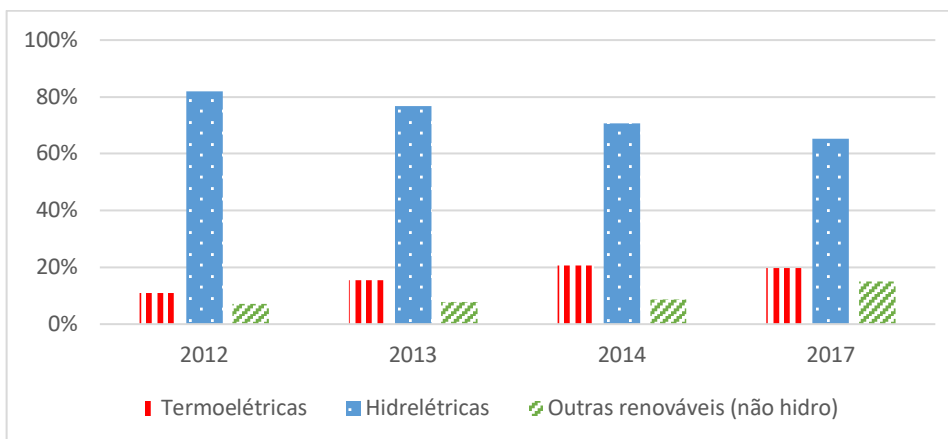


Figura 1 – Mudança de perfil na composição da matriz elétrica brasileira nos últimos anos
Adaptado de: (Tiepolo, 2015) e (BEN, 2018)

Conforme observado na Figura 1, a geração hidrelétrica, que era responsável por 81,90% da energia elétrica total produzida no país em 2012, sofreu uma redução para 70,60% em apenas 2 anos, principalmente devido ao surgimento de novas fontes de geração de energia elétrica. Além disso, o longo tempo e elevado custo para implantação das usinas hidrelétricas e os diversos embargos sofridos pelos projetos das grandes centrais hidrelétricas, devidos aos consequentes impactos sócio-ambientais, também contribuíram para essa mudança.

Como uma ação emergencial para suprir a crescente demanda por energia, diversas usinas termoelétricas foram acionadas nos últimos anos. Conseqüentemente, os custos adicionais deste tipo de produção foram repassados para a sociedade, culminando no encarecimento do custo de produção nos diversos setores, perda da competitividade frente aos produtos importados e altas taxas de inflação, além de todos impactos ambientais envolvidos na queima de combustível de origem fóssil.

De acordo com o U.S. Energy Information Administration, a queima de combustíveis fósseis representou, até 2013, 80% da energia consumida no mundo. A cada Gigawatt-hora de energia elétrica a partir de termoelétricas de combustíveis fósseis são produzidas 1000 toneladas de CO_2 , 10 toneladas de SO_2 , 4 toneladas de NO_x e mais 700 kg de partículas como Cádmio e Arsênio (Islam, Pandey, Hasanuzzaman, & Rahim, 2016) (Browne, Lawlor, Kelly, Norton, & McCormack, 2015).

Neste momento de transformação, as fontes renováveis encontraram algumas condições favoráveis para sua inserção e crescimento no país, começando pela forte pressão, em diversas esferas, por um desenvolvimento mais sustentável, que permitisse satisfazer as necessidades das gerações atuais sem afetar a capacidade das gerações futuras de também satisfazer suas próprias necessidades, isto primando pela adoção de tecnologias de geração ecologicamente corretas, economicamente viáveis, socialmente justas e culturalmente aceitas.

No viés do setor energético, falar em desenvolvimento mais sustentável implica, segundo Romero e Reis (2012), em:

- diminuir o uso dos combustíveis fósseis e aumentar o uso de fontes de energia renováveis;
- aumentar a eficiência do setor energético em toda sua cadeia: extração, geração e consumo;

- promover mudanças no setor produtivo visando ao aumento da eficiência no uso dos materiais;
- incentivar o desenvolvimento tecnológico do setor energético, como melhorias tecnológicas no setor de produção;
- estabelecer políticas que incentivem o mercado para tecnologias ambientalmente benéficas.

Além dessa conscientização cada vez mais crescente por um modelo de desenvolvimento sustentável, o novo paradigma do cenário energético tem direcionado esforços para a diversificação e descentralização das fontes de geração tradicionais, visando ao aproveitamento das potencialidades locais, como a geração eólica no Nordeste e Sul do país, e a geração maremotriz na região costeira.

Esses fatores apresentados tiveram papel fundamental para acelerar o processo de inserção das fontes de energias renováveis no sistema nacional, que até o momento se restringiam aos estudos em laboratório e ao suprimento de energia elétrica em regiões isoladas. Desde então, sua aceitação se reflete em um crescimento vertiginoso desde a última década, com destaque para a energia fotovoltaica (FV), que embora ainda represente uma pequena parcela da produção total do país e do mundo, vem se destacando devido às seguintes características (REIS, 2011) (Ministério de Minas e Energias, 2015):

- é renovável e a fonte de energia mais abundante na Terra (Figura 2).
- altos níveis de irradiância solar em todo o território brasileiro durante o ano;
- reduzido impacto ambiental na geração de energia;
- requer pouca manutenção;
- pode ser instalada próxima da carga, o que se torna mais importante ao considerar que aproximadamente 1/3 da população mundial vive na zona rural;
- rápida instalação;
- modular: possui capacidade de ampliação ou redução conforme as necessidades;
- a geração solar FV pode ser complementar à geração hidrelétrica, nos períodos de estiagem;

- a instalação de painéis FV com alturas acima de 2 metros pode criar condições favoráveis para o cultivo de hortaliças e legumes;
- os maiores níveis de irradiância solar no Brasil estão justamente nas regiões de baixo desenvolvimento econômico, podendo ser um fator de alavancagem dessas regiões;
- os incentivos através de medidas públicas, como a resolução normativa 482/12, que regulamenta a relação da geração distribuída entre a concessionária e o micro/minigerador;

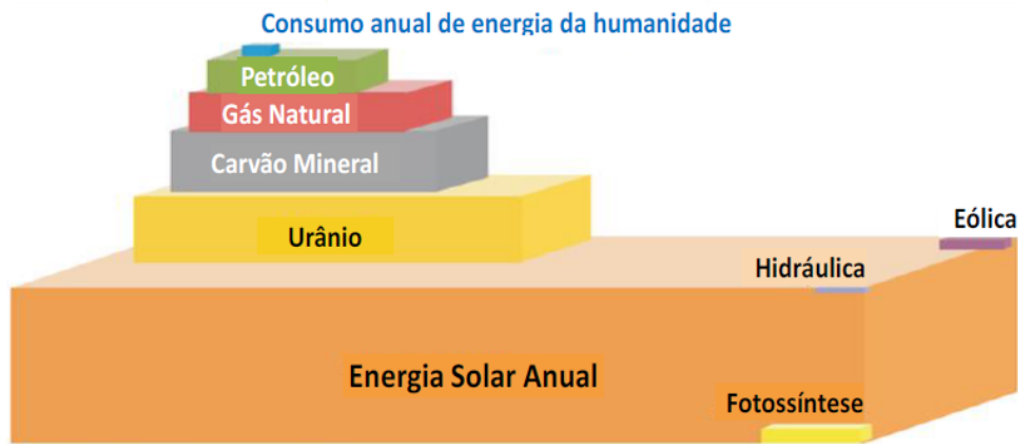


Figura 2 – Recursos energéticos totais da Terra

Fonte: (Ministério de Minas e Energia – Energia Solar no Brasil e Mundo, 2015)

Em 2014 houve, no Brasil, o primeiro leilão para geração de energia solar pública, de 890 MW. No ano seguinte, mais dois leilões foram realizados, totalizando 2.653 MW. Esses leilões (Tabela 1) foram realizados na modalidade de “energia de reserva”, e com o objetivo de promover o uso e o desenvolvimento da indústria solar no país. O Plano Decenal de Expansão de Energia elétrica (PDE 2024) estima que a capacidade instalada do Brasil, em 2024, será de 8.300 MW, sendo 7.000 MW de geração centralizada e 1.300 MW na modalidade de geração distribuída (Ministério de Minas e Energia, 2015).

Tabela 1 – Leilões de Geração FV no Brasil
Fonte: (Ministério de Minas e Energia, 2015)

Mês/ano	Capacidade Instalada (MW)	Início de Suprimento	Período Contratado (anos)
10/2014	890	2017	21
08/2015	834	2017	21
11/2015	929	2018	21
Total	2.653		

Embora essas iniciativas do governo visem ao melhor aproveitamento da energia FV no Brasil, sua capacidade instalada é pequena comparada à capacidade dos países mais desenvolvidos. Em 2019 foi realizado um levantamento no qual identificou a China como o maior produtor de energia FV do mundo (Figura 3), com 160 GW instalados. De acordo com os dados do Ministério de Minas e Energia, a potência instalada de painéis FV era de apenas 1,19 GW (REN, 2019).

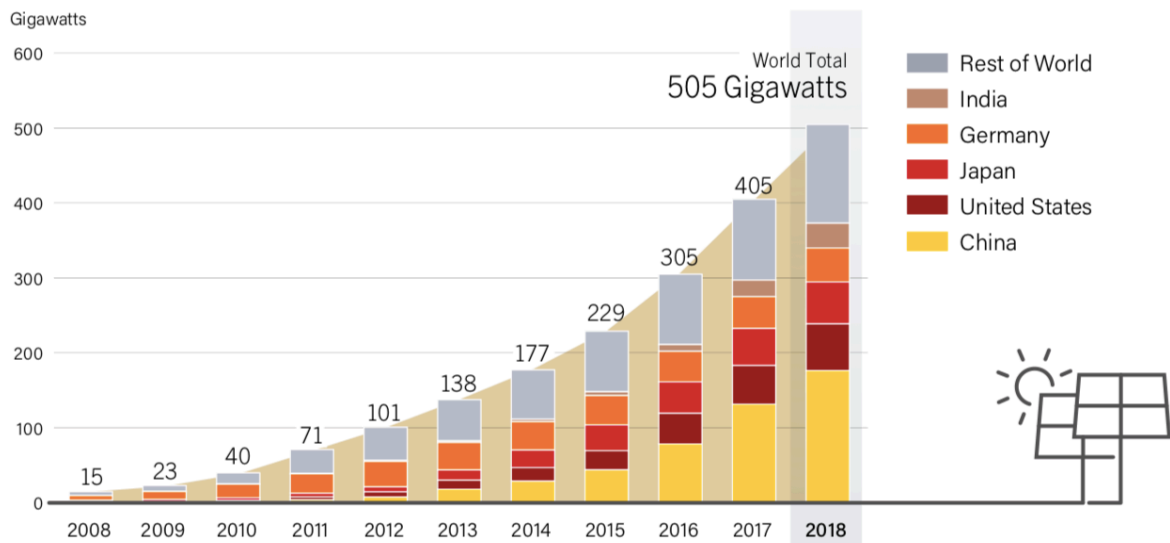


Figura 3 -Países com maior capacidade instalada na última década
Fonte: (REN, 2019)

Quando comparada a capacidade de geração de energia FV entre o Brasil e os países com a maior capacidade instalada em 2018, por meio dos níveis de irradiância solar, pode-se verificar o grande potencial que o Brasil possui (Figura 4).

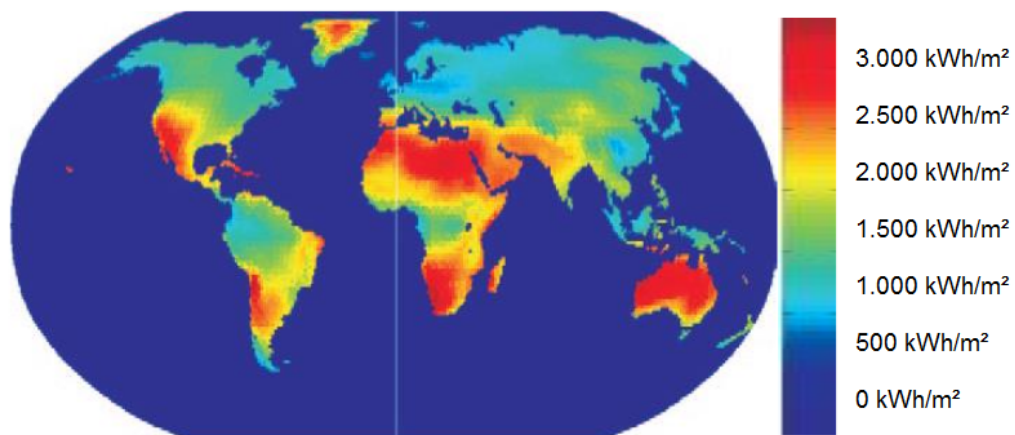


Figura 4 – Mapa solar
Fonte: (Solargis, s.d.)

Apesar de todo este potencial, duas particularidades têm limitado um crescimento maior da geração FV, que são (Peng, *et al.*, 2015):

- o elevado custo para aquisição do sistema, comparado ao custo de se conectar à rede elétrica das concessionárias;
- e o baixo rendimento na conversão de energia elétrica (23% sob condições ótimas), que diminui significativamente com o aumento da sua temperatura de operação.

A combinação destes dois fatores resulta em um longo prazo para obtenção do retorno de investimento (ROI), que é fator preponderante para a existência de uma significativa resistência na instalação destes sistemas para fins particulares (KRAUTER, 2004) (CHOW, HE, *et al.*, 2007).

Segundo Reis (2011), para que haja uma interação harmônica entre o desenvolvimento econômico e o uso adequado dos recursos naturais, é fundamental a busca por uma maior eficiência energética em toda a cadeia de produção: geração, transmissão, distribuição e utilização. E, neste sentido, o presente projeto propõe o estudo e soluções que visem à busca pela melhoria da eficiência na geração de energia elétrica FV, reduzindo seu tempo de ROI, e alavancando a inserção desta tecnologia na matriz energética por meio de sistemas isolados e distribuídos.

1.2 Justificativa

O teste padrão de eficiência dos painéis FV (STC – *Standard Test Conditions*) segue a norma internacional IEC 61215 e é realizado em câmaras climatizadas na temperatura de 25 °C, sem ventilação e com massa de ar (AM - *air mass*¹) de 1.5. A irradiância de 1000 Wm^{-2} é feita por meio de iluminação artificial, geralmente com lâmpadas de xenon, cujo espectro apresenta amplitudes maiores na faixa de maior eficiência na conversão de energia elétrica e menores amplitudes na banda do infravermelho, justamente para evitar o aumento da temperatura do painel. Desta forma, o rendimento apresentado pelo fabricante é sempre um valor tendendo ao ótimo, cujos resultados semelhantes dificilmente são alcançados em campo (sob

¹ Massa de ar (AM – *air mass*), é a espessura de camada de ar atravessada pelos raios solares até o solo. A massa de ar é calculada como: $AM=1/\cos\theta_z$. Sendo θ_z o ângulo zenital. O STC adota o AM = 1.5, ou seja, para um ângulo zenital =48,5°. Maiores detalhes sobre o AM podem ser encontrados na referência de (Villalva & Gazoli, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2012).

condições reais) (VILLALVA e GAZOLI, 2012) (BLOEM, 2008) (Weiss, Amara, & Menezes, 2012).

Na expectativa de diminuir a discrepância entre os resultados alcançados em campo e nas câmaras climatizadas, foi estabelecido um novo padrão denominado NOCT (*nominal operating cell temperature*), com ângulo inclinação da radiação de 45°, temperatura ambiente de 20 °C, ventilação de 1 ms^{-1} e irradiância de 800 Wm^{-2} . Embora o NOCT se aproxime das condições reais de operação na Europa, no Brasil ele pode ser considerado inadequado, uma vez que a temperatura ambiente e irradiância estabelecidas no padrão NOCT ficam abaixo dos valores encontrados em um país de clima tropical. E são justamente estes os principais desafios discutidos neste projeto: a diminuição da eficiência do painel FV com o aumento da sua temperatura e a divergência entre a eficiência elétrica nominal e em campo, principalmente nos países de clima tropical.

Com o objetivo de aumentar a eficiência dos painéis FV em campo, diversas propostas vêm sendo estudadas dando ênfase ao controle ou diminuição da sua temperatura (gerenciamento térmico). Tais como:

- sistema fotovoltaico-térmico refrigerado por ar (FVT-ar): conhecido como sistema híbrido, é mais estudado em regiões frias, onde o ar utilizado para resfriar os painéis FV é aproveitado, posteriormente, para o aquecimento de ambientes. Com este sistema é possível melhorar a eficiência elétrica dos painéis FV, pela diminuição da sua temperatura de operação e, ao mesmo tempo, permite o aproveitamento da energia térmica para o aquecimento dos ambientes, resultando em uma eficiência global (eficiência elétrica e térmica) mais atrativa;
- sistema fotovoltaico-térmico refrigerado por água (FVT-água): é mais estudado em regiões tropicais, onde a água é utilizada para resfriar os painéis FV e seu ganho térmico é aproveitado como um pré aquecimento da água em prédios e residências. O fluxo de água pode ser ativo (por meio de bomba de água) ou passivo (por termossifão);
- materiais de mudança de fase (MMF): o uso de MMF com diferentes pontos de fusão têm sido estudados com o objetivo de serem integrados aos painéis FV e estabilizarem sua temperatura durante o processo de fusão do material;

- sistema fotovoltaico-térmico com materiais de mudança de fase (FVT-MMF): mais recentemente têm sido usadas as duas tecnologias anteriores de forma integrada, para melhorar a diminuição da temperatura de operação dos painéis FV e aumentar sua eficiência elétrica e térmica.

Diferente dos testes realizados pelos fabricantes, atualmente esses estudos experimentais que visam à melhoria da eficiência dos painéis FV são realizados em campo, ficando sujeitos às seguintes adversidades climáticas: variação da irradiância durante o dia e posicionamento do Sol durante o ano, sombras parciais devido às nuvens, variação da temperatura e da velocidade do vento.

Segundo Skoplaki e Palyvos (2009), tais adversidades encontradas durante os testes de eficiência dos sistemas FV requerem especial atenção na predição da eficiência dos painéis.

De acordo com Pó (2011) e Peng *et al.* (2015), as incertezas dos resultados obtidos durante os testes e avaliações dos painéis FV podem ser reduzidas em um ambiente controlado (*indoor*), com possibilidade de controle da temperatura e irradiância. Por outro lado, avaliações em campo (*outdoor*) apenas podem ser realizadas de forma confiável quando sua temperatura durante as medições não apresenta variação superior a 2 K e a irradiância e velocidade do vento são praticamente constantes. Estas implicações resultam na necessidade de realizar uma grande quantidade de aquisições de dados para a determinação de parâmetros importantes dos painéis FV em experimentos realizados *outdoor*, enquanto que isto poderia ser simplificado em um ambiente *indoor*, onde existe uma menor incerteza em relação às medidas.

Por isto, esta pesquisa tem como objetivo o estudo de uma proposta para aumentar a eficiência elétrica dos painéis FV, isto através do seu gerenciamento térmico (Figura 5). O termo gerenciamento térmico tem sido usado na literatura para definir ações e tecnologias, como esta, com a finalidade de diminuir ou controlar a temperatura dos painéis FV e, desta forma, melhorar a sua eficiência elétrica.

Para se atingir o objetivo deste trabalho, primeiro foi projetado e desenvolvido um ambiente *indoor* para avaliação da eficiência elétrica de painéis FV. Este ambiente foi implementado na câmara climatizada do Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), e possibilitou controlar a

temperatura do ambiente, ventilação, inclinação do painel FV e a fonte de radiação artificial.

Após a construção do ambiente *indoor*, foram estudadas novas propostas para aumento da eficiência de sistemas FV através do controle ou diminuição da sua temperatura de operação, com especial atenção para os sistemas FVT e FV-MMF. A partir deste estudo, foi proposto um sistema FVT-MMF para melhorar a eficiência elétrica dos painéis FV sob condições reais de temperatura, irradiância e ventilação, e contribuir para o aumento do potencial desta tecnologia.

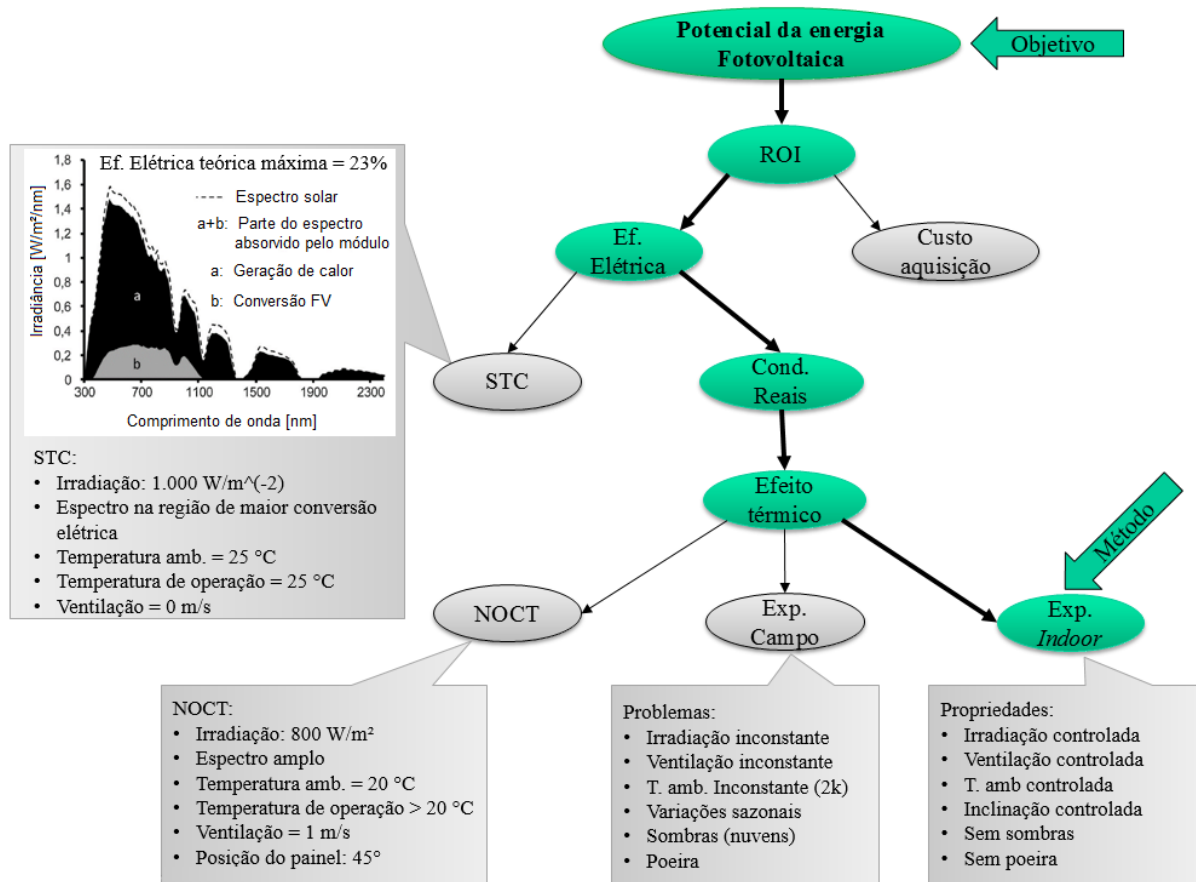


Figura 5 – Objetivo do projeto no contexto da energia FV

A Figura 5 foi elaborada para explicar como o objetivo e o método adotado deste projeto se encaixam neste cenário da energia FV.

O ponto inicial deste projeto foi aumentar o potencial da energia FV, principalmente no Brasil e países com clima tropical (topo da Figura 5).

Um dos maiores desafios para se aumentar o potencial da energia FV no Brasil e no mundo está em tornar mais atrativo o seu tempo de ROI, que depende de dois

vetores principais: a melhoria da eficiência FV e a diminuição no custo de aquisição desta tecnologia. Este trabalho concentrou esforços na melhoria da eficiência FV.

Este projeto classificou duas formas de se avaliar a eficiência elétrica de um painel FV:

- uma das formas é negligenciar o efeito térmico sobre o rendimento FV, conforme definido pelo STC;
- e a outra é considerar o efeito térmico, como é previsto no padrão NOCT, em ensaios em campo ou em ensaios *indoor* (usando simuladores solares).

Como este trabalho visa à melhoria da eficiência FV através do gerenciamento térmico dos painéis, a primeira etapa foi a construção do simulador solar afim de se reproduzir as condições adequadas de irradiância, temperatura ambiente (com variação durante os ensaios menor que 2 K) e ventilação praticamente constante, conforme já mencionado.

A partir disto, foi proposto e avaliado um sistema para aumentar a eficiência elétrica FV por meio do seu gerenciamento térmico, visando à melhoria do potencial desta tecnologia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor, desenvolver e avaliar um novo sistema FVT-MMF com o uso de base glicerizada visando à melhoria da eficiência elétrica fotovoltaica através do seu gerenciamento térmico.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- projetar e desenvolver um ambiente *indoor* para experimentação e avaliação da eficiência elétrica de sistemas FV em condições reais de temperatura, irradiância e ventilação;
- avaliar o ambiente *indoor* através da correlação entre os resultados experimentais e simulados numericamente;
- desenvolver uma proposta que vise ao aumento da eficiência elétrica e térmica dos sistemas FV;

- construir um protótipo do sistema FVT-MMF para a avaliação experimental da sua eficiência;
- estudar e propor o uso de misturas a partir da glicerina como material de mudança de fase para o gerenciamento térmico do painel FV;
- desenvolver um modelo matemático do sistema FVT-MMF, por meio da identificação de parâmetros, para a avaliação numérica da proposta;
- usar o modelo matemático desenvolvido para avaliar o sistema sob diferentes condições de operação e termofísicas do protótipo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo traz alguns detalhes dos painéis FV com o objetivo de dar suporte à compreensão do tema. O mesmo está dividido em três subcapítulos: Painéis FV; Avaliação dos painéis FV; e Influência da temperatura na eficiência elétrica FV.

2.1 Painéis FV

2.1.1 Princípios de funcionamento das células FV

Células FV são dispositivos capazes de converter energia solar em energia elétrica. Sua composição química se assemelha ao diodo, composto por semicondutores dopados com cargas positivas e negativas, susceptíveis à formação dos pares: elétrons livres e lacunas (também conhecidas como portadores).

Na exposição das células FV à irradiância solar, os fótons em determinada banda de energia liberam os elétrons da camada de valência no material semicondutor, gerando mais portadores e, conseqüentemente, uma diferença de potencial na célula. Sua taxa de geração de portadores depende principalmente do (Villalva & Gazoli, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2012):

- fluxo incidente na célula (irradiância);
- absorção do material semicondutor;
- *bandgap*²,
- índice de reflexão do painel;
- temperatura da célula.

2.1.2 Composição dos painéis FV

Em 2015 se estimou que 86% dos painéis fotovoltaicos são fabricados a partir do silício cristalino, por ser um elemento abundante, não tóxico, pode ser facilmente dopado e possui um processo fabril bem consolidado pela indústria da eletrônica. Existem diversas tecnologias aplicadas na fabricação dos painéis FV, das quais duas se destacam por suas peculiaridades e por serem mais empregadas: silício monocristalino e silício policristalino. Além desses, o filme fino e as células fotovoltaicas poliméricas (também conhecidas como orgânicas, embora recente, tem

² Bandgap é a energia necessária para que o elétron efetue a transição da camada de valência do átomo para a camada de condução.

se demonstrado promissora principalmente por suas características de fabricação, custo e possibilidades de aplicações) (Villalva & Gazoli, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2012) (Browne, Norton, & McCormack, 2015).

É evidente que a fabricação dos painéis FV requer uma certa quantidade de energia, além da emissão do CO_2 , que dependem do processo de fabricação empregado e da tecnologia do painel (silício monocristalino, policristalino e filme fino).

Assim como vem ocorrendo o avanço tecnológico dos painéis FV, seu processo fabril também vem sofrendo otimizações afim de se reduzir os gastos com a energia e a poluição ambiental.

O tempo necessário para um painel FV produzir a energia utilizada em sua fabricação é denominado "*Energy Payback*", chamado neste texto de Retorno Energético (RE). O cálculo do RE depende de diversas variáveis, como: a tecnologia produzida, o processo utilizado e as condições climáticas da região (irradiância, temperatura e ventilação).

O relatório publicado em 2019, pelo Instituto Fraunhofer para sistemas de energia solar, concluíram que o RE dos painéis FV é menor do que 1,5 anos na América do Sul para painéis policristalinos e monocristalinos (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2019).

2.1.2.1 Silício monocristalino

As células FV monocristalinas são fabricadas a partir do silício ultrapuro. Esta característica resulta em uma eficiência energética mais elevada, 15% a 22%, assim como um maior custo de produção quando comparado com as demais tecnologias (Villalva & Gazoli, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2012).

Devido à sua pureza, seu aspecto é de uma coloração homogênea nas cores azul escuro (Figura 6) (Alharbi & Kais, 2015).

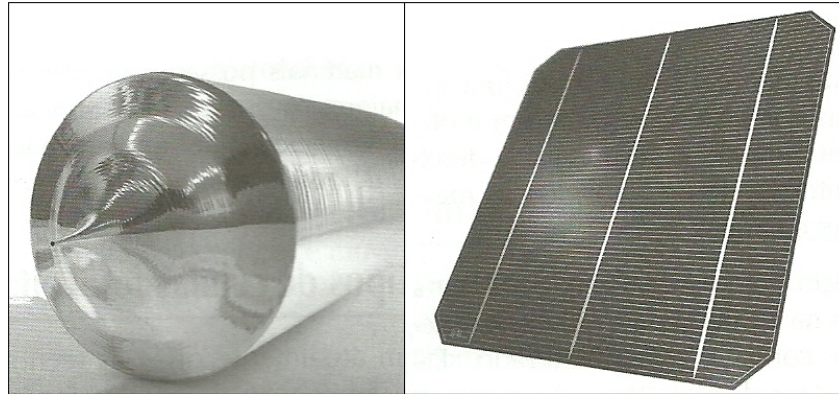


Figura 6 – Lingote de silício ultrapuro (esquerda) e painel FV monocristalino (direita).
Fonte: (Villalva & Gazoli, 2012).

2.1.2.2 Silício policristalino

As células policristalinas são fabricadas a partir de um aglomerado de cristais de silício com tamanhos e orientações diferentes em um processo mais barato. Sua eficiência varia entre 14 a 20%, o que pode ser compensado por um custo menor em relação à célula monocristalina (Alharbi & Kais, 2015).

Este tipo de célula apresenta um aspecto heterogêneo: manchas de azul com diferentes tonalidades (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

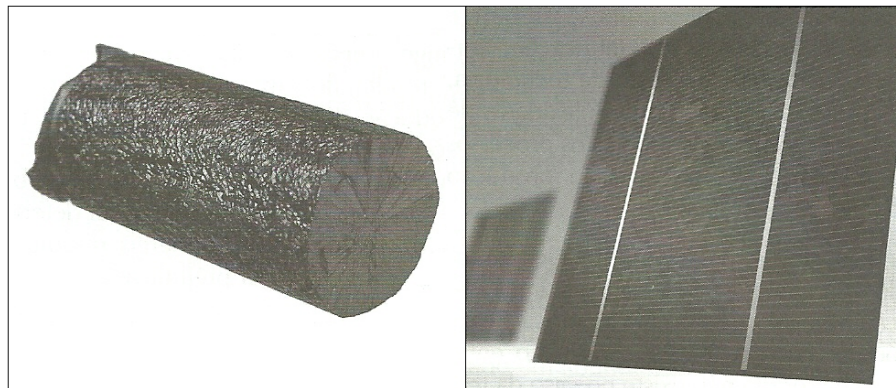


Figura 7 - Lingote de silício formado por aglomerado de cristais (esquerda) e painel FV policristalino (direita).

Fonte: (Villalva & Gazoli, 2012).

2.1.2.3 Filme fino com silício amorfo

O filme fino (Figura 8) surgiu após a tecnologia cristalina, e é fabricado através da deposição de finas camadas de silício ou outro semicondutor sobre uma base, podendo ser flexível ou rígida (Villalva & Gazoli, 2012). Nesta tecnologia estão presentes diversas variações em relação ao material utilizado, como silício amorfo,

silício microcristalino, células híbridas, telureto de cádmio (CdTe) ou cobre-índio-gálio-selênio (CIGS).

O filme fino de silício amorfo requer menos matéria prima e menor temperatura para sua fabricação do que as células policristalinas. Por outro lado, apresenta uma baixa eficiência energética (7% a 13% nos painéis comerciais) e seu processo de deterioração é mais rápido (Alharbi & Kais, 2015).



Figura 8 – Painéis de filme fino
Fonte: (Painéis Solares Fotovoltaicos, 2012)

Diferente dos painéis cristalinos, o filme fino é composto por apenas uma célula de grande área, o tornando menos sensível aos problemas de sombreamento parcial. Devido à importância deste problema na eficiência dos painéis com diversas células fotovoltaicas, este tema é abordado por diversos pesquisadores, como (ISHAQUE et al., 2011); (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Na Tabela 2 são apresentadas algumas tecnologias FV, bem como suas respectivas eficiências elétricas.

Tabela 2 – Comparação entre a eficiência das diversas tecnologias de módulos FV
Adaptado de: (Green, Emery, Hishikawa, Warta, & Dunlop, 2016)

Material da célula FV	Eficiência elétrica dos painéis FV
Silício monocristalino	23,8 ± 0,5%
Silício policristalino	19,5 ± 0,4%
GaAs - Selenieto de Gálio (filme fino)	24,1 ± 0,1%
CdTe - Telureto de Cádmio (filme fino)	18,6 ± 0,6%
CIGS – Cobre, Índio e Gálio Seleneto	15,7 ± 0,5%
a-Si – Silício amorfo	12,3 ± 0,3%
Orgânico	8,7 ± 0,3%

2.1.3 Conexão série e paralela das células FV

Células FV isoladas geram, relativamente, baixos valores de tensões (em torno de 0,6 V para o silício) e corrente elétrica (dependendo da área). Com o propósito de aumentar a tensão e a corrente elétrica produzida pelo sistema, as células são conectadas entre si em série e paralela, formando arranjos conhecidos como painéis FV.

Nos arranjos elétricos entre células FV é importante saber que:

- células conectadas em série aumentam a tensão elétrica do painel;
- células conectadas em paralelo aumentam a corrente elétrica do painel.

Em aplicações que demandam potências superiores às potências nominais dos painéis FV é comum a associação em série e paralelo dos próprios painéis até se atingir os valores de tensão e corrente elétrica desejados.

2.1.4 Estrutura dos painéis FV

A Figura 9 detalha a formação estrutural dos painéis FV. Isto é importante para o futuro entendimento de algumas das suas propriedades térmicas e quais soluções estão sendo propostas para melhorar a sua eficiência elétrica. Seus principais componentes são:

- vidro: deve ser temperado para apresentar alta resistência mecânica, possuir baixa presença de ferro para diminuir a absorção e reflexão da luz irradiada em sua superfície e a sua espessura varia entre 3,2 mm e 4,0 mm, sendo 3,2 mm a espessura mais utilizada para redução de custos, peso e diminuição de perdas por reflexão (Weiss, Amara, & Menezes, 2012). Em alguns casos são utilizados vidros com camadas antireflexivas, alcançando um coeficiente de transmissão maior do que 0,94 (Dupeyrat P. , Ménézo, Rommel, & Henning, 2011);
- células FV: já descritas no subcapítulo 2.1.1 e 2.1.2;
- lâmina de plástico: geralmente de EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*) deve permitir a transmissão da radiação solar para as células FV, prevenir a corrosão das células pela umidade e as isolar eletricamente (Weiss, Amara, & Menezes, 2012);
- e a lâmina de suporte: feita de tedlar, deve prover alta isolamento elétrica e proteção contra intempéries. O tedlar, também conhecido como PVF

(polivinil fluorid $(CH_2CHF)_n$) é um polímero termoplástico semelhante ao PVC (Weiss, Amara, & Menezes, 2012).

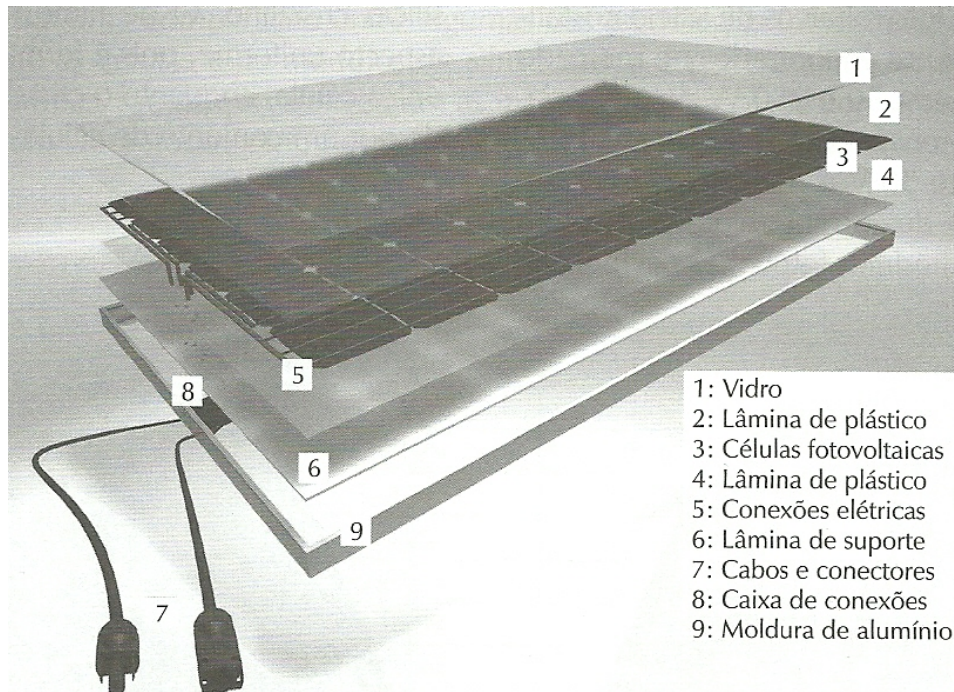


Figura 9 – Composição dos painéis FV.
Fonte: (Villalva & Gazoli, 2012)

As propriedades térmicas mais relevantes, para esta tese, dos materiais que compõem os painéis FV são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades térmicas dos materiais que compõem o painel FV
Adaptado de: (Weiss, Amara, & Menezes, 2012)

Materiais	Espessura (m)	Condutividade térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Massa específica (kgm^{-3})	Calor específico ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	Emissividade
Vidro	$4 \cdot 10^{-3}$	1,8	$2,5 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^2$	0,85
EVA	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$9,6 \cdot 10^2$	$2,09 \cdot 10^3$	0
Célula FV	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^2$	$2,33 \cdot 10^3$	$6,77 \cdot 10^2$	0
Tampa/fundo	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^3$	0,893

2.1.5 Radiação solar

A radiação solar pode ser dividida em três tipos (Figura 10):

- radiação direta: radiação em linha reta entre a fonte e o receptor (painel FV);

- radiação difusa: radiação proveniente do espalhamento (difração + reflexão) da radiação ocasionada por nuvens, fumaça e partículas em suspensão;
- albedo: radiação que sofreu o efeito da reflexão em uma superfície.

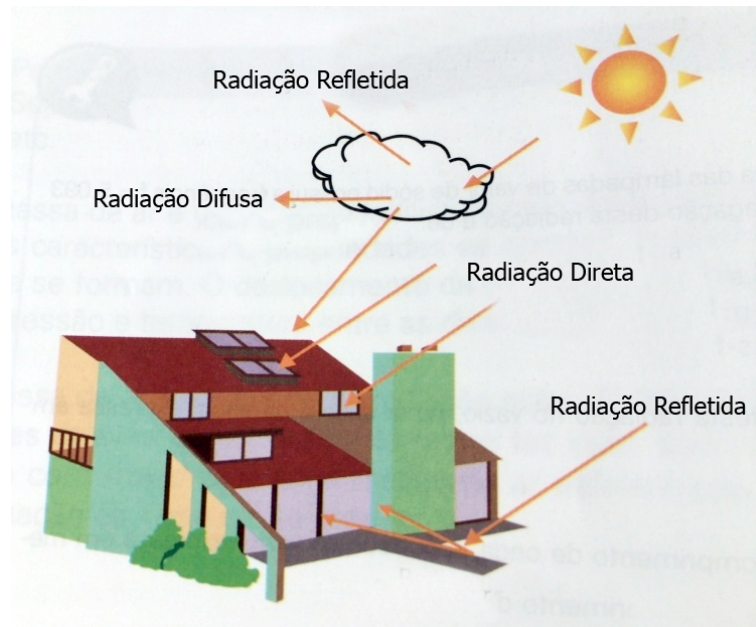


Figura 10 – Radiação direta, difusa e refletida
Fonte: (FC Solar Green Energy, s.d.)

O fóton é a unidade discreta da radiação solar, cuja energia (E_{ph}) depende do seu comprimento de onda (λ). Esta relação é descrita pela equação de Planck-Einstein (Equação (1)) (Villalva & Gazoli, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2012), (Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2013).

$$E_{fóton}(\lambda) = \frac{h \cdot v}{\lambda} \quad (1)$$

Sendo:

$E_{fóton}(\lambda)$: energia de fóton (J)

v : velocidade da luz no vácuo ($m \cdot s^{-1}$)

h : constante de Planck $\cong 6,626 \cdot 10^{-34}$ (J · s)

λ : comprimento de onda (m)

De acordo com a $E_{fóton}$ incidente na célula FV, esta energia do fóton pode resultar na formação de um par de elétron-lacuna, cujo fenômeno já foi mencionado no item 2.1.1 (Villalva & Gazoli, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações,

2012); (Skoplaki & Palyvos, 2009); (Duffie & Beckman, Solar engineering of thermal processes., 2013).

Para painéis de silício, o comprimento de onda máximo para a formação do par elétron-lacuna é de $1,15 \mu\text{m}$ ($f = 869,565 \text{ kHz}$). Ou seja, os fótons com comprimentos de onda superiores a este valor são incapazes de criar o par elétron-lacuna e sua energia é convertida em energia térmica (Dupeyrat P. , Ménéz, Rommel, & Henning, 2011).

Além disto, cada fóton com $\lambda \leq 1,15 \mu\text{m}$ é responsável pela criação de apenas 1 par elétron-lacuna, e sua energia excedente também resulta no aquecimento da célula, conforme é apresentado na Figura 11. Portanto, teoricamente, a máxima eficiência de uma célula fotovoltaica de silício não deve ultrapassar os 25% (VILLALVA e GAZOLI, 2012; SKIPLAKI e PALYVOS, 2009; DUFFIE e BECKMAN, 2013).

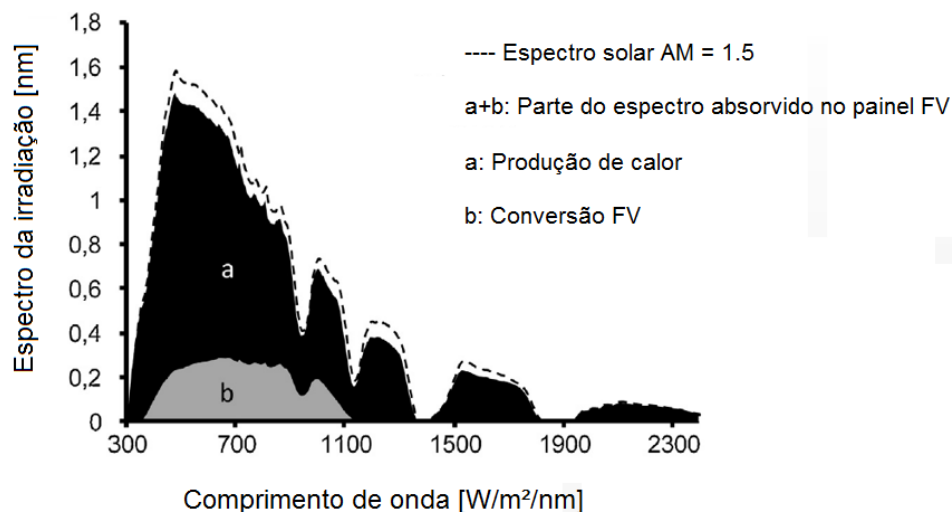


Figura 11 – Eficiência elétrica de uma célula FV em função do comprimento de onda do fóton

Fonte: (Dupeyrat, Ménéz, & Fortuin, 2014)

Isto significa que mais de 75% da irradiância solar incidente em um painel FV não apenas é desperdiçado no processo de conversão de energia elétrica FV, mas também contribui para o aquecimento do painel, cujos impactos negativos serão abordados no subcapítulo a seguir (Skoplaki & Palyvos, 2009).

Para finalizar, conforme concluído por Tiepolo (2015), o Brasil apresenta excelentes índices de irradiância em todo seu território, com médias anuais superiores a dos países europeus (Figura 4). Por isto, é de fundamental importância adaptar os testes de eficiência dos painéis às condições nacionais e regionais, principalmente

para as magnitudes de irradiância e temperatura ambiente, isto com o objetivo de avaliar a real eficiência de cada tecnologia em campo.

2.1.6 Modelo elétrico e matemático do painel FV

Utiliza-se um modelo elétrico constituído de um ou mais diodos em antiparalelos com uma fonte de corrente para descrever o comportamento de uma célula FV, e assim reproduzir o seu comportamento elétrico (Pó, 2011).

Na Figura 12 são apresentados dois modelos elétricos de uma célula FV: o modelo de uma célula ideal (sem os resistores) e o modelo de uma célula com perdas (circuito completo) (Villalva, Gazoli, & Filho, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, 2009).

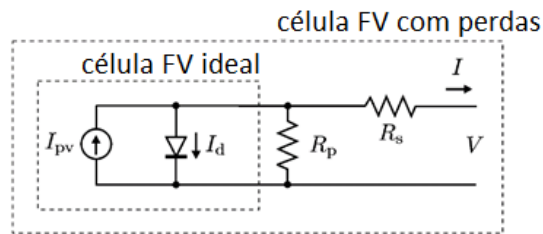


Figura 12 – Modelo elétrico de uma célula FV: célula ideal e célula com perdas
Adaptado de: (Villalva, Gazoli, & Filho, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, 2009)

O circuito da célula ideal apresenta apenas uma fonte de corrente em anti-paralelo com um diodo retificador. A fonte de corrente representa a geração da célula FV e o diodo retificador a ruptura da região de depleção para determinados valores de tensão, resultando na curva característica $I \times V$ (Figura 13).

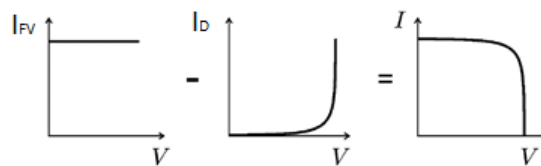


Figura 13 – Curva característica de células FV
Fonte: (Villalva, Gazoli, & Filho, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, 2009)

As equações que governam o comportamento deste modelo elétrico são deduzidas pela aplicação da 1ª Lei de Kirchhoff (Equação (2) e Equação (4)).

$$I = I_{FV} - I_D \quad (2)$$

Sendo:

$$I_{FV} \approx (I_{SC.ref} + K_I \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (3)$$

Ou seja, o cálculo da corrente I_{FV} depende da temperatura de operação, através do coeficiente de corrente para temperatura (fornecido pelo fabricante), e da relação entre a irradiância incidente no painel e a definida pelo STC (1000 W/m²).

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{N_s \cdot a \cdot k_b \cdot T_{cel}}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_0 = I_{sc.ref} \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (-V_{oc.ref})}{N_s \cdot a \cdot k \cdot T_{cel}}\right) \cdot \left(\frac{T_{cel}}{T_{cel.ref}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{a \cdot k_b}\right) \cdot \left(\frac{q}{T_{cel.ref}} - \frac{1}{T_{cel}}\right)\right] \quad (5)$$

Logo:

$$I = I_{FV} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{N_s \cdot a \cdot k_b \cdot T_{cel}}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

Onde:

V_{oc} : tensão de circuito aberto (V)

q : carga do elétron ($q \cong 1,6 \cdot 10^{-19} C$)

k_b : constante de Boltzmann ($k_b \cong 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$)

K_I : coeficiente de temperatura para corrente

I_D : corrente de condução do diodo (diretamente polarizado) (A)

I_{FV} : corrente gerada pelos fótons em condições nominais (A)

$I_{FV.ref}$: corrente gerada pelos fótons em condições padronizadas (A)

G : irradiância (W/m²)

G_{ref} : irradiância nas condições STC ($G_{ref} = 1000 W/m^2$)

ΔT : diferença entre a temperatura nominal e padronizada pelo STC (25 °C)

a : constante de idealidade do diodo (1,3 para painéis de silício policristalino)

T = temperatura (K)

$E_g = 1,12$ (Si 25 °C) (eV)

N_s = número de células do painel FV

I_0 = corrente de saturação reversa do diodo (A)

Os parâmetros de entrada são encontrados nas folhas de dados dos painéis FV.

O circuito da célula com perdas (que melhor representa uma célula FV real) é representado por todos os componentes elétricos da Figura 12, onde são consideradas as resistências elétricas dos contatos entre as células (R_s) e a resistência dos semicondutores (R_p ou R_{sh}), resultando na Figura 14, que apresenta um maior grau de fidelidade com a curva característica presente na folha de dados dos painéis. Na Figura 14, o termo MPP (*maximum power point*) representa o ponto de máxima potência da curva I x V.

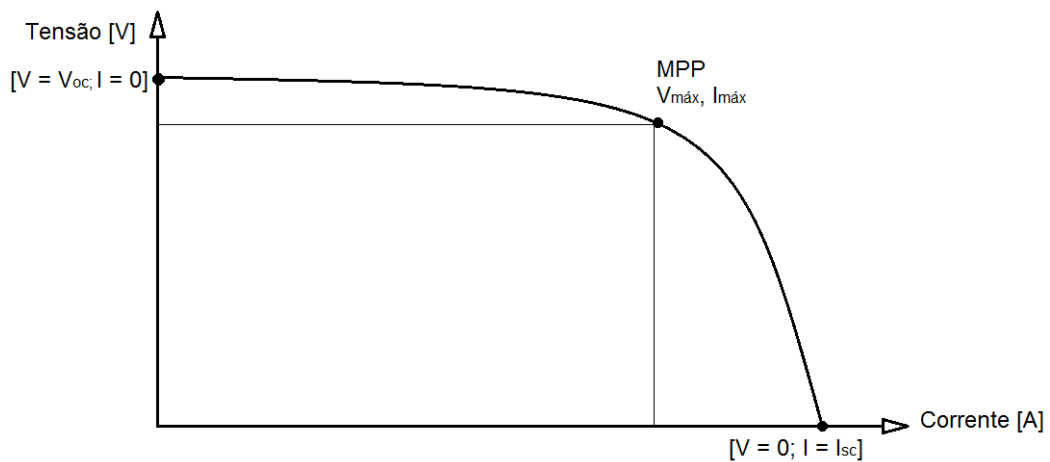


Figura 14 – Curva característica I x V da célula FV com perdas de potência

Neste segundo caso, aplicando a 1ª e 2ª Lei de Kirchhoff se obtém:

$$I = I_{FV} - I_D - I_p \quad (7)$$

Sendo I_p a corrente que passa pela resistência R_p , e é calculada pela Equação (8).

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (8)$$

Logo:

$$I = I_{FV} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{N_s \cdot a \cdot k \cdot T_{cel}}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (9)$$

Os valores da resistência em série (R_s) e resistência paralela (R_p) podem ser simplificadas para as equações a seguir Equação (10) e Equação (11).

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{max}}{I_{max}} \quad (10)$$

$$R_p = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{max}} \quad (11)$$

Sendo:

I_{max} : corrente no MPP (A)

V_{max} : tensão no MPP (A)

2.1.7 Modelo térmico do painel FV

O modelo térmico representado na Figura 15 auxilia na compreensão do balanço energético do painel FV e na interação entre seus componentes. Este modelo faz uma analogia com a elétrica para elucidar o comportamento térmico dentro de um painel FV.

Neste modelo, proposto por Weiss, Amara e Menezes (2012), o painel pode ser dividido em três grupos com características distintas para a energia térmica e elétrica:

- energia de entrada: irradiância (direta, difusa e refletida);
- energia de saída: perdas por radiação para o meio, perdas por convecção e geração de energia elétrica (de acordo com a eficiência da célula);
- ganho térmico: é o aumento da temperatura do painel, cuja energia é armazenada nas suas camadas de acordo com a capacidade térmica de cada material.

Este modelo desenvolvido por (Weiss, Amara, & Menezes, 2012) serviu de base para o desenvolvimento do modelo matemático desta tese por auxiliar na construção do modelo matemático e por fazer a associação das ciências térmicas com a elétrica, que são duas das principais áreas de interesse deste trabalho.

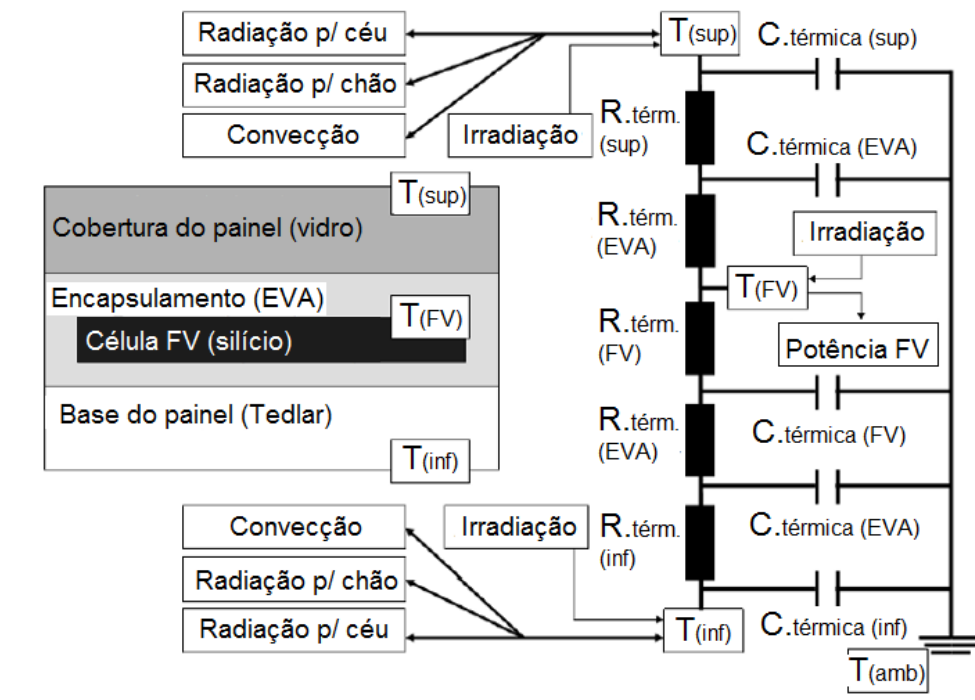


Figura 15 – Modelo térmico do painel FV
Adaptado de: (Weiss, Amara, & Menezes, 2012)

2.2 Avaliação dos painéis FV

Existem diversas formas de se avaliar a eficiência FV, sendo o padrão definido pela norma IEC 61215 (também conhecido como *Standard Test Conditions* – STC) o mais conhecido, no qual se estabelecem condições de ensaio para os painéis. As principais condições estabelecidas por esta norma são (Villalva & Gazoli, 2012):

- irradiância: 1000 Wm^{-2} ;
- temperatura ambiente: 25°C ;
- velocidade do vento: 0 ms^{-1} ;
- massa de ar: 1.5;
- inclinação do painel: 0° (posição horizontal em relação ao solo).

Em paralelo à norma IEC 61215, certo da discrepância entre os ensaios em laboratório e condições reais de irradiância, temperatura e ventilação, foi proposto na Europa o procedimento de avaliação de painéis FV denominado NOCT, *Nominal Operating Cell Temperature* (Tabela 4), com irradiância de 800 Wm^{-2} , temperatura ambiente de 20°C e velocidade média do vento de 1 ms^{-1} (SKOPLAKI e PALYVOS, 2009) (DOLARA, LAZAROIU, *et al.*, 2013) (BLOEM, 2008).

Tabela 4 – Tabela comparativa entre os padrões STC e NOCT

Parâmetros	STC	NOCT
Irradiância	$1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
Temperatura ambiente	25 °C	20 °C
Ventilação	0 ms^{-1}	1 ms^{-1}

O desempenho e as principais características elétricas dos painéis FV são representados através da curva característica I-V, da qual podem ser extraídos os parâmetros: corrente de curto circuito (I_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}) e a máxima potência de saída ($P_{m\acute{a}x}$) ou máximo ponto de potência (MPP) (PÓ, 2011).

É importante comentar que nenhum desses padrões citados se aproximam das condições reais de operação de um painel FV no Brasil. Isto porque, embora o padrão STC estabeleça uma irradiância próxima dos valores registrados neste país, o seu procedimento de teste é feito utilizando breves flashes de luz com uma lâmpada de xênon, para evitar o aquecimento do painel, e é justamente neste tipo de teste que o painel FV apresenta o melhor resultado de eficiência energética, muitas vezes distante dos resultados obtidos em campo (sob condições reais).

Por outro lado, o padrão NOCT foi uma proposta interessante para avaliar os painéis FV sob condições mais próximas das reais. O maior problema do NOCT é que este padrão foi customizado exclusivamente para países Europeus de clima temperado, resultando em uma baixa irradiância e temperatura ambiente para os países de clima tropical, como é o caso do Brasil. Ou seja, caso o NOCT fosse adotado no Brasil, a temperatura de operação do painel FV ficaria abaixo do que realmente ocorre na prática.

2.3 Influência da temperatura na eficiência elétrica FV

Tratando-se da eficiência FV, alguns fatores afetam significativamente sua capacidade de geração de energia elétrica. Tais como (Weiss, Amara, & Menezes, 2012):

- taxa de transmissividade da cobertura de vidro e encapsulamento;
- perdas elétricas decorrentes das conexões e resistência dos condutores;
- e o efeito térmico (que é um dos objetos de estudo deste trabalho).

Conforme citado no item 2.1.5, menos de 25% da energia solar é convertida em energia elétrica em condições ótimas. Em um painel FV de silício policristalino,

que é o mais utilizado atualmente, apenas entre 15 a 18% da irradiância solar é convertida em energia elétrica, e o excedente da irradiância absorvida pelo painel é convertido em calor, aumentando a temperatura do sistema e diminuindo sua eficiência. A Figura 16 apresenta a perda da potência com o aumento da temperatura do painel FV (Browne, Norton & McCormack, 2015).

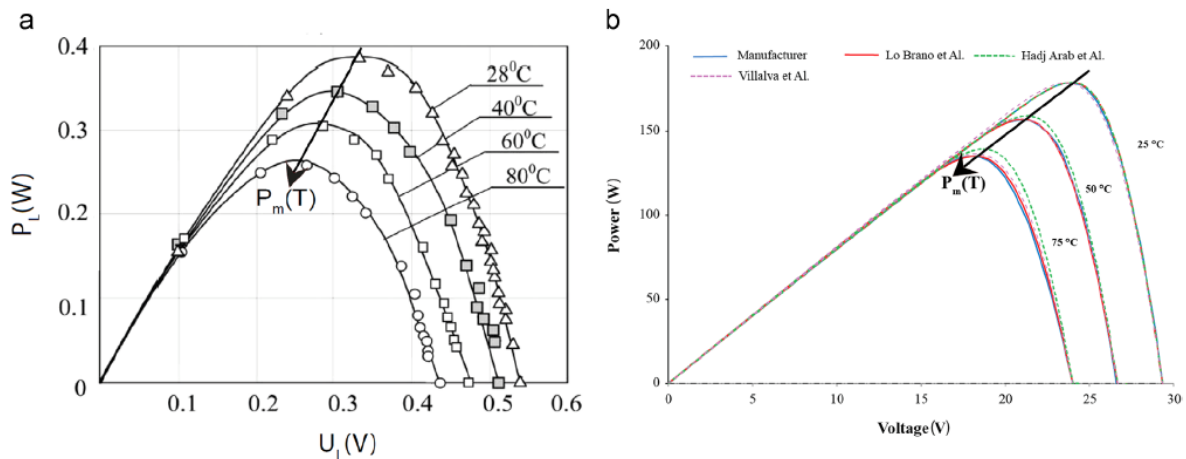


Figura 16 – Impacto da temperatura na eficiência dos painéis FV
Fonte: (Browne, Norton, & McCormack, 2015)

A relação entre a temperatura e a eficiência FV não é linear. Mesmo assim, a simplificação dessa relação em uma relação linear tem sido adotada frequentemente, utilizando um coeficiente de perda que vai desde -0,3% até -0,65% por Kelvin acima dos 25°C, dependendo do tipo e tecnologia de fabricação (Hasan A. , McCormack, Huang, & Norton, 2014). Esta simplificação do modelo matemático que representa a relação da eficiência com a temperatura oferece uma aproximação satisfatória quando a temperatura de trabalho do painel não excede valores muito altos (acima de 100°C).

Em média, os valores nominais de temperatura para operação dos painéis não ultrapassam 85 °C. Mas, segundo Hasan *et al.* (2014), em determinadas regiões é comum a temperatura do painel ultrapassar o limite máximo de operação que, além de diminuir sua eficiência, causa a delaminação das células (fragmentação da estrutura da célula) e acelera seu processo de degradação. Valores acima de 85 °C reduzem significativamente a vida útil dos painéis e dão uma coloração amarelada ao seu encapsulamento, o que reduz a taxa de transmissividade do vidro (Dupeyrat P. , Ménézou, Rommel, & Henning, 2011).

A maior temperatura relatada de operação de um painel foi de 125°C. Neste caso, esta alta temperatura de operação resultou em um decréscimo na eficiência de

69%, já ultrapassando a relação linear de eficiência e temperatura determinada anteriormente (Hasan A. , McCormack, Huang, Saswar, & Norton, 2015).

Diante dos impactos da temperatura sobre os sistemas FV, todo modelo matemático que visa à predição da sua eficiência tem como principais parâmetro de entrada a irradiância e a temperatura de operação das suas células (Skoplaki & Palyvos, 2009).

Na literatura existem diversos modelos para predição da temperatura de operação da célula FV. A Equação (12) pode ser considerada a equação mais simples para a predição, por apenas considerar a temperatura ambiente, a irradiância solar e o coeficiente de Ross (k_{ROSS}), que representa a perda térmica.

$$T_c = T_a + k_{ROSS} \cdot G \quad (12)$$

Sendo:

T_c : temperatura da célula FV (°C)

T_a : temperatura ambiente (°C)

G : irradiância solar (W/m²)

De acordo com (Skoplaki & Palyvos, 2009), o coeficiente de Ross pode ser calculado pela Equação (13) ou pela utilização da Tabela 5, com diversos valores estimados para diferentes condições de material, posicionamento e refrigeração do painel.

$$k_{ROSS} = \frac{\Delta(T_c - T_a)}{\Delta G} \quad (13)$$

Sendo:

$\Delta(T_c - T_a)$: taxa de variação entre a temperatura da célula e a temperatura ambiente (°C)

ΔG : variação da irradiância (W/m²)

Uma outra aproximação para predição da temperatura da célula é obtida a partir do modelo do balanço energético da Equação (14), levando em consideração as características térmicas e físicas dos materiais (Skoplaki & Palyvos, 2009) (Duffie & Beckman, 2013).

Tabela 5 - Tabela com valores estimados para o coeficiente de Ross, de acordo com a configuração do painel FV
Adaptado de: (Skoplaki & Palyvos, 2009)

Configuração do painel FV	$k_{Ross} (K \cdot m^2/W)$
Bem refrigerado (com ventilação)	0,02
Em pé	0,0208
Plano no telhado	0,026
Pouco refrigerado (sem ventilação)	0,0342
Painel fotovoltaico transparente	0,0455
Integrado à fachada	0,0538
Sobre telhado inclinado	0,0563

$$(\tau\alpha)G = n \cdot G + U_L(T_c - T_a) \quad (14)$$

Onde:

τ : transmitância do vidro

α : coeficiente de absorção solar da camada FV

n : eficiência elétrica FV

G : irradiância solar (W/m^2)

U_L : coeficiente de perda térmica: convecção e radiação ($W/(m^2K)$)

T_{cel} : temperatura da célula FV ($^{\circ}C$)

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

Deve-se ressaltar a importância do coeficiente U_L , que é o coeficiente de perda térmica do painel FV por convecção e irradiância. A

Figura 17 apresenta os resultados onde se observa a significativa influência das perdas térmicas por irradiância e convecção sobre a temperatura da célula. Nesta figura, o painel FV foi instalado de quatro formas diferentes: em estrutura aberta (*free rack mounted module*), integrado à parede com ventilação em um dos lados (*ventilated module*), sobre o telhado (*PV roof*) e isolado termicamente (*insulated module*). Dentre as quatro formas de instalação, a que apresentou menor temperatura de operação foi a configuração com o painel em estrutura aberta, seguida da integrada à parede, sobre o telhado e, por último, com o painel isolado termicamente (Bloem, 2008).

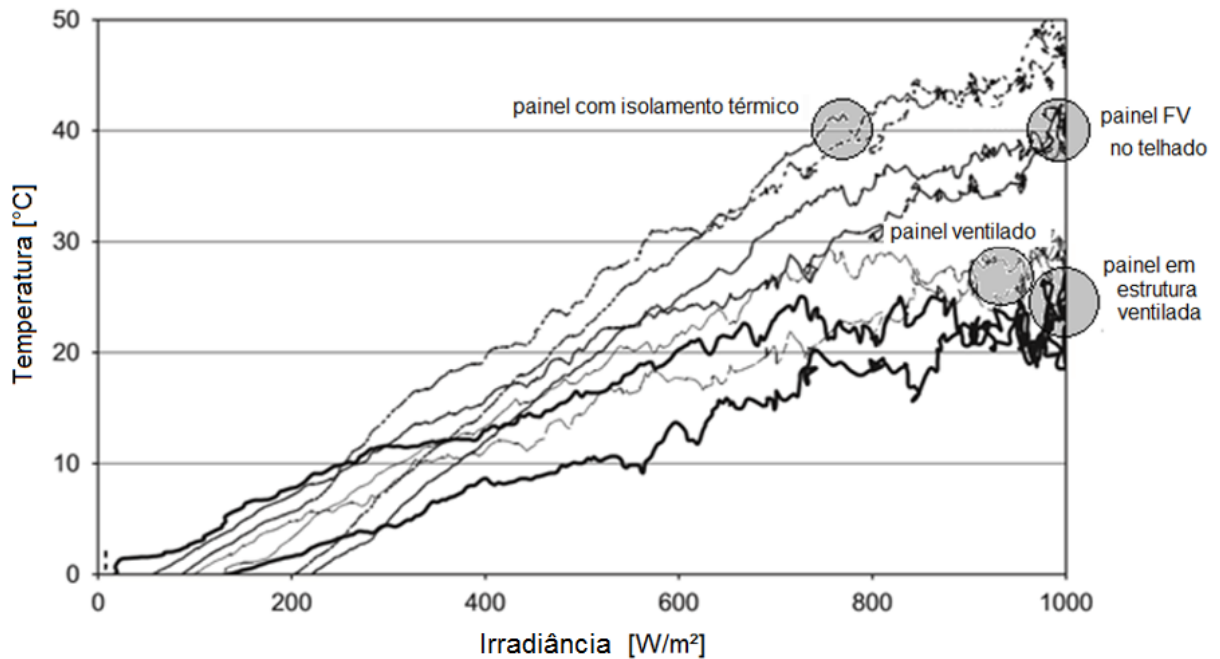


Figura 17 – Correlação entre temperatura da célula, irradiância e convecção.
Adaptado de: (Bloem, 2008)

Outra característica que impacta diretamente na temperatura da célula é a composição do painel. Ou seja, a quantidade de células por painel e os materiais de revestimento superior e inferior. A Figura 18 contém a imagem térmica de quatro painéis formados por diferentes materiais e número de células, sendo:

- canto inferior direito da figura: painel fotovoltaico com 121 células vidro-vidro (revestimento superior-revestimento inferior);
- canto inferior esquerdo da figura: painel fotovoltaico com 64 células vidro-vidro;
- canto superior direito: painel fotovoltaico com 121 células vidro-tedlar;
- canto superior esquerdo: painel fotovoltaico com 121 células tedlar transparente-vidro.

De acordo com Bloem (2008), o melhor desempenho elétrico ocorreu no painel com apenas 64 células fotovoltaicas, enquanto que o pior desempenho ocorreu com o painel com 121 células fotovoltaicas vidro-vidro. Isto comprova que o número de células por painel e os materiais que o compõem impactam diretamente no seu aquecimento. Painéis com mais células por unidade de área e com cobertura de vidro tendem a apresentar uma temperatura de operação mais elevada, do que os painéis com menos células por unidade de área e sem cobertura.

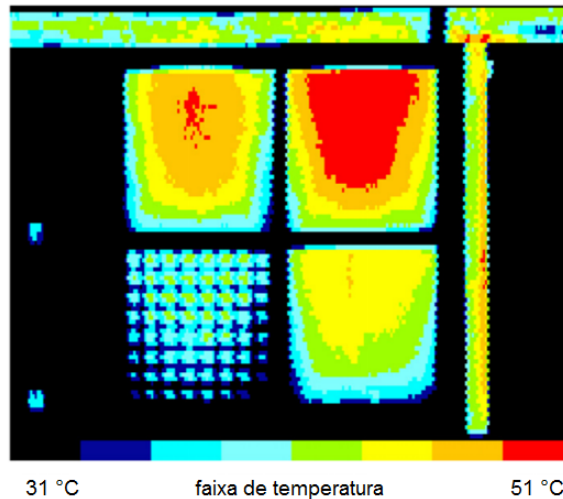


Figura 18 – Imagem térmica de quatro painéis fotovoltaicos com diferentes composições de materiais.
Fonte: (Bloem, 2008)

Diante da significativa influência da temperatura de operação das células FV sobre seu rendimento, é fundamental o uso de novas tecnologias para se obter uma melhor eficiência elétrica. Vokas & Christandonis (2006) descreveram que o uso de novas tecnologias para o controle da temperatura é essencial e deve ser parte integrante dos painéis FV para diminuir os efeitos das altas temperaturas e melhorar a sua eficiência elétrica.

Na literatura internacional, essas tecnologias são denominadas “*thermal management*”. Por este assunto ainda não ser muito estudado no Brasil, e não havendo um termo bem consolidado para estas tecnologias, optou-se por utilizar, nesta tese, a simples tradução do termo em inglês (Vokas & Christandonis, 2006): “gerenciamento térmico”.

2.4 Melhoria da eficiência do painel FV através do seu gerenciamento térmico

Este subcapítulo apresenta quatro propostas em destaque que visam à melhoria da eficiência FV por meio do controle ou diminuição da sua temperatura de operação (gerenciamento térmico): Painel FV integrado à estrutura (BIPV); Sistema fotovoltaico-térmico (FVT); Painel fotovoltaico com materiais de mudança de fase (FV-MMF); Sistema fotovoltaico-térmico com materiais de mudança de fase (FVT-MMF).

2.4.1 Painel FV integrado à estrutura (BIPV)

BIPV é o nome dado para o uso de células/painéis FV integrados à estrutura de prédios, em substituição dos materiais convencionais, como paredes, telhados e janelas. Nesta tese será usado o acrônimo em inglês desta tecnologia por já ser um termo conhecido.

Com esta solução é possível economizar em estruturas convencionais, melhorar o aspecto visual dos prédios com geração de energia FV e, principalmente, diminuir a temperatura de operação dos painéis através da troca de calor com a estrutura dos prédios.

A Figura 19 ilustra o modelo energético de um sistema BIPV, no qual se pode observar (Bloem, 2008):

- ganho térmico por radiação solar;
- perda térmica por convecção entre o painel FV e o ar;
- convecção entre a parede e o ar;
- interação térmica por radiação entre a parede e o painel;
- perdas térmicas do painel para o ambiente através da convecção e radiação.

Ao se optar pela construção de um sistema BIPV, devem ser avaliados os seguintes quesitos (Bloem, 2008):

- eficiência elétrica;
- comportamento térmico;
- orientação geográfica;
- capacidade de ventilação;
- e manutenção e durabilidade dos componentes.

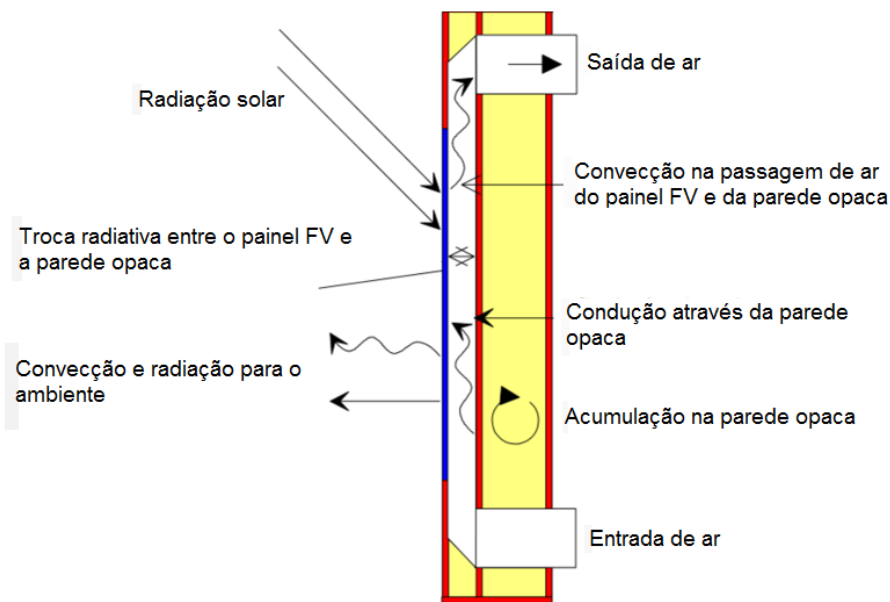


Figura 19 – Modelo energético de um sistema BIPV.
Adaptado de: (Bloem, 2008)

2.4.2 Sistema fotovoltaico-térmico (FVT)

Nos grandes centros metropolitanos, os prédios são um dos maiores consumidores de energia elétrica, podendo até mesmo superar o consumo das indústrias e transportes (DUPEYRAT *et al.*, 2011).

A reduzida área dos prédios para o aproveitamento da irradiância solar gera um conflito de interesses entre o uso desta energia para o aquecimento da água (coletor solar) ou para geração de energia elétrica (sistema FV). E isto torna a proposta de um sistema que integra ambas tecnologias (sistema híbrido) cada vez mais interessante (DUPEYRAT *et al.*, 2011).

Segundo Dupeyrat *et al.* (2011), o grande desafio dos sistemas híbridos, ou também conhecidos como sistemas FVT, é obter a máxima eficiência elétrica e térmica desejada em um único sistema integrado. Em aplicações domésticas, o desempenho térmico desejado é o aquecimento da água até valores próximos de 60°C.

Mesmo este desafio parecendo um pouco utópico, estudos demonstram que apenas o pré-aquecimento da água e o incremento da eficiência elétrica são suficientes para o aumento da viabilidade econômica desta tecnologia e, conseqüentemente, a diminuição do tempo para o ROI.

Alguns experimentos que utilizaram um sistema ativo com refrigeração do painel FV através da água obtiveram uma diminuição na temperatura do painel de até

22°C, impactando em um aumento da sua eficiência na ordem de 8 a 9% (HASAN *et al.*, 2014).

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre a eficiência energética (eficiência elétrica e térmica) do sistema com coletor solar e painel FV lado-a-lados e integrados (FVT). Nesta tabela se verifica que o sistema lado-a-lado resulta em uma energia global maior. Entretanto, se comparada a energia produzida por unidade de área, ou seja, energia produzida por unidade de m^2 , o sistema integrado FVT apresenta uma geração 50,1% maior do que o sistema lado-a-lado (Chow, He, Ji, & Chan, 2007).

Tabela 6 - Comparação entre eficiência dos sistemas: coletor e painel separados (*side-by-side*) e integrados
Adaptado de: (Chow, He, Ji, & Chan, 2007)

	Lado-a-lado	FVT
Área de superfície (m²)		
Coletor solar	1,76	1,76
Painel FV	1,11	1,11
Total	2,87	1,76
Geração de energia		
Energia térmica (MJ)	3.755	3.313
Energia elétrica (MJ)	511,6	525,8
Energia total (MJ)	4.266,6	3.838,8
Energia por unidade de área (MJ/m ²)	1.777	2.669

De fato, em um estudo realizado em três cidades da França por Dupeyrat, Ménézo e Fortuin (2014), foi comparada a produção de energia dos seguintes protótipos (Figura 20): sistema FV e térmico lado-a-lado; painel FV isolado; e sistema FVT integrado. Os resultados indicaram que nas três cidades o sistema FVT resultou em uma maior produção energética global, sendo que nas três cidades a produção de energia elétrica foi superior em 12,7% em Paris, 12,6% em Lyon e 10,7% em Nice.

Entretanto, especificamente neste caso, a produção de energia elétrica por m^2 do sistema FVT apresentou uma menor eficiência elétrica, quando comparada à eficiência elétrica do painel FV isolado, devido à inserção de uma cobertura de vidro no sistema FVT que aumentou sua reflexão (Dupeyrat P. , Ménézo, Rommel, & Henning, 2011).

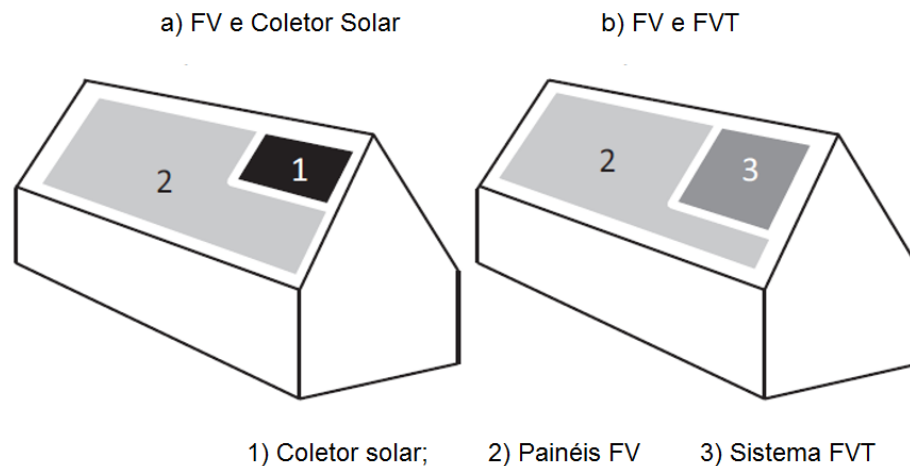


Figura 20 – Sistema FV e Coletor Solar (a) e sistema FV e FVT (b)
Adaptado de: (Dupeyrat, Ménézo, & Fortuin, 2014)

Sob uma análise financeira, Chow *et al.* (2007) realizaram um estudo dos custos e ROI do sistema FV isolado, FV e térmico lado-a-lado e FVT, cujas principais vantagens do sistema FVT são descritas a seguir:

- o sistema FVT ocupa menos espaço, se tornando uma solução mais interessante para locais com espaço limitado;
- a diminuição da temperatura do painel FV reduz o estresse térmico do dispositivo, aumentando sua vida útil;
- como os coletores solares e painéis FV apresentam diferentes dimensões físicas, o sistema lado-a-lado oferece uma apresentação assimétrica do arranjo, podendo ser, esteticamente, inadequados em locais onde estes sistemas são integrados à fachada dos prédios e residências (BIPV).

É importante destacar neste trabalho que existem duas variações dentro dos sistemas FVT: FVT refrigerado por ar (FVT-ar) e FVT refrigerado por água (FVT-água).

2.4.3 FVT-ar

Em sistemas FVT-ar, a velocidade do ar influencia diretamente na eficiência térmica do sistema e, conseqüentemente, no rendimento elétrico do painel FV. A Figura 21 apresenta esta correlação entre a velocidade do ar e a eficiência térmica em um sistema FVT (Bloem, 2008). Nesta figura se observa que, ao se incrementar a velocidade da ventilação no sistema FVT, conseqüentemente se aumenta a taxa de

transferência de calor do painel FV por convecção, melhorando sua eficiência térmica e elétrica.

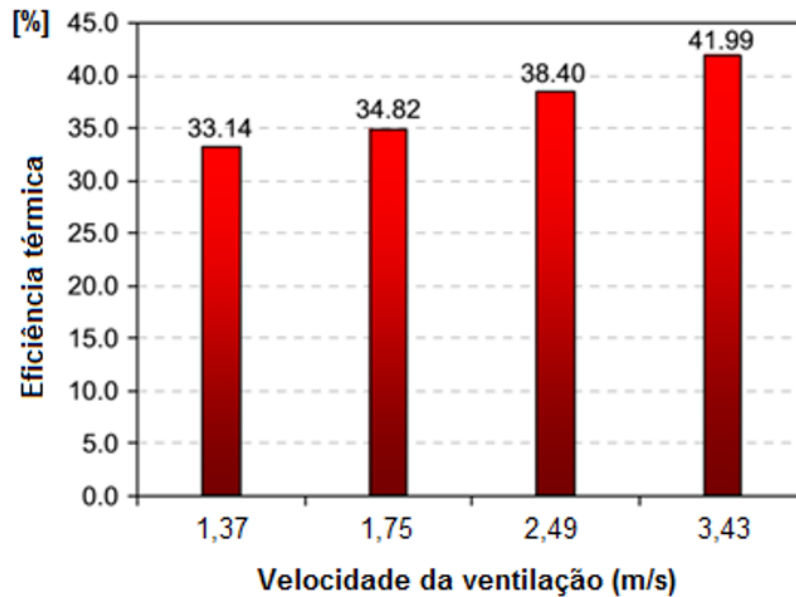


Figura 21 – Correlação entre velocidade de ventilação e a eficiência térmica em um sistema FVT-ar
Adaptado de: (Bloem, 2008)

Em um estudo experimental realizado por Assoa e Ménézó (2014), se concluiu que, embora os sistemas FVT-ar apresentem resultados significativos em relação aos ganhos térmicos, estes sistemas são pouco eficientes para aumentar a eficiência dos painéis FV através da diminuição da sua temperatura (Figura 22).

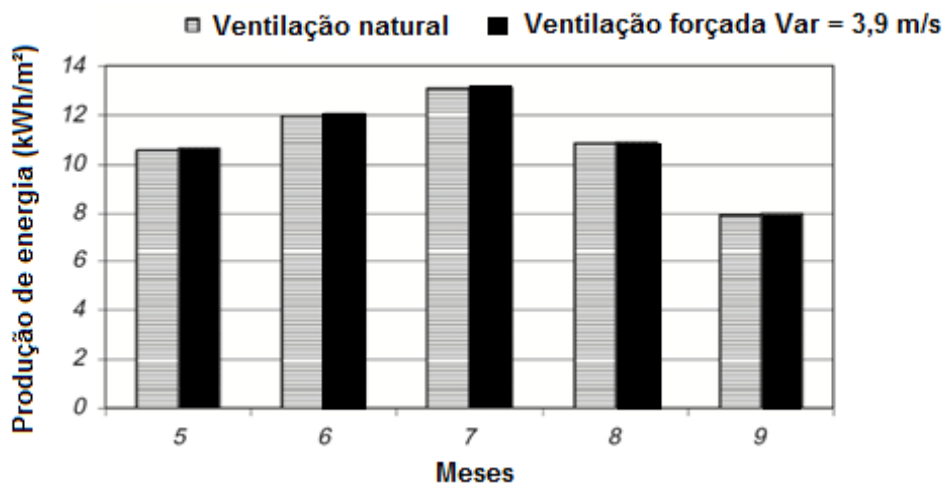


Figura 22 – Comparação entre a eficiência elétrica de um painel FV com ventilação natural e com ventilação forçada ($V=3,9$ m/s) ao longo de 5 meses
Adaptado de: (Assoa & Ménézó, 2014)

Por outro lado, ao se utilizar um sistema ativo de resfriamento dos painéis, ou seja, um sistema de ventilação forçada, parte da energia produzida pelos painéis será

destinada à alimentação elétrica do sistema de ventilação forçada. Nestes casos, o aumento da eficiência elétrica obtida com o sistema de resfriamento dos painéis pode ser totalmente consumido para manter em funcionamento a ventilação forçada, diminuindo a viabilidade econômica deste tipo de tecnologia. Segundo Browne, Norton e McCormack (2015), este tipo de recurso tecnológico pode ser uma melhor opção para determinadas regiões de climas mais quentes e grandes usinas FV.

2.4.4 FVT-água

Apesar de os sistemas FVT-ar serem mais indicados em prédios pela facilidade de instalação e sem a necessidade de grandes modificações estruturais, os sistemas FVT-água são mais eficientes termicamente e eletricamente (ISLAM *et al.*, 2016).

O modo mais simples de implementar um sistema FVT-água consiste apenas na sobreposição do painel FV sobre um coletor solar (Figura 23). Esta solução foi implementada em diversos projetos, mas as desvantagens deste método são (Zondag, 2008):

- exposição das células FV às intempéries climáticas, especialmente à umidade;
- baixa condutividade térmica entre as células FV e o coletor, principalmente se houver bolhas de ar na interface;
- altas perdas térmicas por reflexão, principalmente devido à presença do tedlar na cor branca em painéis de silício.

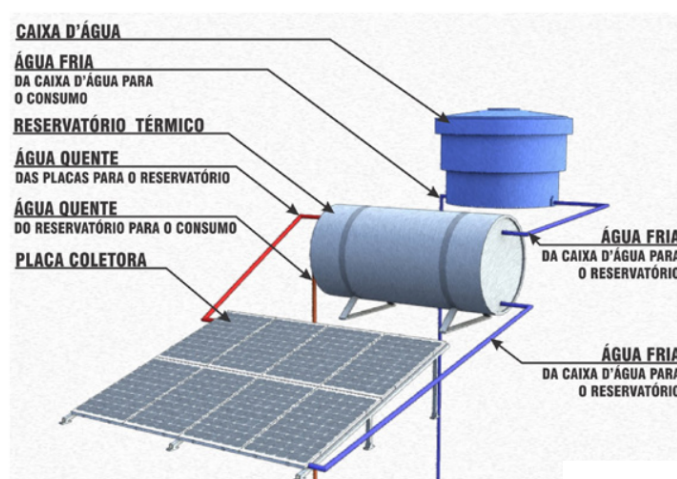


Figura 23 – Exemplo de um sistema FVT-água
 Fonte: (Ministério da Educação, 2015)

Dentre os coletores solares para sistemas FVT, os mais conhecidos são do tipo: tubo e canal.

Os maiores problemas encontrados nos coletores solares do tipo tubo são a reduzida área de contato entre os tubos e o painel FV e o significativo gradiente de temperatura existente ao longo dos tubos.

Na avaliação experimental realizada por (YIN *et al.*, 2013), foi utilizado o coletor tipo tubo (Figura 24) com 8 termopares distribuídos ao longo do tubo, identificados sequencialmente pelos números 1 a 8, sendo 1 para o termopar posicionado na entrada do coletor e 8 para o termopar posicionado na sua saída.

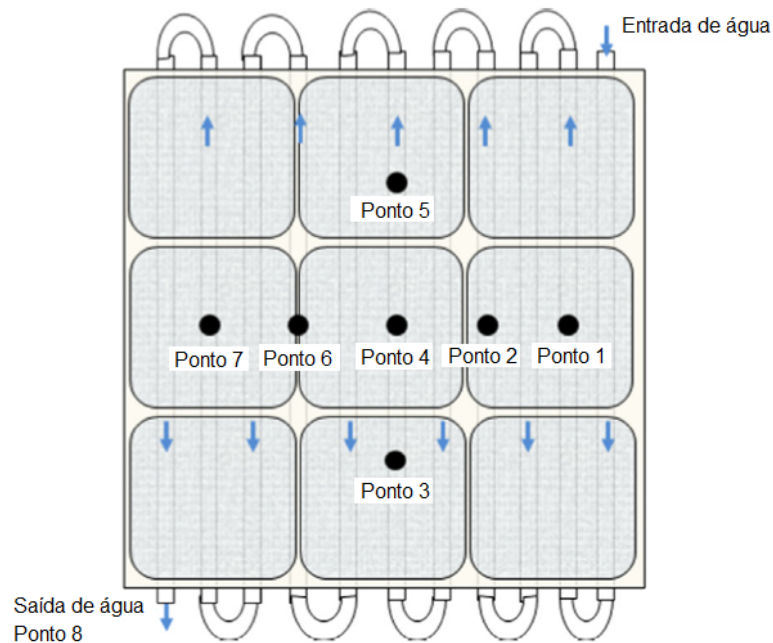


Figura 24 – Sistema FVT com coletor do tipo tubo.
Adaptado de: YIN *et al.*, (2013)

Após a coleta dos dados (Figura 25), os pesquisadores identificaram a presença de um significativo gradiente de temperatura ao longo do tubo. Ou seja, a temperatura nos termopares posicionados no final do tubo (termopares 6, 7 e 8) foi maior do que a temperatura na entrada do tubo (1, 2 e 3), resultando no comprometimento da eficiência elétrica das células sob maior temperatura de operação.

Uma forma mais sofisticada de se implementar um sistema FVT consiste em laminar todo o painel (superfície, células e isolamento elétrico) junto com o coletor solar formando uma única peça com diversos componentes integrados). Este processo, além de ser mais trabalhoso por demandar o domínio de todo um processo fabril, exige cuidados especiais para garantir o isolamento elétrico das células e evitar altas temperaturas, causando uma ligeira curvatura da peça devido aos diferentes coeficientes de dilatação (Zondag, 2008) (Chow, He, & Ji, 2006).

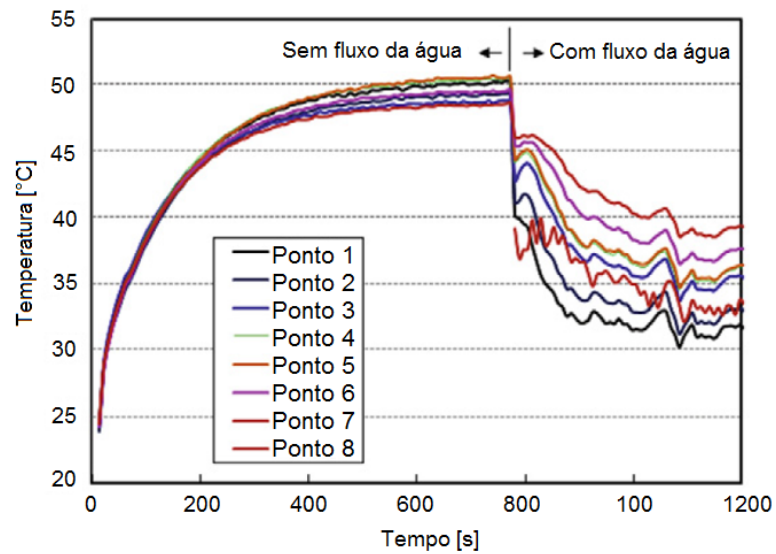


Figura 25 – Gradiente de temperatura ao longo do coletor tipo tubo.
Adaptado de: YIN *et al.*, (2013)

Na Figura 26 se observa a inserção de materiais destinados ao isolamento elétrico (gel de silicone) e térmico. A Figura 26-A é um exemplo de sistema FVT no qual a água para o resfriamento do painel FV circula por meio de tubos, e na Figura 26-B a água circula por meio de canais.

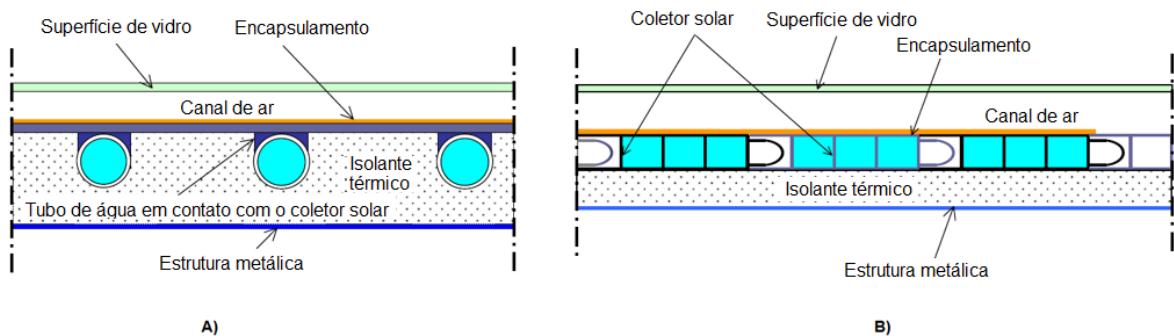


Figura 26 – Sistema FVT-água: A) coletor solar formado por tubos; B) coletor solar formado por canais.

Adaptado de: Chow, He, & Ji, (2006)

Outra característica que tem sido discutida nos artigos científicos é o não uso de uma cobertura de vidro no sistema FVT para se obter uma maior eficiência elétrica. Este foi justamente o problema identificado por Dupeyrat *et al.* (2011) descrito no subcapítulo 3.2. Neste sentido foram comparados dois sistemas FVT, com e sem cobertura de vidro, tendo como principais parâmetros de saída a eficiência térmica e elétrica (Figura 27) (Zondag, 2008).

Nesta Figura 27 se observa que o sistema FVT com cobertura de vidro tem um maior rendimento térmico e menor rendimento elétrico. Isto porque o vidro auxilia na

retenção do calor, mas reflete parte do espectro que poderia ser utilizado na conversão elétrica (Zondag, 2008). Ou seja, a escolha entre o uso ou não de uma cobertura de vidro no sistema FVT deve estar subordinada à necessidade do usuário. Se a prioridade for a geração de energia elétrica, é indicado o sistema FVT sem cobertura, caso contrário, o uso do vidro como cobertura é mais adequado.

Ainda referente à Figura 27, se verifica que ambos sistemas FVT apresentam um rendimento térmico abaixo do rendimento do coletor. Isto é consequência das seguintes características (Zondag, 2008):

- o silício cristalino tem uma maior absorvidade para o espectro entre 0,5 e 1,1 μm , e um baixo coeficiente de absorção da radiação solar para ondas longas, que são as aproveitadas na conversão térmica;
- como o silício tem uma alta reflexão, o mesmo é revestido com um material anti-reflexivo, que também filtra as ondas curtas das ondas longas;
- além destes motivos, parte da energia solar é convertida em energia elétrica.

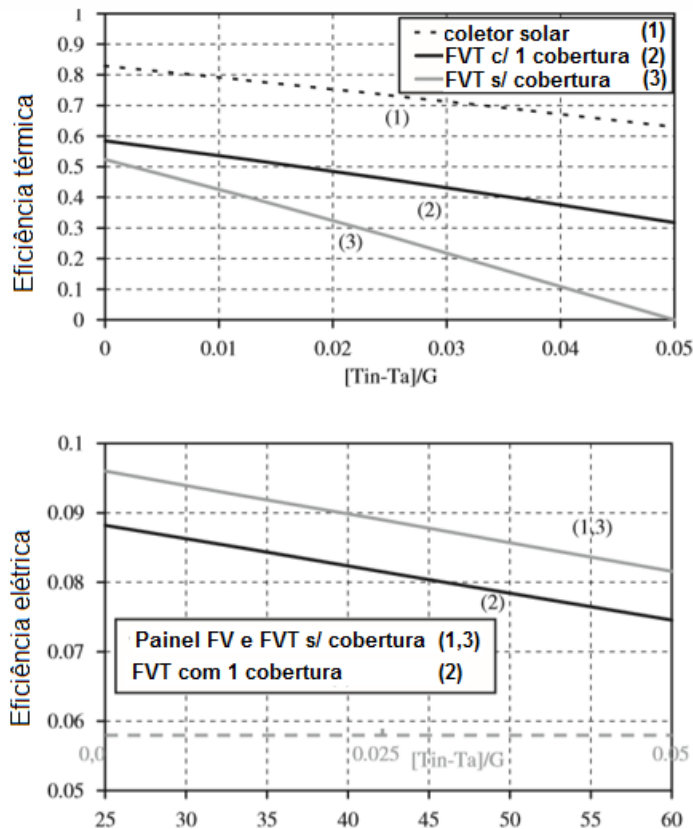


Figura 27 – Eficiência térmica e elétrica de dois sistemas FVT-água: com e sem cobertura de vidro

Sendo:

- T_{in} : temperatura do líquido do coletor;
- T_a : temperatura ambiente;
- G : irradiância = 800 W/m².

2.5 Painel fotovoltaico com materiais de mudança de fase

Materiais de mudança de fase (MMF) são substâncias capazes de absorver e armazenar energia térmica mantendo a temperatura do sistema estável durante a transição entre as fases. Devido a esta característica, os MMF são utilizados em aplicações que requerem a manutenção da temperatura de algum objeto ou ambiente de forma passiva, como nas paredes de edifícios para manter a temperatura mais baixa durante o dia e mais alta durante a noite (Huang, Eames, & Norton, Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials, 2004). Recentemente, a integração dos MMF nos painéis FV tem sido estudada com o as propostas de:

- retardar o aquecimento dos painéis FV nos momentos de máxima irradiância solar;
- armazenar a energia térmica do sistema e disponibilizar esta energia térmica para o pré-aquecimento da água, ambientes, entre outras.

O uso de MMF em painéis FV será chamado nesta tese de FV-MMF.

No desenvolvimento experimental realizado por Browne, Norton, & McCormack (2016) foi comparada a temperatura de um painel FV com um sistema FV-MMF. Após a coleta dos resultados ao longo de 3 dias, sob condições climáticas da Irlanda com irradiância superior a 800 Wm^{-2} em todos os dias, se observou a capacidade do MMF em retardar o aumento da temperatura de operação do painel FV durante o dia. Na Figura 28 pode-se observar que o sistema FV-MMF operou com uma temperatura inferior a de um painel FV convencional em aproximadamente 5°C durante o dia; e durante a noite, período com pouca ou nenhuma produção de energia elétrica (18h00 até 06h00), a temperatura do sistema FV-MMF foi maior, disponibilizando esta energia térmica para o aquecimento da água e ambientes.

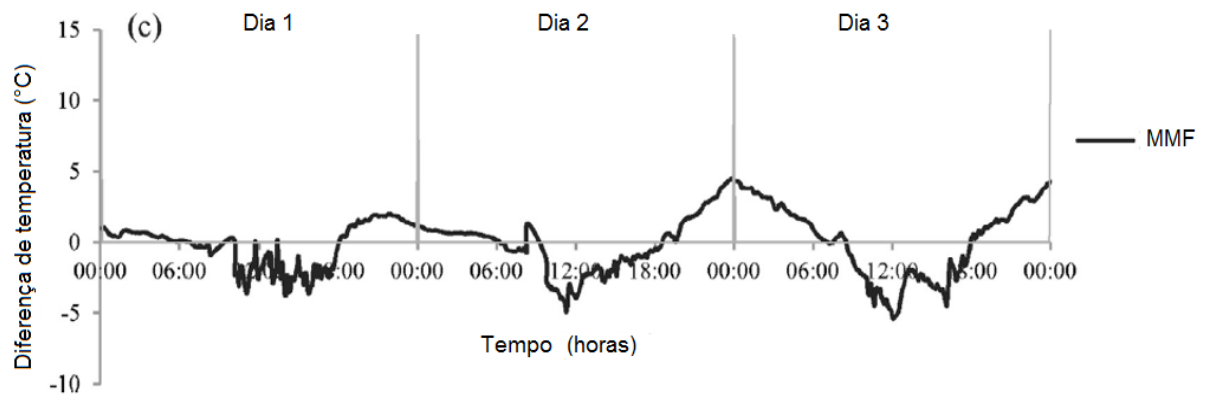


Figura 28 – Diferença entre a temperatura de operação de um sistema FV-MMF com um painel FV
Adaptado de: Browne, Norton, & McCormack (2016)

2.5.1 Tipos de MMF

Os MMFs são divididos em três categorias:

- orgânicos: parafina, ácidos graxos, cêras e álcoois;
- inorgânicos: sais hidratados;
- eutéticos: misturas orgânicas ou inorgânicas.

Dentre os orgânicos, a parafina é a mais utilizada para o gerenciamento térmico dos painéis FV, pois apresenta excelente estabilidade térmica ao longo dos ciclos de fusão e solidificação. Entretanto, é um material mais caro e possui baixa condutividade térmica (Atkin & Farid, 2015).

MMF inorgânicos possuem menor estabilidade térmica do que os orgânicos, o que pode ser um problema para aplicações FV onde as mudanças de fase são diárias. Apesar disso, eles possuem as vantagens de serem materiais mais baratos e não inflamáveis (Atkin & Farid, 2015).

2.5.2 Modelo matemático dos sistemas FV-MMF

As equações que governam os sistemas FV-MMF levam em consideração não apenas a energia elétrica produzida, mas também a energia térmica armazenada (Hasan A. , McCormack, Huang, & Norton, 2014) (Huang, Eames, & Norton, 2006).

A Equação

(15) apresenta o balanço energético do sistema FV-MMF com a inclusão da energia armazenada pelo material (Huang, Eames, & Norton, 2006).

$$\tau\alpha G\Delta t = n_c G\Delta t + U_L(T_{FV} - T_a)\Delta t + Q_S \quad (15)$$

Sendo:

τ : transmitância do vidro;

α : taxa de absorção da irradiância do painel FV;

n_c : eficiência elétrica da célula FV;

T_{FV} : temperatura do painel FV ($^{\circ}\text{C}$);

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

G : irradiância solar no painel fotovoltaico (Wm^{-2});

Δt : intervalo (s);

U_L : coeficiente global das perdas térmicas ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$);

Q_S : energia armazenada no sistema (J);

A obtenção da energia armazenada deve ser determinada de acordo com a temperatura momentânea do painel, conforme a Equação (16), Equação (17) e Equação (18). Nessas equações foram assumidas algumas simplificações por serem consideradas pouco relevantes para a proposta, como é o caso da manutenção do calor específico constante do MMF no estado líquido e sólido (Huang, Eames, & Norton, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics, 2006).

$$Q_S = mc(T_{FV} - T_a), \quad T_a < T_{FV} < T_m \quad (16)$$

$$Q_S = mc(T_m - T_a) + H, \quad T_m \leq T_{FV} < T_m + \Delta T_{transição} \quad (17)$$

$$Q_S = mc(T_m - T_a) + H + mc(T_{FV} - T_m), \quad T_{FV} \geq T_m \quad (18)$$

Onde:

T_{FV} : temperatura do painel fotovoltaico ($^{\circ}\text{C}$);

T_a : temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

T_m : temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$);

$\Delta T_{transição}$: faixa de temperatura de transição na mudança de fase ($^{\circ}\text{C}$);

m : massa (kg);

c : calor específico ($Jkg^{-1}K^{-1}$);

H : calor latente do MMF (J);

2.5.3 Quesitos para sistemas FV-MMF

Existem algumas propriedades dos MMF destinados aos sistemas FV que são consideradas ideais. Essas propriedades seguem apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características dos MMF consideradas ideais para sistemas FV
Adaptado de: (MA et al., 2015; STROPNIK e STRITH, 2016)

Propriedades	Requisitos
Térmica	Alta capacidade térmica
	Alta condutividade térmica
	Mudança de fase reversível
	Ponto de fusão estável
	Ajuste da temperatura de fusão
Física	Baixa expansão volumétrica
	Alta massa específica
Química	Estabilidade térmica e física
	Não corrosivo
	Não inflamável
Econômica	Abundante
	Rápido ROI
Ambiental	Reciclável
	Sem odor

Com base nas propriedades dos MMF (Tabela 7) e nas características dos sistemas FV-MMF, os elementos mais relevantes para análise são: expansão volumétrica; estabilidade térmica e física; ajuste de temperatura de fusão; estrutura do sistema FV-MMF; e espessura do MMF. Por serem consideradas mais importantes, estas características são descritas de forma mais detalhada a seguir.

2.5.3.1 Expansão volumétrica

Como o MMF sofre, periodicamente, a mudança de fase para o estado líquido, ele deve ser acomodado em uma estrutura fechada, como um reservatório, para que não ocorra seu vazamento. Por isto, uma variação significativa em seu volume, do estado sólido para o estado líquido, pode resultar em aumento da pressão interna dentro do reservatório, comprometendo sua estrutura. O ideal é que o MMF usado no sistema FV possua pouca variação volumétrica na transição entre as fases sólida e líquida.

2.5.3.2 Estabilidade térmica e física

Quando operado sob condições adequadas, a vida útil de um painel FV é superior a 25 anos (com 80% da potência nominal).

Ao integrar o MMF em um painel FV, é importante que o material mantenha suas características térmicas e físicas ao longo dos 25 anos (aproximadamente 9.125 ciclos de fusão e solidificação) ou o mais próximo possível da vida útil do painel. Por isso, alguns estudos de MMF com potencial aplicação para sistemas FV se dedicam a capacidade destes materiais de manterem suas características ao longo dos ciclos.

Como exemplo desses estudos, Sari e Karaipekli (2008) se propuseram a analisar experimentalmente o comportamento térmico e físico do ácido cáprico e palmítico com vistas a aplicações em painéis FV. Após 5.000 ciclos de solidificação-liquefação destes materiais, não foram identificadas alterações significativas em suas propriedades térmicas e físicas (Figura 29). Lembrando que 5.000 ciclos representam mais de 13 anos de vida útil, e que os painéis FV apresentam uma vida útil superior a 25 anos, é interessante, futuramente, se realizar um estudo da vida útil destes materiais em prazos mais longos.

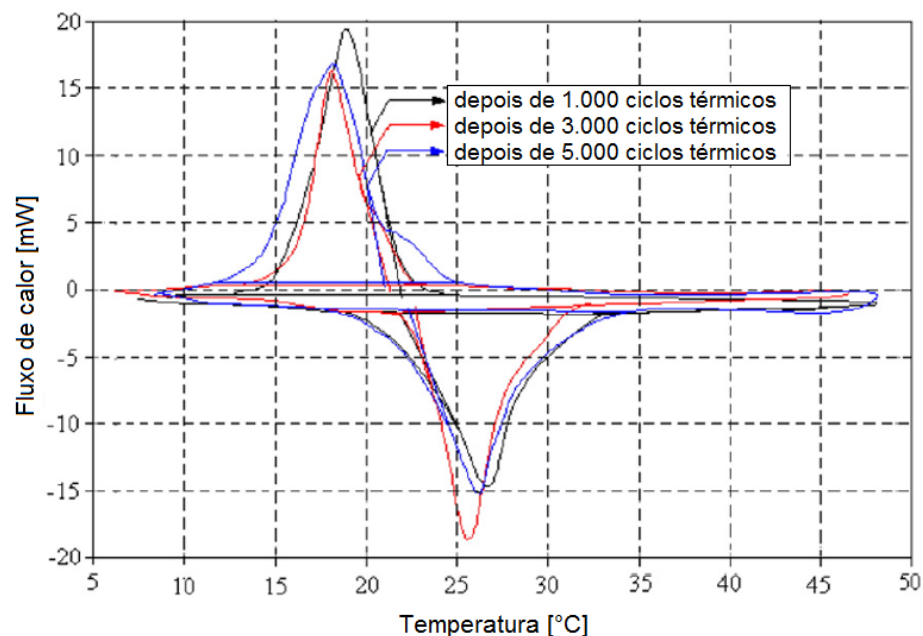


Figura 29 – Análise das propriedades térmicas e físicas do ácido cáprico e palmítico como MMF no decorrer de 5.000 ciclos
Adaptado de: Sari & Karaipekli (2008)

2.5.3.3 Ajuste da temperatura de fusão

Na proposta do uso do MMF para melhorar a eficiência dos painéis FV, é fundamental conhecer as características climáticas do local de instalação e, principalmente, a temperatura média de operação do painel, pois a temperatura de fusão do MMF deve estar dentro desta faixa de operação.

Isto faz com que as atuais pesquisas por MMF destinados a aplicações FV tenham como critério os novos materiais capazes de ter sua temperatura de fusão ajustada, através da sua composição química, afim de adaptá-los ao clima local e às condições de operação do painel.

Sari, Biçer *et al.* (2010) propuseram o uso da glicerina com os seguintes ácidos graxos para o ajuste da sua temperatura de fusão: ácido mirístico (formando o glycerol trimyristate), ácido palmítico (formando o glycerol tripalmitate) e o ácido esteárico (formando o glycerol tristearate). Com esta mistura foi possível ajustar a temperatura de fusão destes ácidos graxos para valores a partir de 31,92°C.

Na Figura 30-a pode observar que os ácidos graxos possuem uma temperatura de fusão mais elevada (superior a 45°C). Com a mistura da glicerina, foi possível diminuir a temperatura de fusão dos ácidos graxos para valores mais baixos, principalmente do ácido trimyristate, conforme apresentado na Figura 30-b.

Além disto, os ésteres de ácidos graxos apresentaram significativo potencial como MMF em painéis FV devido: à sua condutividade térmica (quando acrescidos com 5% de grafite); estabilidade térmica; preservação da estrutura química; estabilidade das propriedades térmicas e físicas após 1000 ciclos de fusão e solidificação; e baixo custo da glicerina (características já mencionadas na Tabela 7).

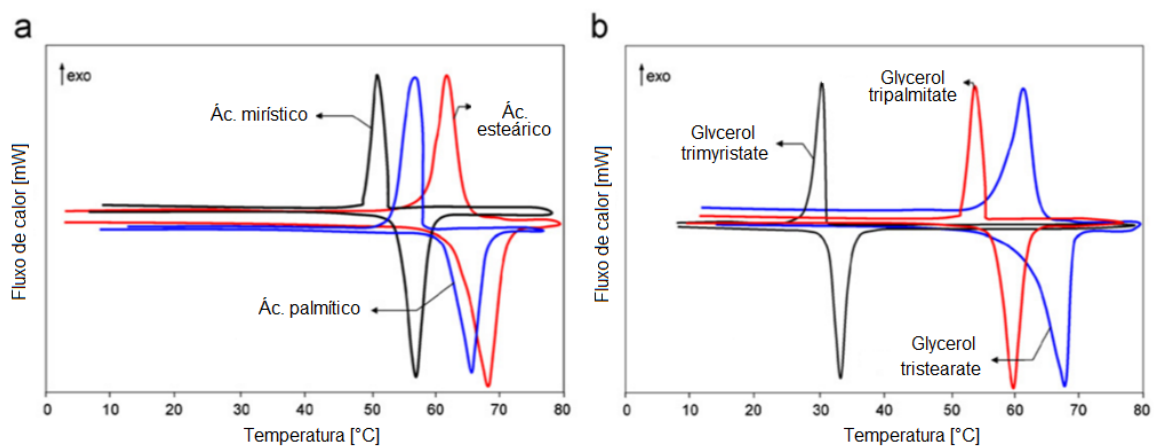


Figura 30 – Análise em DSC dos pontos de fusão e solidificação de: ácidos graxos (a); ésteres de ácidos graxos (b)

Adaptado de: (Sari, Biçer, Karaipekli, Alkan, & Karadag, 2010)

Quando a temperatura de fusão e solidificação de um MMF não é adequadamente ajustada para as características de um dado ambiente, podem surgir dois problemas principais:

- o MMF não atinge a temperatura de fusão e, com isto, perde sua capacidade de armazenamento da energia térmica do sistema;
- ou o MMF atinge a temperatura de fusão mas, durante a noite, não consegue resfriar completamente e reinicia um novo ciclo de irradiação com uma temperatura acima da temperatura ambiente, conforme Figura 31.

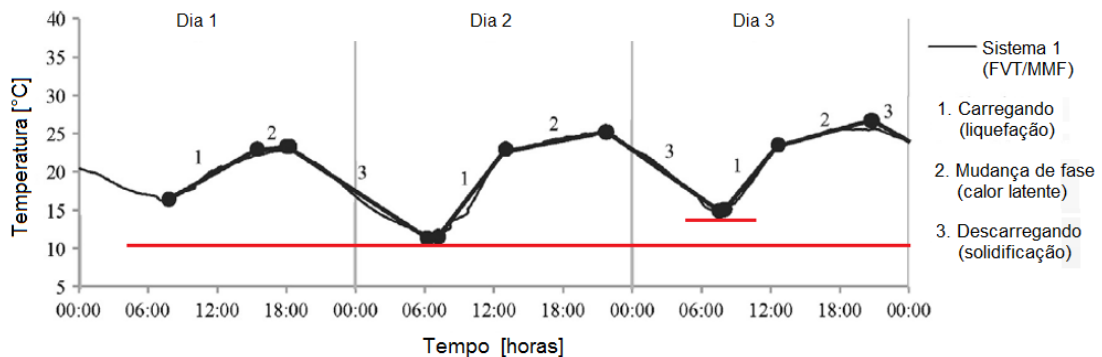


Figura 31 – Sistema FV com MMF com características inadequadas para o ambiente de operação
Adaptado de: Browne, Norton, & McCormack (2016)

O ideal é que, durante a noite, o MMF transfira para o meio toda a sua energia armazenada durante o dia, conforme se pode observar na Figura 32 publicada por (Hasan, Alnoman, & Rashid, 2016).

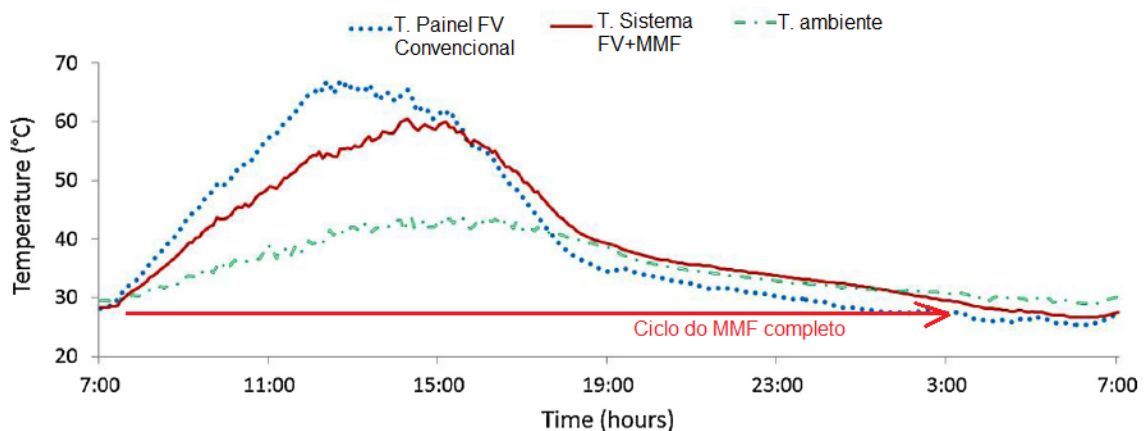


Figura 32 – Sistema FV com MMF com características inadequadas para o ambiente de operação
(Ciclo completo do MMF)
Adaptado de: Hasan, Alnoman, & Rashid (2016)

Conforme citado por Park, Kim e Leigh (2014), o fato da temperatura de operação do painel FV ter forte influência na sua eficiência elétrica, e esta temperatura ser resultado, principalmente, de componentes variáveis ao longo do tempo (instáveis), como irradiância, temperatura ambiente e ventilação, isto faz com que a determinação da melhor temperatura de fusão do MMF seja uma tarefa difícil e demorada. Por isto, o desenvolvimento de um ambiente *indoor* com controle de irradiância, temperatura ambiente e ventilação se tornaram fundamentais para a proposta desta tese.

2.5.3.4 Estrutura do sistema FV-MMF

Outra importante característica para aumentar a eficiência em sistemas FV-MMF é a estrutura física do conjunto, principalmente em relação aos recursos utilizados para melhorar a troca de calor entre o painel e o MMF.

Huang, Eames e Norton (2006) testaram 4 configurações (4 diferentes estruturas físicas) do sistema FV-MMF. Para avaliar as 4 configurações sob as mesmas condições, foi utilizado um ambiente de testes, *indoor*, com uma lâmpada halógena com potência de 1000 W para simular a irradiância solar e aquecer o painel. Neste experimento o ambiente de testes proporcionou uma irradiância de 750 Wm^{-2} com variação no espaço desejado de $\pm 3\%$. Entretanto, neste projeto não foi utilizado um painel FV, apenas uma placa de alumínio para simular um painel com dimensões reduzidas (0,3 x 0,13 m).

Os resultados importantes desta pesquisa foram:

- Dentre as 4 configurações do sistema FV-MMF, as que apresentaram melhores resultados na diminuição da temperatura do sistema foi, nesta ordem (Figura 33): base de alumínio com MMF e 31 aletas igualmente espaçadas; base com apenas MMF; base com apenas 11 aletas igualmente espaçadas; e base simples de alumínio sem nenhum recurso para resfriamento;
- Ao se comparar diferentes configurações de aletas para melhorar a convecção entre o painel e o MMF, foi identificado que: a quantidade de aletas é fundamental para um melhor desempenho do sistema; mas que espaçamento entre aletas menores do que 8 mm não apresentam melhorias significativas (Figura 34). Conforme citado por (Du, Darkwa, &

Kokogiannakis, 2013), a configuração das aletas é crucial para a eficiência elétrica e térmica de sistemas FV-MMF.

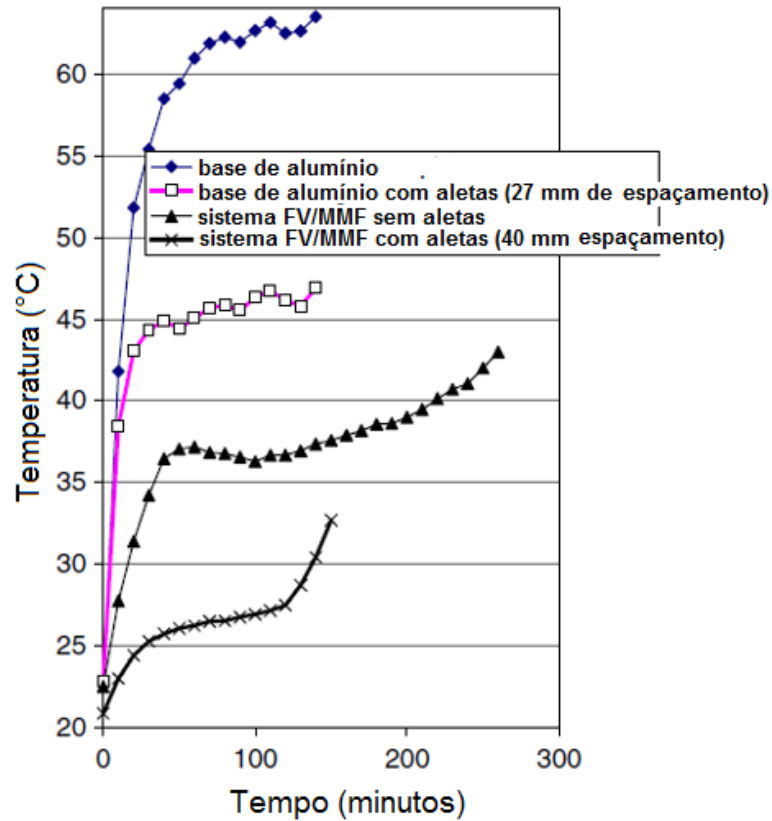


Figura 33 – Comparação entre 4 configurações para diminuir a temperatura de painéis FV. Adaptado de: Huang, Eames, & Norton (2006)

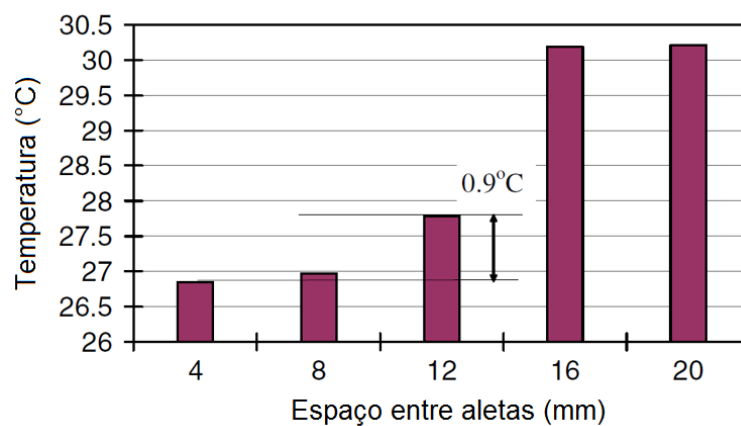


Figura 34 – Comparação entre configurações de aletas para melhorar a convecção entre o painel FV e o MMF.

Fonte: Huang, Eames, & Norton (2006)

- MMF em forma granulada apresenta pior desempenho devido à formação dos espaços de ar entre os grânulos, impactando negativamente na condução térmica do material;
- a convecção do sistema é melhor quando se opta pelo uso de aletas de alumínio no lugar de uma matriz de fita de alumínio ou de fio (Figura 35);
- em um teste realizado em ambiente aberto, se verificou que apenas no final do dia o painel FV com MMF apresenta uma menor eficiência do que o painel sem MMF, pelo fato do MMF demandar mais tempo para o resfriamento.

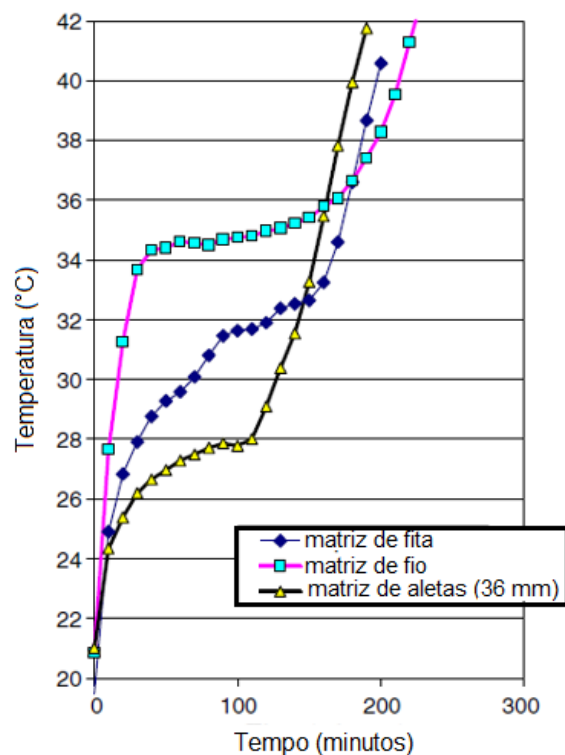


Figura 35 – Comparação entre aletas e matrizes para aumentar a convecção entre o painel FV e o MMF.

Fonte: Huang, Eames, & Norton (2006)

2.5.4 Espessura do MMF

A espessura do MMF utilizada para controlar a temperatura do painel FV também é um quesito muito importante para a obtenção de resultados significativos, e isto varia de acordo com a capacidade térmica de cada substância utilizada.

Por exemplo, Indartono, Prakoso *et al.* (2015) propuseram o uso de óleo palmítico como MMF de um sistema FV. Através de simulação, encontraram a

espessura ideal para o controle de temperatura dos painéis, cujos resultados são apresentados na Figura 36. De acordo com a figura, observa-se que a partir de 80 mm, o incremento na espessura do MMF já não apresenta vantagens significativas no controle da temperatura, tornando esta espessura o valor ótimo para o uso do óleo palmítico.

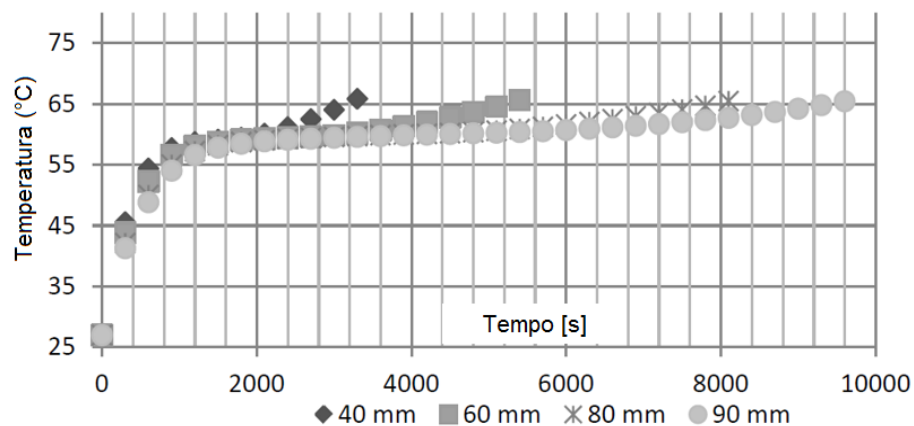


Figura 36 – Simulação dos resultados obtidos no controle da temperatura de um painel FV de acordo com a espessura do MMF utilizado
Adaptado de: (Indartono, Prakoso, Suwono, Zaini, & Fernaldi, 2015)

Da mesma forma, (Handricks & Sark, 2013) propuseram um estudo com o uso dos MMFs em aplicações BIPV. Foram simuladas diversas espessuras de MMF afim de se verificar sua correlação na melhoria da eficiência dos sistemas BIPV. Conforme era esperado, se verificou a correlação direta do aumento da espessura do MMF com o controle térmico dos painéis FV. Entretanto, conforme se pode observar na Figura 37, o MMF atingiu sua capacidade térmica máxima por volta do meio dia, evidenciando a necessidade de que:

- os MMF para aplicações FV devem possuir uma grande capacidade térmica;
- possuir um volume significativo por unidade de área (m^2), para armazenar o máximo de energia possível ao longo do dia.

Após um estudo criterioso sobre MMF, verificou-se que ainda existe uma resistência ao uso desses materiais destinados ao gerenciamento térmico dos painéis FV devido ao seu alto custo e sua baixa temperatura de fusão. Neste sentido, a base glicerizada foi considerada um dos materiais mais promissores para esta aplicação devido:

- ao seu baixo custo no Brasil;

- larga faixa de ajuste de temperatura quando misturado com outros materiais;
- estabilidade térmica e física;
- baixa variação volumétrica durante a mudança de fase;
- atóxica;
- não corrosiva.

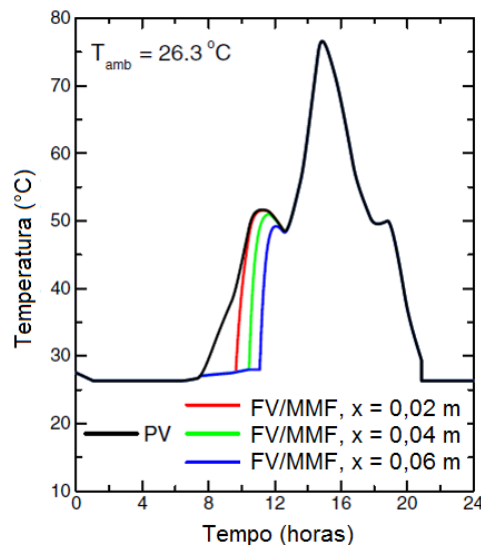


Figura 37 – Simulação para diferentes valores de espessura do MMF em um sistema FV-MMF sob condições reais de irradiação
Adaptado de: (Handricks & Sark, 2013)

A partir de uma revisão bibliográfica das tecnologias adotadas para o controle ou diminuição da temperatura dos painéis FV, tais como FVT e FV-MMF, Ma, Yang *et al.* (2015) concluíram que essas tecnologias são limitadas pela: baixa condutividade; alto investimento inicial ou custo de manutenção; baixo rendimento no resfriamento do painel; e altas temperaturas. Eles também observaram que, especificamente no caso do sistema FV-MMF, a melhoria no rendimento é pequena quando comparado ao custo dos MMF, resultando ainda mais em um longo período para o ROI. Além disto, no sistema FV-MMF, a energia térmica do sistema não é aproveitada, o que pode ser considerado um desperdício em países onde há a necessidade de aquecimento de ambientes ou aquecimento da água, como é o caso da maioria das regiões do Brasil.

Diante disto, recentemente alguns estudos tem direcionado esforços para integrar os sistemas FV-MMF com o FVT, com o objetivo de melhorar a eficiência dos painéis FV e, ao mesmo tempo, aproveitar a energia térmica para o pré aquecimento

da água, aumentando, desta forma, o seu rendimento global (energia elétrica e térmica) e reduzindo o período para o ROI desta tecnologia. E é justamente nesta linha que esta pesquisa desenvolveu um sistema FVT com MMF usando a base glicerizada.

2.6 Sistema fotovoltaico-térmico com materiais de mudança de fase (FVT-MMF)

Durante o estudo sobre novas tecnologias para o gerenciamento térmico, os sistemas FVT e os MMF têm demonstrado significativo potencial para a melhoria da eficiência elétrica FV.

Um dos problemas identificados nos sistemas FVT-água é a necessidade de um grande volume de água para acumular o calor gerado pelos painéis FV durante o dia. E, além disto, armazenar esta energia térmica durante horas, até o período da noite, no qual há uma maior demanda pela água aquecida.

Por outro lado, os MMF possuem a capacidade de armazenar a energia térmica, por unidade de volume, entre 5 a 14 vezes mais que os demais materiais como a água (ISLAM *et al.*, 2016).

Além da sua capacidade térmica, os MMF são ideais para realizar o “*shifting time*” necessário nos sistemas FVT. Ou seja, entregar a energia térmica, produzida durante o dia, no período da noite, onde há uma maior demanda pela água aquecida ou o aquecimento de ambientes.

Após um criterioso estudo realizado por Islam, *et al.* (2016), observou-se que os sistemas FVT-MMF tem uma capacidade térmica até 50% maior que apenas os sistemas FVT-água, e prolonga o tempo de armazenamento da energia térmica em até 100%, resultando em um aumento da potência de saída de até 9%.

Diante do que foi apresentado, entende-se o MMF como um grande potencial para realizar a interface entre os painéis FV e o coletor solar, por meio da sua grande capacidade térmica e o deslocamento de fase “*shifting time*”. Por isto, nesta tese foi desenvolvido e avaliado um sistema FVT-MMF com o uso da base glicerizada.

Em 2017 Sardarabadi *et al.* (2017) publicaram o resultado de um estudo experimental comparando a eficiência elétrica entre um painel fotovoltaico (como referência), um sistema FVT-água e um sistema FVT-MMF. Conforme se pode observar na Tabela 8 e Figura 38, o sistema FVT-MMF teve o melhor desempenho durante todo o período de 8h de análise, resultando em aumento na eficiência elétrica

média de aproximadamente 13% em relação ao painel FV. Em segundo lugar ficou o sistema FVT resfriado pela água. Na Tabela 8 o termo exergia significa a energia a energia máxima que cada um dos sistemas pode produzir.

Tabela 8 - Comparação detalhada entre: painel FV; sistema FVT; e sistema FVT-MMF
Adaptado de: (SARDARABADI *et al.*, 2017)

Exergia do sistema	FV	FVT	FVT-MMF
Exergia de entrada (Sol) (W/m ²)	845,42	845,42	845,42
Exergia térmica de saída (W/m ²)	0	4,21	7,37
Exergia elétrica de saída (W/m ²)	92,16	99,23	103,99
Exergia total de saída (W/m ²)	92,16	103,44	111,36
Eficiência da exergia total (%)	10,9	12,23	13,17

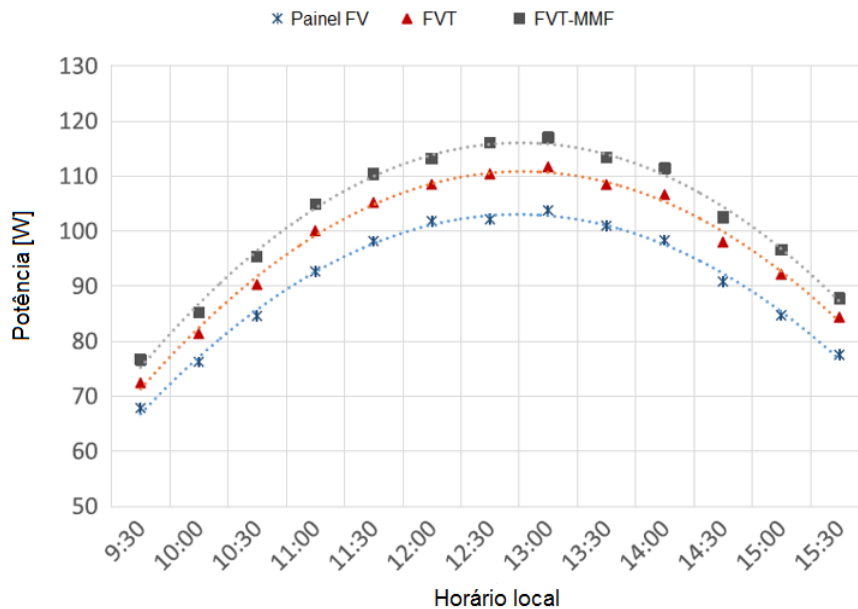


Figura 38 – Comparação entre a potência do: painel FV; sistema FVT; e sistema FVT-MMF
Adaptado de: (SARDARABADI *et al.*, 2017)

O recente projeto publicado por Klugmann-Radziemska e Wcisto-Kucharek (2017) desenvolveram um sistema FVT-MMF e o avaliaram em ambiente indoor, usando o Simulador Solar HL 313.01 da empresa Gunt Hamburg. Na avaliação foram realizadas diversas modificações na espessura do MMF e no fluxo da água para se obter o melhor resultado. De acordo com a Figura 36, o melhor resultado foi obtido com 4 cm de espessura do MMF e fluxo da água de 80 dm³ por hora.

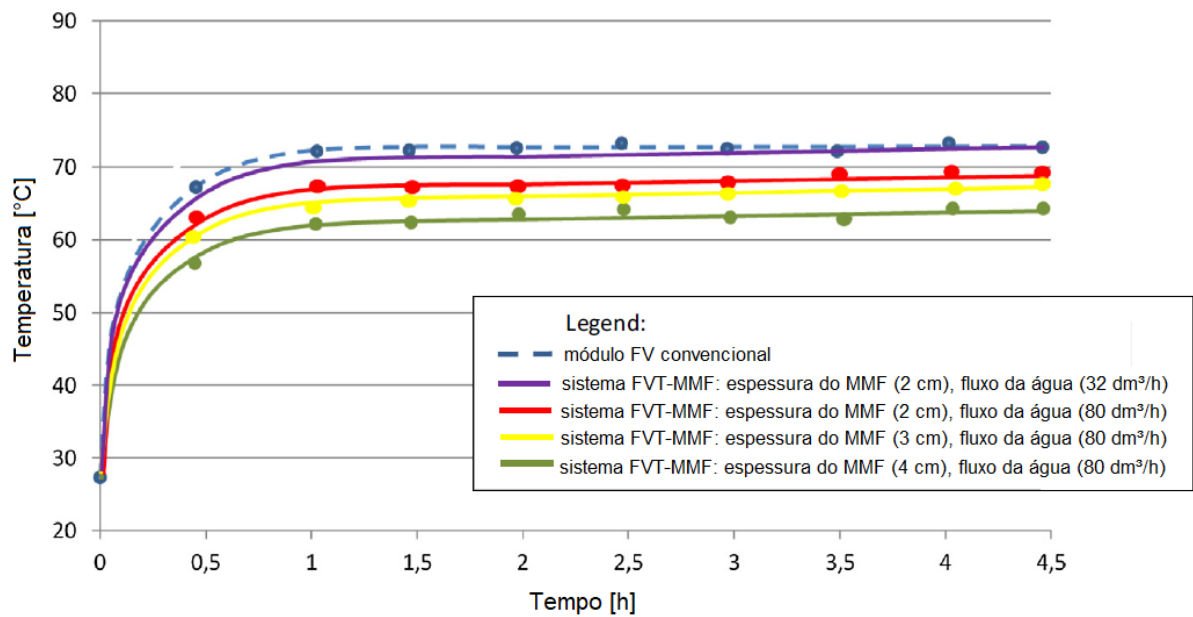


Figura 39 – Comparação entre sistemas FV e FVT-MMF com diferentes configurações
Adaptado de: (Klugmann-Radziemska & Wcisto-Kucharek, 2017)

Preet, Bhushan, & Mahajan, (2017) avaliaram um sistema FVT-MMF usando parafina. Nesta avaliação, eles compararam a tensão de circuito aberto do sistema com um painel FV convencional e um sistema FVT. A Figura 40 apresenta o resultado desta comparação, no qual o sistema FVT teve uma tensão de circuito aberto média 21,27% superior a do painel convencional, e a tensão média do sistema FVT-MMF foi 32,5% superior a do painel convencional.

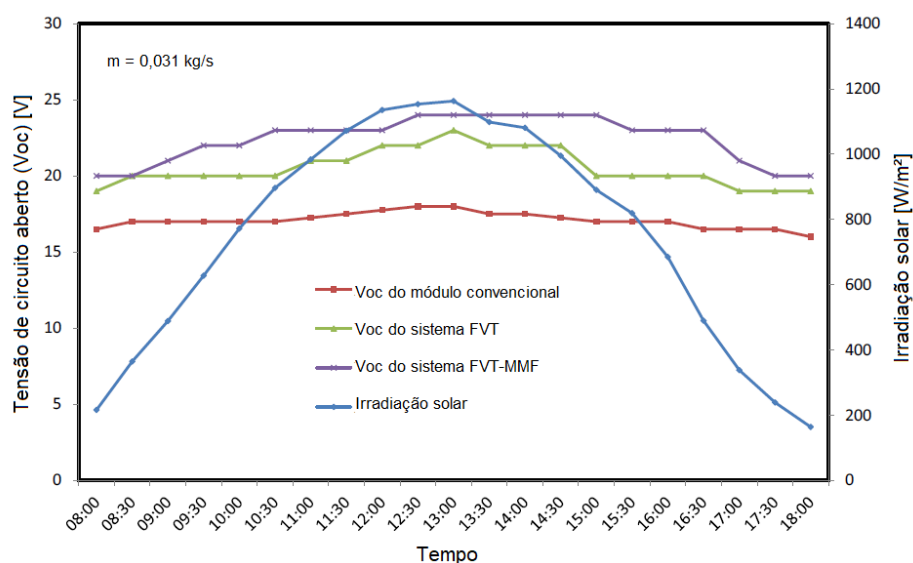


Figura 40 – Comparação entre a tensão de circuito aberto (V_{oc}) do painel FV em três configurações: painel FV convencional, sistema FVT e sistema FVT-MMF
Adaptado de: Preet, Bhushan, & Mahajan, (2017)

2.7 Avaliação de sistemas fotovoltaicos em ambiente indoor

Conforme se pode observar nos diversos estudos que visam à melhoria da eficiência FV, tais como BIPV, FVT ou mesmo FV-MMF, grande parte das avaliações são realizadas em ambiente *outdoor*, influenciadas pelas adversidades climáticas como: diferentes condições de irradiância durante o dia e posicionamento do Sol durante o ano; sombras parciais devido às nuvens; variação da temperatura; e variação da velocidade do vento.

Conforme observado por Skoplaki e Palyvos (2009) e já mencionado neste trabalho, as condições climáticas durante os testes são determinantes e requerem especial atenção na predição da eficiência FV. Assim como Pó (2011) observou, para que um teste de eficiência FV seja realizado em ambiente *outdoor* com a confiabilidade esperada, a temperatura não deve variar 2 K e a irradiância e velocidade do vento devem ser praticamente constantes. De acordo com Peng, Lu, *et al.* (2015), é possível obter resultados em ambiente *outdoor* com quase a mesma precisão que os obtidos em *indoor*, mas a maior diferença está no tempo significativamente mais curto para realizar tais avaliações em ambiente *indoor*, uma vez que não é necessário esperar as condições ideais de irradiância, temperatura e ventilação.

Como exemplo disto, (Yin, Yang, Kelly, & Garant, 2013) realizaram um estudo experimental *outdoor* e *indoor* sobre a eficiência elétrica de um sistema FVT. Após a coleta dos dados, os pesquisadores mencionaram que apenas os resultados obtidos *indoor* foram apresentados no artigo, devido à estabilidade das variáveis no ambiente, uma vez que em ambiente *outdoor* a eficiência elétrica do painel variou significativamente devido à presença das nuvens, mudança na temperatura ambiente e outros fatores.

Existem empresas especializadas na construção de ambientes *indoor* para a avaliação dos painéis FV. O Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da PUCPR solicitou um orçamento em 2013 para a aquisição de um destes ambientes, entretanto, o custo de um sistema básico ficou acima de 176.000 euros. Além disto, embora este ambiente seja apropriado para avaliação dos painéis FV dentro do padrão STC, ele não atende às necessidades deste projeto, pois a radiação de luz sobre o painel é feita por breves flashes usando lâmpadas de xenon, justamente para evitar o efeito térmico sobre a eficiência FV.

Diante disto, a primeira iniciativa no desenvolvimento deste trabalho, que visa à melhoria da eficiência FV pelo gerenciamento térmico através de um sistema FVT-MMF, foi propor e desenvolver um ambiente de testes, *indoor*, capaz de controlar e simular algumas das condições ambientais mais impactantes na sua eficiência, como irradiância, temperatura, inclinação do painel e velocidade do vento com o menor número de incertezas possíveis.

Doravante, este ambiente *indoor* será chamado de Simulador Solar.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo está dividido entre os supcapítulos: desenvolvimento do simulador solar; avaliação do sistema de irradiância; desenvolvimento do sistema de ventilação; avaliação do sistema de ventilação; avaliação do simulador solar com módulo FV; e resultados da avaliação do simulador solar.

3.1 Desenvolvimento do Simulador Solar

O projeto e desenvolvimento do Simulador Solar foi dividido nas seguintes etapas: Projeto e desenvolvimento conceitual; Desenvolvimento do sistema de irradiância; Avaliação do sistema de irradiância; Desenvolvimento do sistema de ventilação; Avaliação do sistema de ventilação; Avaliação do Simulador Solar com painel FV; Resultados da avaliação do Simulador Solar.

3.1.1 Projeto e desenvolvimento conceitual

O Simulador Solar foi construído com as seguintes dimensões: 1250 x 1850 x 2100 mm (largura x comprimento x altura), para que pudesse avaliar a maioria dos painéis FV disponíveis comercialmente (Figura 41).

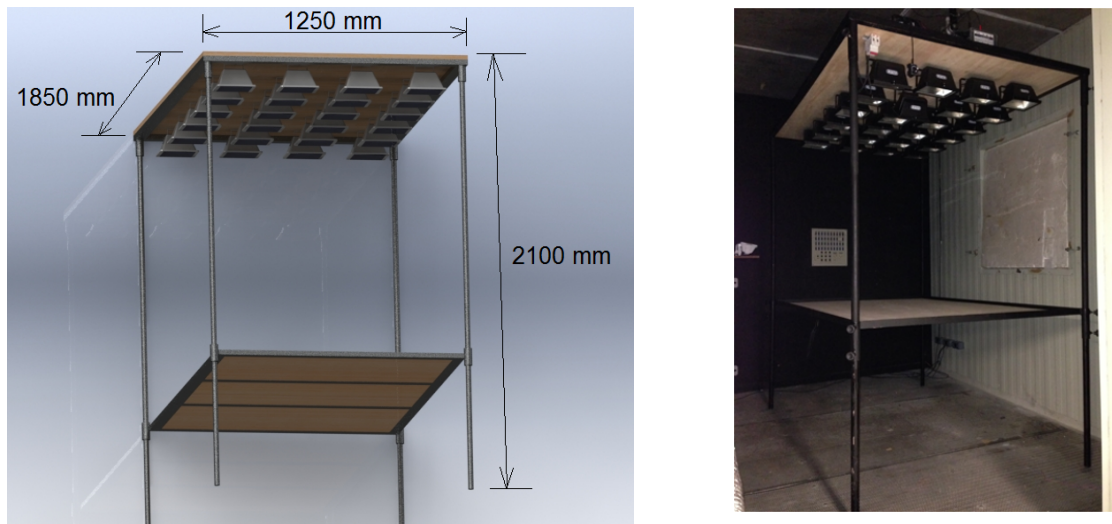


Figura 41 – Projeto e desenvolvimento da estrutura do Simulador Solar

No Simulador a irradiância é gerada por um conjunto de lâmpadas halógenas dispostas na forma de uma matriz 4 x 6, totalizando 24 lâmpadas de 300 a 500W, conforme será detalhado a seguir (Figura 42). Optou-se por esta quantidade de lâmpadas para que não houvesse grandes espaços entre elas, o que pode gerar regiões com baixa irradiância na superfície do painel.



Figura 42 – Simulador Solar: arranjo com 24 refletores dispostos em forma de matriz 4x6.

As lâmpadas foram alimentadas com tensão de 220 V para evitar perdas significativas de potência por efeito Joule nos condutores e reduzir os gastos com sobredimensionamento dos condutores e dispositivos de proteção (disjuntores).

Na alimentação do circuito elétrico foi instalado um controlador de potência por PWM (*pulse-width modulation*) com tensão e potência máxima de 220 V-12 kW com o objetivo de controlar a potência das lâmpadas e, conseqüentemente, a irradiância incidente na superfície do painel (Figura 43).

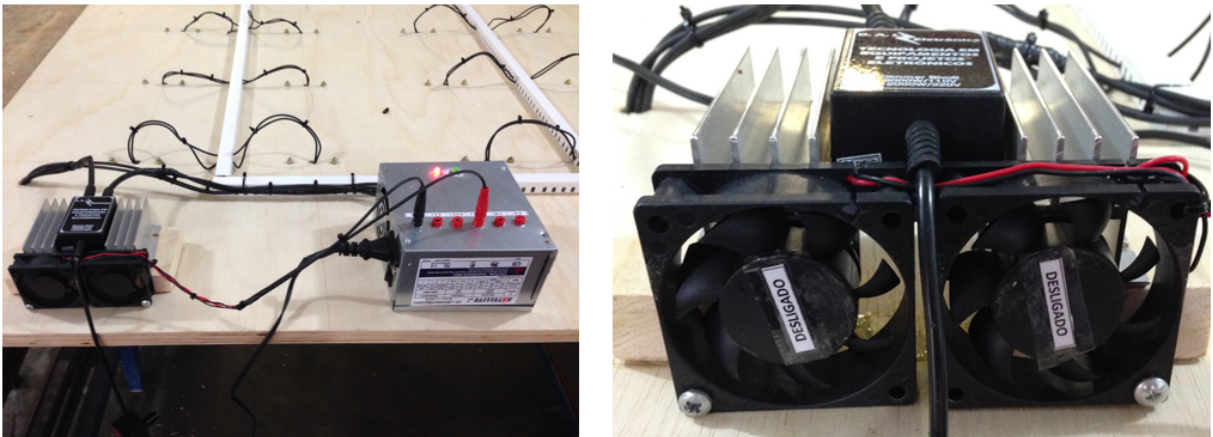


Figura 43 – Dimmer para controle da irradiância no Simulador Solar.

Por último, o Simulador Solar foi montado dentro da câmara climatizada do LST da PUCPR (Figura 44), que possui as seguintes características:

- Dimensões (m): 3,0 x 3,0 x 3,0;
- faixa de temperatura (°C): -10 a 65;
- faixa de umidade (%): 10 a 95.



Figura 44 – Simulador Solar instalado na câmara climatizada do LST da PUCPR.

3.1.2 Desenvolvimento do sistema de irradiância

No sistema de irradiância artificial, a escolha das lâmpadas adequadas foi uma etapa importante. Nesta etapa foram estabelecidos os seguintes requisitos:

- o espectro da lâmpada deve ser o mais próximo possível do espectro da irradiância solar, com uma banda sendo transformada em energia elétrica e a outra em energia térmica;
- a potência das lâmpadas deve ser suficiente para:
 - provocar um aquecimento significativo no painel;
 - gerar uma irradiância variável de até $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

No primeiro requisito, após uma pesquisa comparando o espectro das diferentes lâmpadas disponíveis, se optou por utilizar lâmpadas halógenas por apresentar um espectro mais próximo da irradiância solar. Minnaert e Veelaert (2014) realizaram um estudo comparativo entre diversas lâmpadas para finalidades FV em ambiente *indoor*, cujo resultado apontou as lâmpadas incandescentes e halógenas como a melhor solução. Na Figura 45 são comparados os espectros da lâmpada halógena com a irradiância solar e com outras lâmpadas incandescentes.

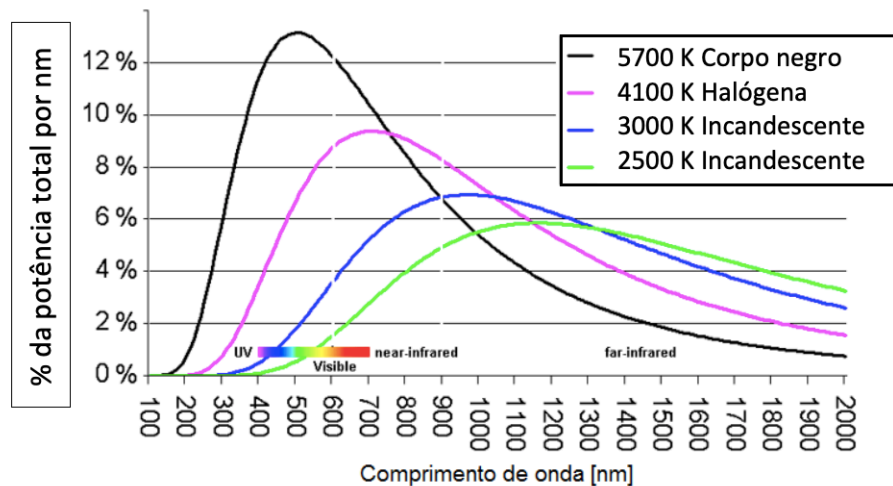


Figura 45 – Comparação entre os espectros: solar; lâmpada halógena; e outras lâmpadas incandescentes de diferentes temperaturas.

Foi construído um aparato para analisar a capacidade da lâmpada halógena de gerar energia em uma célula FV e, ao mesmo tempo, a aquecer. Este aparato (Figura 46) se consistiu de uma base contendo, em um dos lados, um refletor com uma lâmpada halógena de 500 W, e no outro lado, uma célula FV, com uma distância entre eles de 1 metro. Além desta bancada de testes, foram utilizados um voltímetro e uma câmera infravermelho para verificar a capacidade de geração de energia elétrica e energia térmica na célula.

Após o teste, se verificou tanto a geração de energia elétrica quanto a geração de energia térmica na célula FV, resultando em um aumento na temperatura de 19,2°C para 33,4°C.

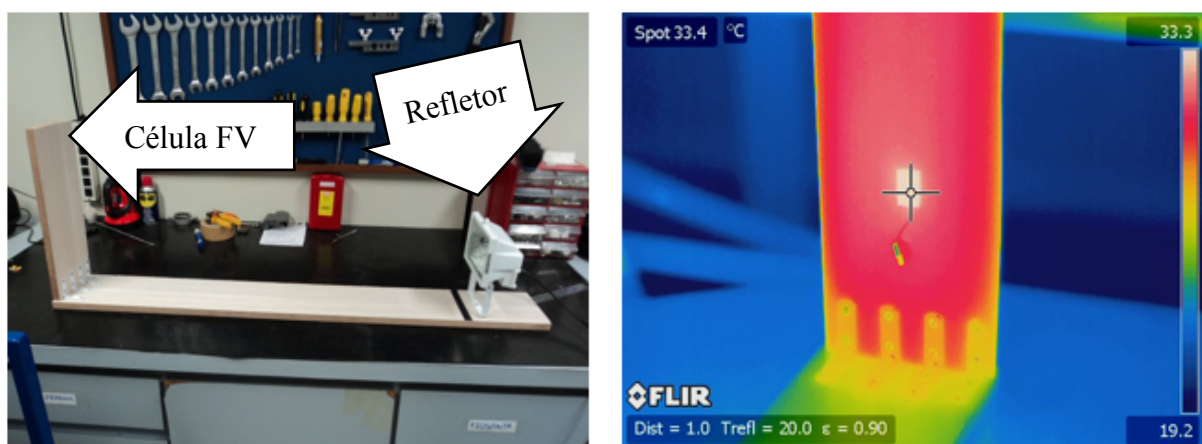


Figura 46 – Aparato para avaliar a geração de energia elétrica e térmica pela lâmpada halógena (esquerda) e imagem térmica da célula FV (direita).

Para a definição da potência das lâmpadas a serem utilizadas no Simulador Solar (300 W ou 500 W), foram realizadas duas avaliações mais específicas: avaliação do aquecimento provocado e da irradiância a uma distância de 1 metro.

A avaliação do aquecimento provocado foi realizada na câmara climatizada do LST com a temperatura estabilizada em 25°C. Esta avaliação consistiu em medir a temperatura da célula FV com o auxílio de um termopar tipo T quando irradiada pela lâmpada de 300 W e pela lâmpada de 500 W. Durante toda a avaliação, a temperatura dentro da câmara também foi registrada (Figura 47).

Após a análise da Figura 47, tendo em vista que o projeto conceitual do Simulador Solar prevê 24 lâmpadas halógenas para irradiar uma área de aproximadamente $2,3 \text{ m}^2$, chegou-se à conclusão de que ambas as lâmpadas possuem potência suficiente para causar um incremento significativo na temperatura da célula FV. Portanto, a escolha da potência das lâmpadas foi decidida apenas na avaliação da irradiância.

Em seguida, na mesma bancada de testes para avaliação das lâmpadas halógenas, no lugar da célula FV foi utilizado um piranômetro modelo CMP 6 – Kipp & Zonen (sensibilidade de $12,24 \mu\text{V m}^2 \text{ W}^{-1}$ e impedância de 43Ω) (Figura 48) para a avaliação das irradiações.

Após a aquisição das irradiância geradas pelas lâmpadas de 300 W e 500 W, foi gerada a Figura 49.

É importante explicar que na curva da lâmpada de 300W, logo nos primeiros 50 segundos, existe um ruído gerado por uma lâmpada da câmara climatizada que foi ligada acidentalmente, mas logo foi apagada, não interferindo na análise dos resultados.

Observando os resultados se concluiu que, embora a lâmpada de 500 W tenha apresentado valores de irradiância muito superiores, a irradiância de pouco mais de 1000 W m^{-2} gerada pela lâmpada de 300 W é suficiente para a proposta, uma vez que, conforme mencionado anteriormente, o projeto conceitual do simulador solar prevê 24 lâmpadas para uma área de apenas aproximadamente $2,3 \text{ m}^2$.

Portanto, em um primeiro momento o Simulador Solar utilizou um arranjo 4x6 de lâmpadas halógenas, com potência nominal de 300 W, para realizar a irradiância artificial.

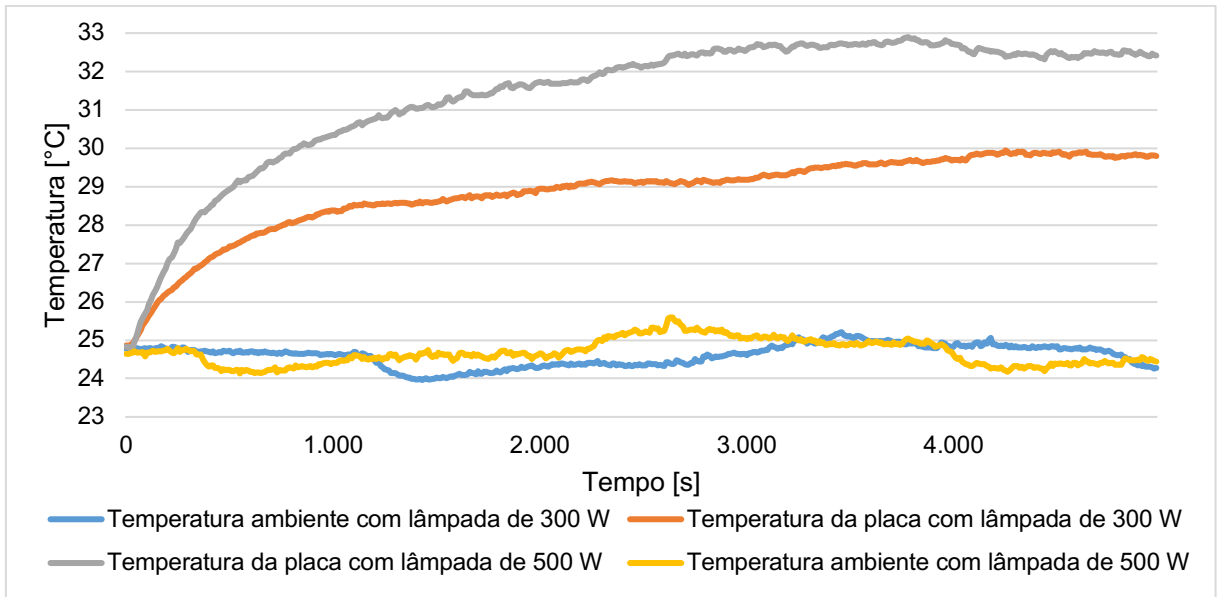


Figura 47 - Comparação entre o aquecimento em célula FV provocado por uma lâmpada de 300 W e 500 W

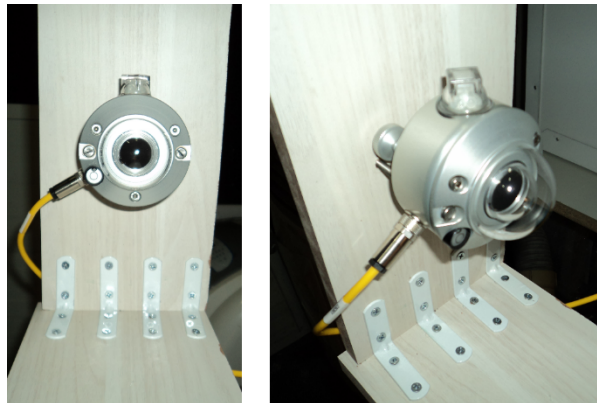


Figura 48 - Piranômetro instalado para teste de irradiância das lâmpadas halógenas

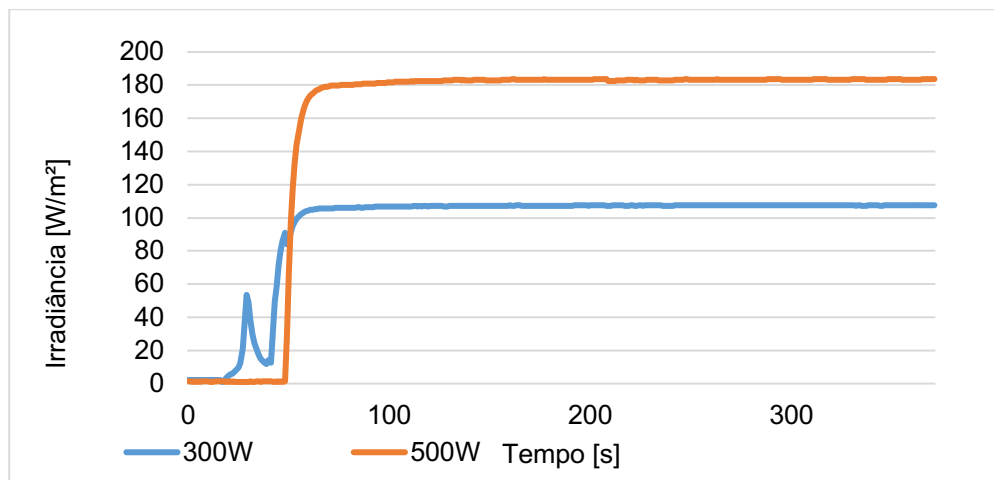


Figura 49 – Comparação entre a irradiância entre as lâmpadas halógenas de 300 e 500 W

3.2 Avaliação do sistema de irradiância

Diversos testes foram realizados no Simulador Solar com os objetivos de avaliar:

- a capacidade de ajustar a intensidade da irradiância na superfície dos painéis;
- e a distribuição homogênea da irradiância.

Antes de realizar os testes, a superfície do Simulador foi dividida em uma matriz 7 x 10, resultando em 70 quadrantes. As colunas foram rotuladas com as letras “A” até “G” e as linhas com os números “1” até “10”.

Em seguida, o piranômetro, devidamente calibrado pelo fabricante, foi colocado no centro do Simulador (quadrante D6) e a potência das lâmpadas foram ajustadas, através do dimmer, até se atingir a irradiância de aproximadamente $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Após o ajuste da potência das lâmpadas, iniciou-se o processo de medição da irradiância em cada um dos quadrantes da superfície do Simulador. Todos os valores de irradiância foram coletados e armazenados pelo equipamento de aquisição de dados Agilent 34970A, que foi configurado para realizar as leituras do piranômetro em intervalos de 10 segundos.

A obtenção de um fluxo de irradiância uniforme (homogêneo) foi uma tarefa complexa, porque o Simulador Solar possui várias fontes de iluminação que naturalmente favorecem uma distribuição irregular da irradiância. Por isto, a partir dos resultados obtidos durante os ensaios foram realizados quatro aperfeiçoamentos até se atingir uma variação máxima de irradiância de 5,6% entre os 77 pontos de medição no Simulador, ficando próximo do que a norma IEC 60904-9 recomenda.

A seguir, são apresentadas as quatro configurações adotadas para o sistema de irradiância até se atingir um resultado satisfatório. Cada uma das configurações é descrita como caso A, B, C e D.

3.2.1 Caso A

O caso A descreve o sistema de irradiância em sua configuração inicial, com as 24 lâmpadas halógenas de 300 W ligadas. A

Figura 50 e Figura 51 foram geradas contendo a irradiância em cada um dos quadrantes do Simulador, sendo que no centro a irradiância esteve próxima do valor desejado ($999,01 \text{ W}/\text{m}^2$), mas nas regiões periféricas o valor da irradiância ficou muito

abaixo do desejado, chegando ao extremo de atingir apenas 33,72% da irradiância no D6.

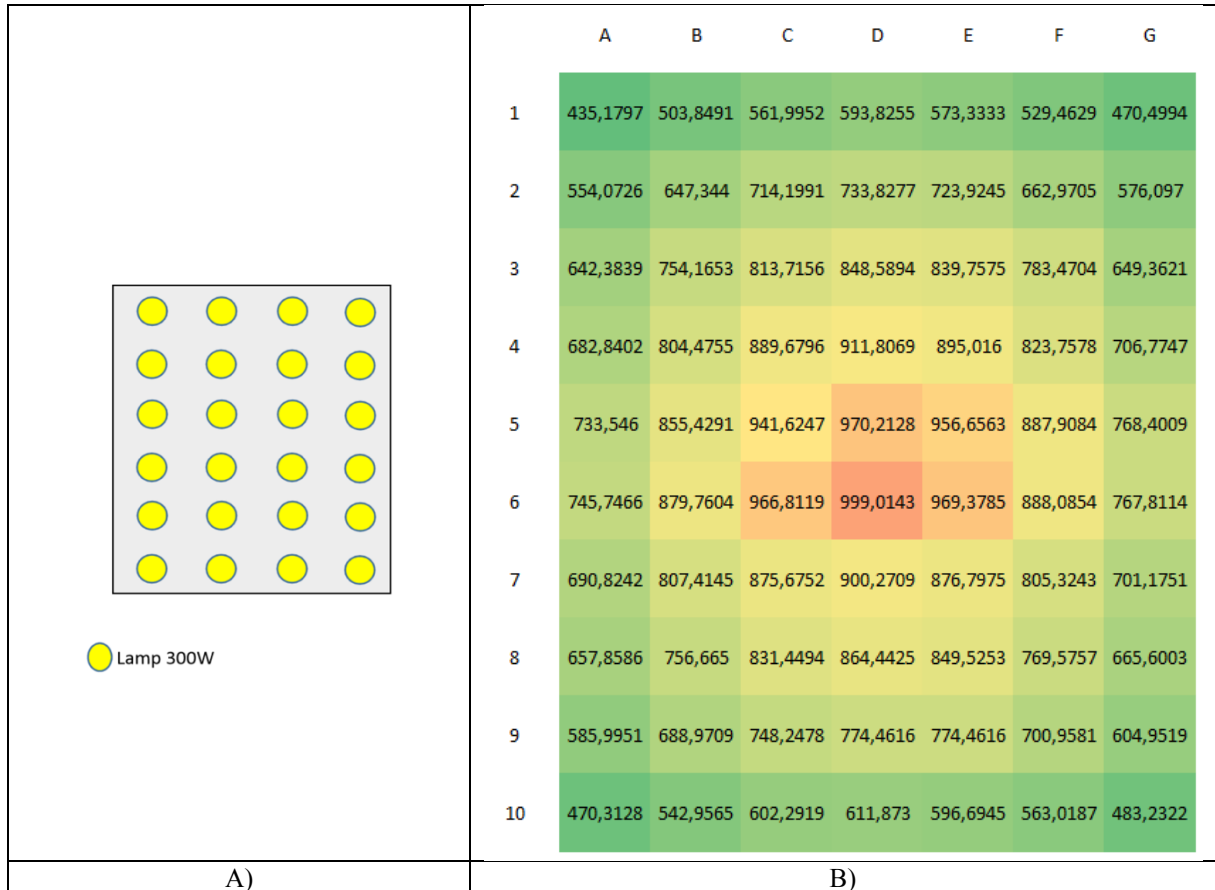


Figura 50 – Caso A: distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$.

No caso A concluiu-se que:

- o Simulador Solar foi capaz de ajustar a irradiância no ponto central da superfície com precisão satisfatória, ficando apenas a menos de 0,1% do valor desejado;
- a irradiância em cada quadrante da superfície do simulador é fortemente influenciada pelos refletores laterais (vizinhança), e isto prejudicou as áreas periféricas, tornando a irradiância na sua superfície com baixa homogeneidade (má distribuição).

O problema da não homogeneidade na irradiância do Simulador pode gerar o mesmo problema ocorrido em painéis FV com sombreamento parcial. Ou seja, algumas células geram correntes elétricas mais intensas do que outras, podendo polarizar negativamente as células que geram menos corrente, afetando

significativamente o rendimento de todo o painel (Lopes, 2013) (Dolara, Lazaroiu, Leva, & Manzolini, 2013) (Ishaque, Salam, Taheri^a, & Syafaruddin, 2011).

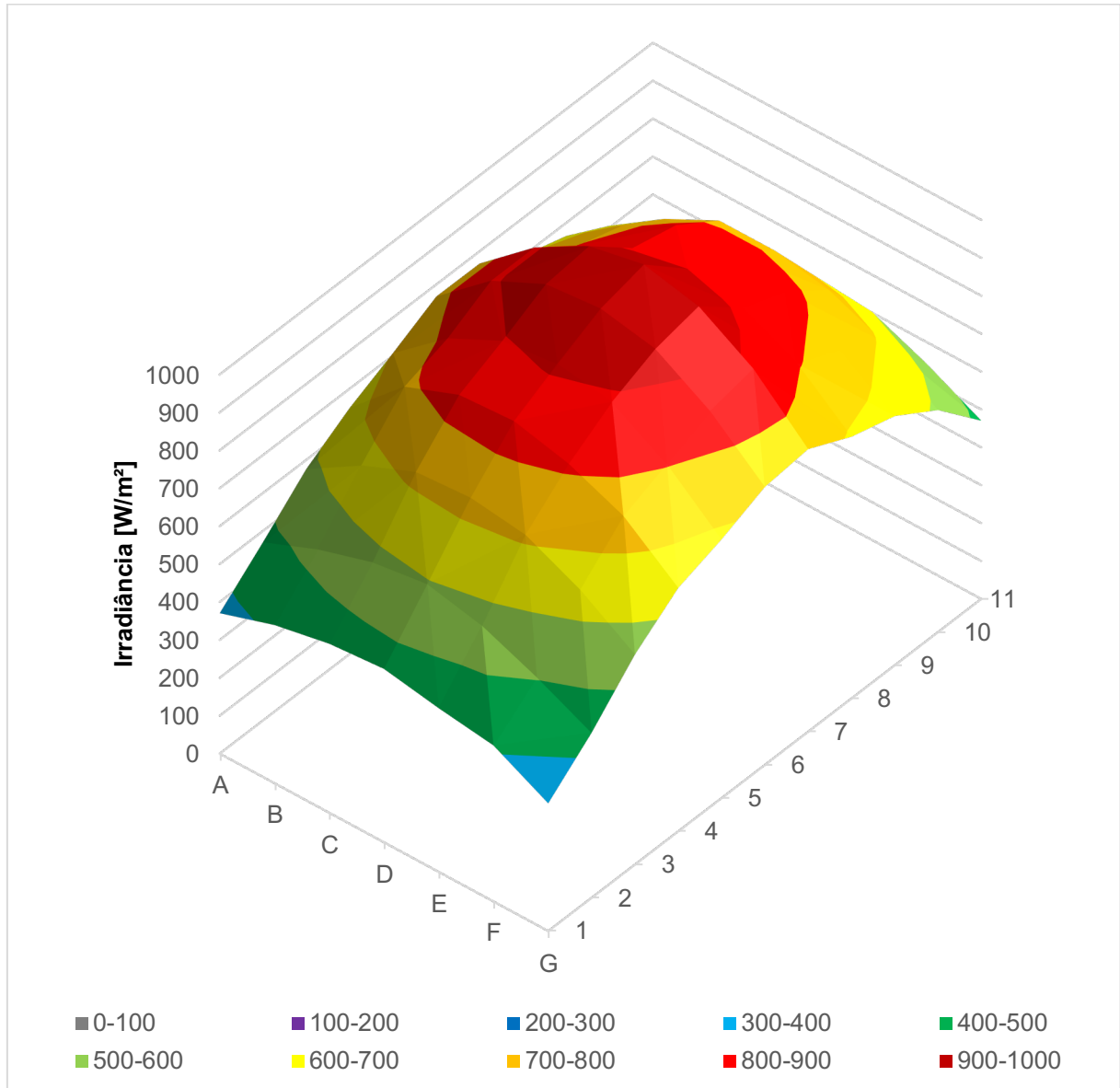


Figura 51 – Caso A: distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$.

3.2.2 Caso B

Diante do problema encontrado no caso A, foi executado o reprojeto do Simulador Solar, cuja solução foi cercar suas laterais com uma superfície reflexiva (95% de reflexão), criando imagens virtuais dos refletores nas quatro laterais (Figura 52 e Figura 53). O material reflexivo foi uma manta térmica para telhados.



Figura 52 – Caso B: simulador Solar com o material reflexivo nas laterais

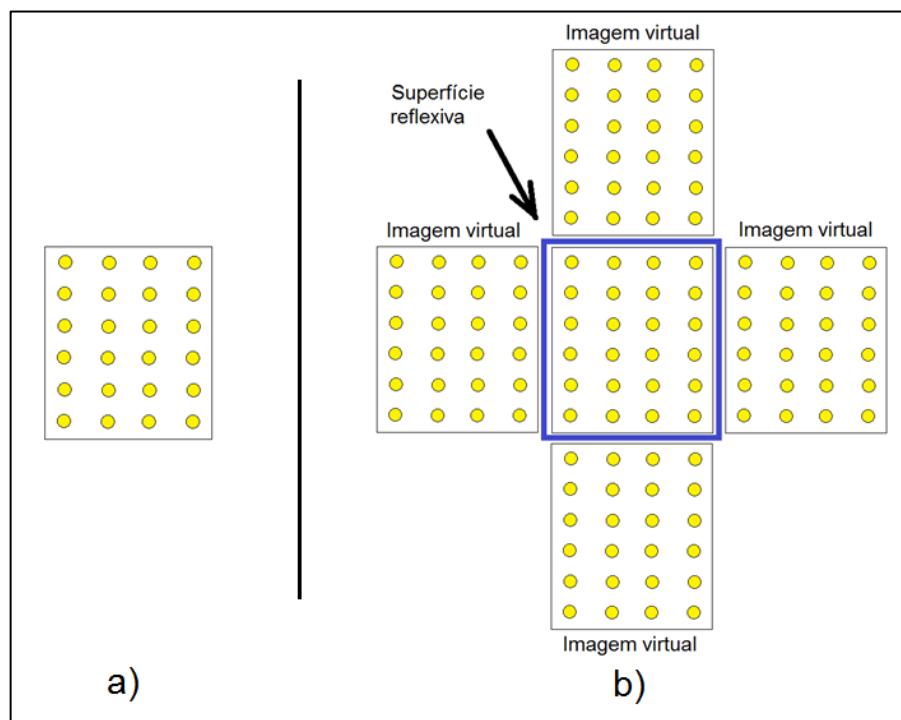


Figura 53 – Caso B: a) Simulador Solar sem o material reflexivo nas laterais; b) Simulador Solar cercado pelo material reflexivo formando imagens virtuais nas laterais.

Esta configuração aumentou significativamente a irradiância na superfície do Simulador (Figura 54 e Figura 55). Mesmo assim, é possível observar vários valores com irradiância abaixo de 900 Wm^{-2} (90% da irradiância desejada), e isto continuou acontecendo principalmente nas regiões periféricas.

	A	B	C	D	E	F	G
1	911,1182	897,5	888,8999	893,1668	872,198	863,3252	834,9049
2	921,0601	912,5745	915,4888	923,3277	916,524	924,275	885,7183
3	937,0577	925,6543	940,4566	947,2214	953,1105	957,1063	901,7165
4	941,4431	929,804	942,3485	975,043	986,2519	991,102	936,952
5	971,4413	962,9673	995,9444	1030,956	1024,943	1022,104	972,1874
6	963,664	970,8863	990,8983	1006,089	1030,988	1046,25	1021,291
7	954,214	952,4385	967,5424	981,2222	996,048	1000,217	987,5044
8	912,3754	929,3979	939,7165	950,6154	964,9863	975,1529	969,9011
9	907,7274	917,6608	937,135	950,4706	937,9734	922,0921	895,1157
10	845,6823	903,8654	915,6039	938,5521	939,0965	932,2921	912,0675

Figura 54 – Caso B: distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$

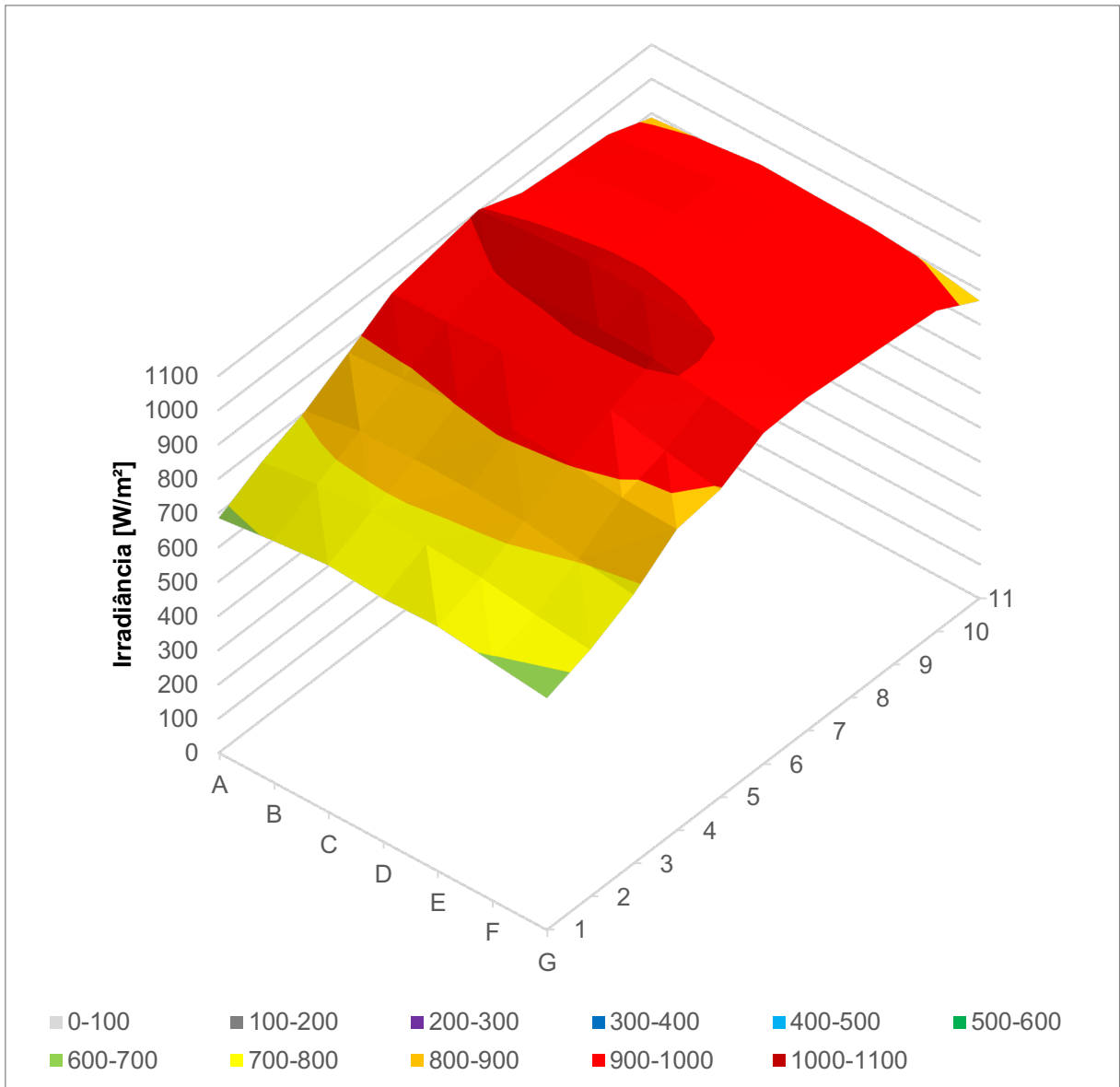


Figura 55 – Caso B: distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[W \cdot m^{-2}]$

3.2.3 Caso C

No caso C, para aumentar a irradiância nas regiões periféricas do Simulador se optou por manter a superfície reflexiva proposta no caso B e substituir as lâmpadas de 300 W desta região por lâmpadas de 500 W (Figura 56).

Após a substituição das lâmpadas, observou-se uma melhoria na distribuição da irradiância, cujos resultados são apresentados na Figura 57 e Figura 58. Neste caso apenas o quadrante A1 ficou abaixo de $900 Wm^{-2}$.

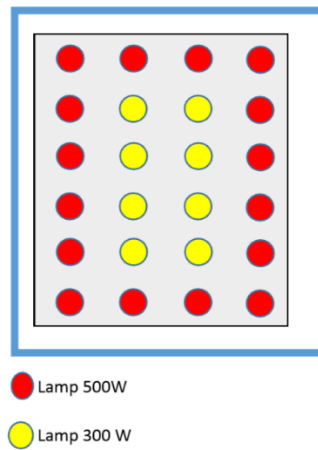


Figura 56 – Caso C: modificações no Simulador Solar para melhorar a distribuição da irradiância

	A	B	C	D	E	F	G
1	879,5414	904,5144	928,4788	933,6772	949,953	936,6145	923,477
2	915,3315	948,4623	965,2829	969,7899	970,7771	949,9679	936,1783
3	942,8088	948,0032	964,9691	972,4257	968,1786	966,4366	944,7065
4	923,1835	940,548	966,2561	968,7287	976,2772	1013,933	1006,676
5	996,7995	1010,406	1025,044	1019,462	1026,149	1015,518	1019,788
6	990,6141	990,9718	1000,441	1016,493	1027,168	1020,689	1018,722
7	978,1939	980,7192	977,62	987,1059	983,5618	974,033	945,5527
8	985,7651	983,4776	987,1087	1000,335	998,7246	986,5065	980,8177
9	968,5224	986,4484	990,0034	1011,427	993,2442	983,0808	964,071
10	939,9453	972,3458	985,8303	993,3983	977,525	958,1174	931,7112

Figura 57 – Caso C: Distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em [Wm^{-2}]

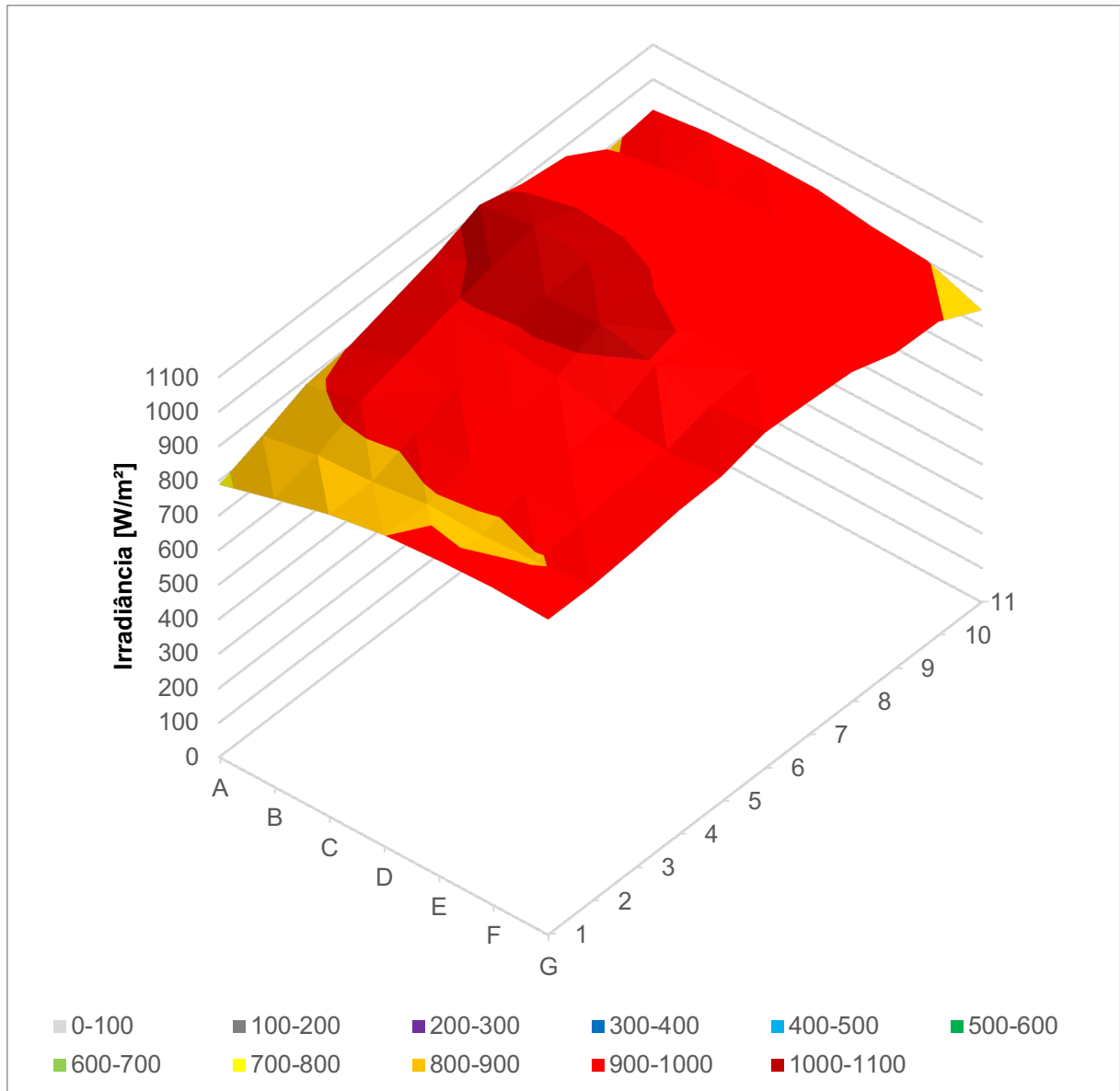


Figura 58 – Caso C: Distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$

3.2.4 Caso D

No último caso, com o auxílio do *software* de cálculo luminotécnico Lumisoft, foi possível inserir as propriedades do Simulador Solar e simular diversas condições afim de se obter os melhores resultados em termos de homogeneidade da irradiância. Após a simulação, o melhor resultado foi obtido com apenas oito lâmpadas halógenas distribuídas nas extremidades do Simulador (Figura 59 e Figura 60), onde o problema da baixa irradiância era mais acentuado.

Para se atingir os resultados das figuras a seguir, o sistema foi ajustado para a potência máxima das lâmpadas.



Figura 59 - Caso D: Distribuição 2D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$

Ao se executar experimentalmente esta alteração, observou-se que esta configuração resultou em uma irradiância mais homogênea ao longo de toda a superfície do Simulador Solar, com um valor médio de $992,34 W \cdot m^{-2}$ e variação máxima de irradiância de 5,6%.

O caso D foi usado durante todas as avaliações experimentais do sistema FVT-MMF descritas nesta tese.

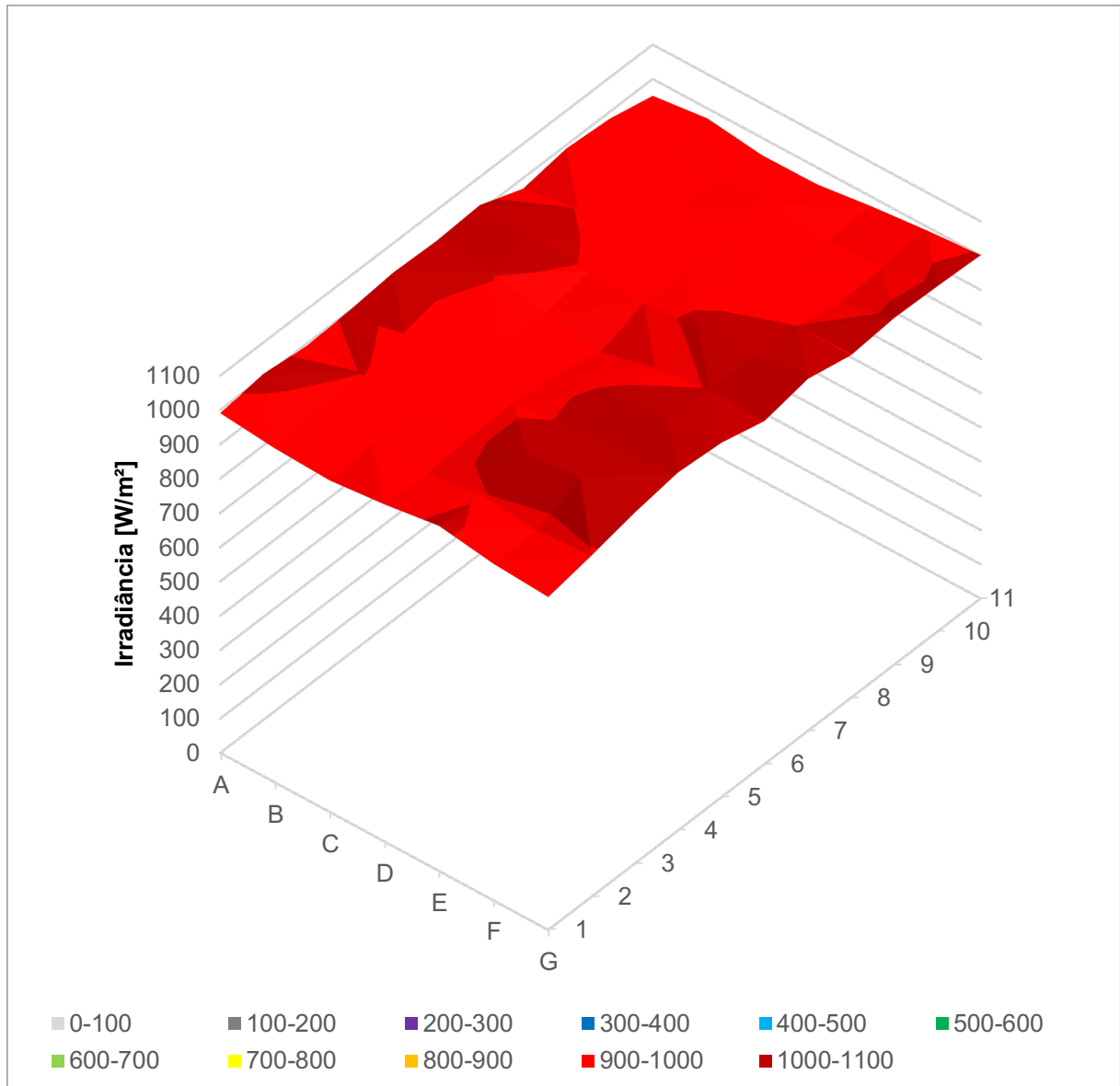


Figura 60 - Caso D: Distribuição 3D da irradiância na superfície do Simulador Solar em $[Wm^{-2}]$

3.3 Desenvolvimento do sistema de ventilação

Afim de simular condições climáticas que influenciam a eficiência FV, foi desenvolvido um sistema de ventilação artificial. Os requisitos estabelecidos para este sistema são:

- velocidade controlada de ventilação;
- ser capaz de atingir, pelo menos, 1 m/s (conforme NOCT);
- possuir ventilação relativamente constante sobre toda a superfície do Simulador Solar.

O aparato utilizado para a ventilação artificial foi um conjunto com 12 *coolers* dispostos lado a lado, que neste trabalho é chamado de painel de ventilação (Figura 61).

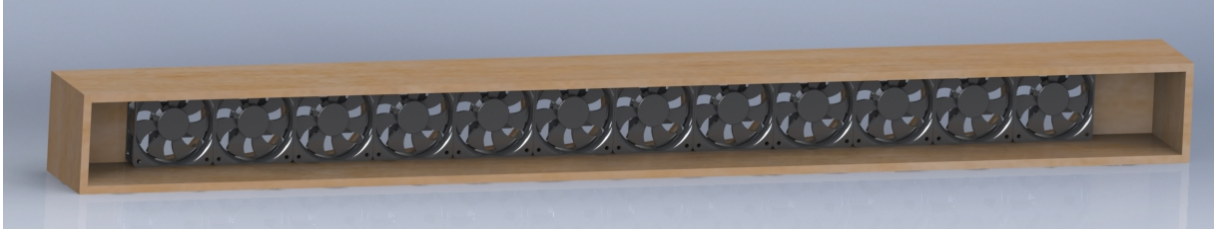


Figura 61 –Painel de ventilação com 12 coolers

Foi desenvolvido um circuito PWM para o controle dos coolers para se obter a velocidade de ventilação desejada na superfície do painel (Figura 62 e Figura 63).

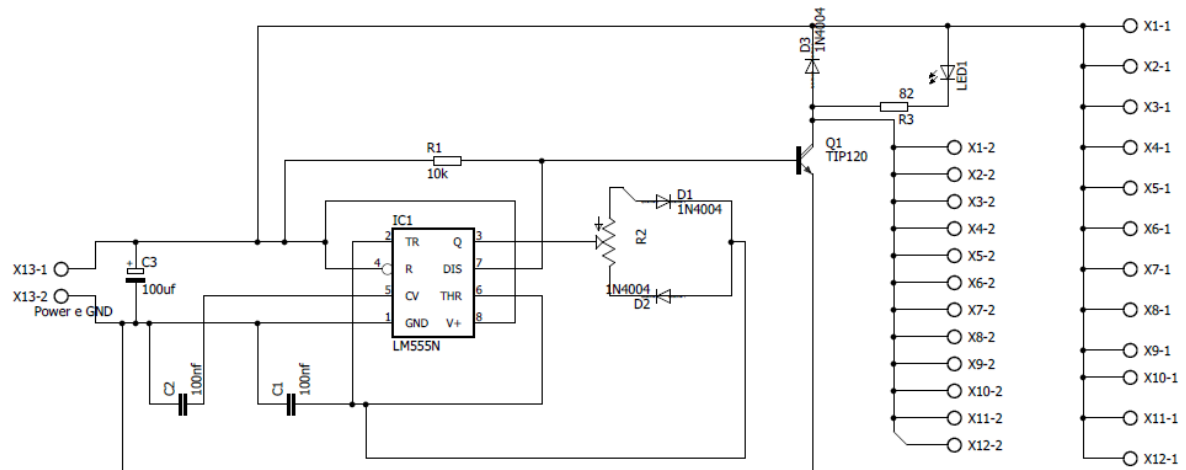


Figura 62 – Circuito PWM para controle do sistema de ventilação no Simulador Solar

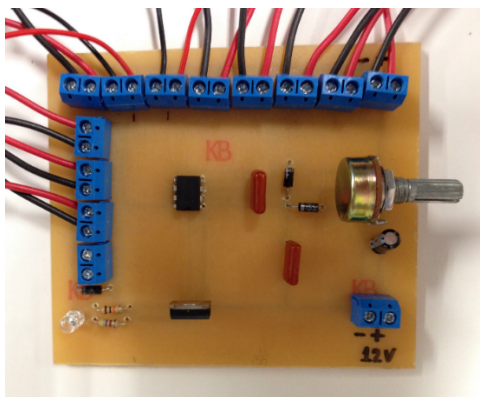


Figura 63 – Controle PWM do sistema de ventilação no Simulador Solar

Tanto o painel de ventilação quanto o circuito para o controle da potência foram instalados no Simulador Solar conforme o projeto da Figura 64.

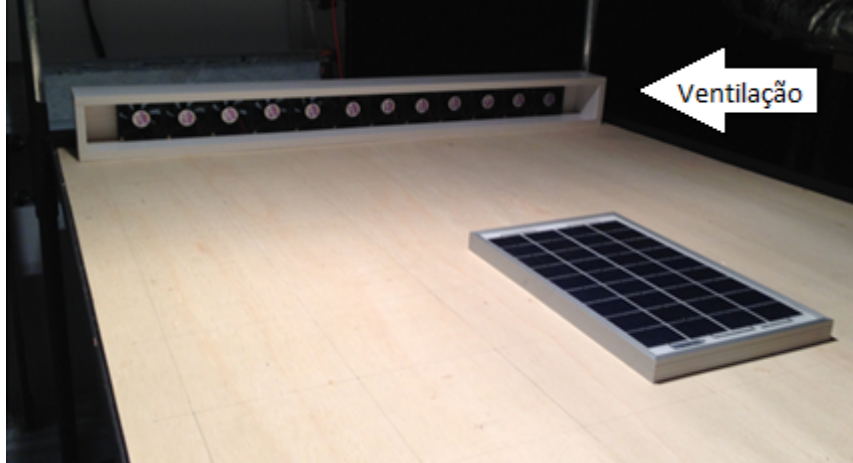


Figura 64 – Sistema de ventilação do Simulador Solar

Após a montagem do sistema de ventilação, foi realizada sua avaliação na qual foram considerados os 3 quesitos definidos anteriormente: controle da ventilação, ser capaz de atingir 1 m/s; e possuir velocidade relativamente constante sobre toda a superfície do Simulador Solar. Nesta avaliação foi utilizado apenas um medidor de fluxo.

3.4 Avaliação do sistema de ventilação

A metodologia empregada na avaliação do sistema de ventilação foi semelhante à utilizada na avaliação da irradiância. O controlador de potência foi ajustado até se atingir a velocidade de 1 m/s no ponto central (quadrante D6). Em seguida, usando um medidor de fluxo na altura aproximada dos módulos FV, foi realizada a leitura da velocidade da ventilação nos demais quadrantes do Simulador.

Assim como na avaliação da irradiância, na avaliação do sistema de ventilação foram realizados dois aperfeiçoamentos no sistema até se obter um resultado satisfatório. As configurações foram denominadas caso A e B.

3.4.1 Caso A

O caso A consistiu apenas na geração da ventilação artificial por meio do painel em uma das laterais do Simulador Solar, conforme já apresentado na Figura 64.

Após realizar as medições da velocidade de ventilação sobre toda a superfície do Simulador, se observou que houve uma diminuição da velocidade principalmente no lado oposto ao painel. Pode-se observar este fenômeno pelo mapa da ventilação apresentado na Figura 65.



Figura 65 – Caso A: Campo da ventilação

3.4.2 Caso B

Visando diminuir o problema encontrado no caso A, foi proposto o uso de outro painel contendo 12 coolers alinhados lado a lado, mas realizando a função de exaustão do sistema (Figura 66).

Nesta nova configuração houve melhora na ventilação do sistema (

Figura 67), principalmente no lado da exaustão, que antes apresentava valores muito baixos.



Figura 66 – Caso B: sistema de ventilação e exaustão do Simulador Solar



Figura 67 – Caso B: Campo da ventilação no caso B

Embora no caso B tenha havido uma melhora sutil no fluxo da ventilação sobre toda a superfície do Simulador, é importante mencionar que na região periférica

alguns valores ficaram muito fora da velocidade desejada. Isto principalmente na região próxima do painel de ventilação (linha 10 e linha 11). Este problema certamente aumenta a incerteza do sistema de ventilação para a avaliação de painéis FV de grande porte. Todavia, para painéis de médio e pequeno porte o sistema de ventilação ficou dentro das expectativas tanto no controle da ventilação quanto na distribuição do fluxo. A área demarcada na

Figura 67, que apresentou uma boa uniformidade na velocidade da ventilação possui 105 cm x 75 cm.

Certamente, em projetos futuros, o sistema de ventilação deverá ser aperfeiçoado afim de obter melhores resultados para painéis FV de grande porte.

3.5 Avaliação do Simulador Solar com painel FV

Para a avaliação do Simulador Solar com painel FV foram utilizados os seguintes equipamentos:

- painel FV de silício policristalino 10 W;
- 2 termopares tipo T;
- reostato com faixa de operação: 0-200 Ω ;
- equipamento de aquisição de dados Agilent 34970A.

O reostato foi conectado no painel FV como carga variável para realizar a varredura da tensão x corrente, denominada de curva característica I x V. Os valores de corrente e tensão foram registrados pelo equipamento de aquisição de dados, devidamente conectado em série e paralelo com a carga de acordo com a Figura 68. Além disto, foram utilizados dois termopares para registrar a temperatura do painel FV (T_{FV}) e temperatura dentro da câmara climatizada do LST (T_a).

O Simulador Solar foi ajustado para uma irradiância constante no valor de $1000 \pm 56 \text{ Wm}^{-2}$ e a câmara climatizada configurada para uma temperatura constante de 25°C.

Ao irradiar o painel FV com as lâmpadas halógenas, sua temperatura variou dos 25°C iniciais até 65°C. A cada incremento de 5°C na temperatura do painel foi realizada a leitura da curva característica I x V e a potência, cujos resultados são apresentados na Figura 69 e Figura 70.

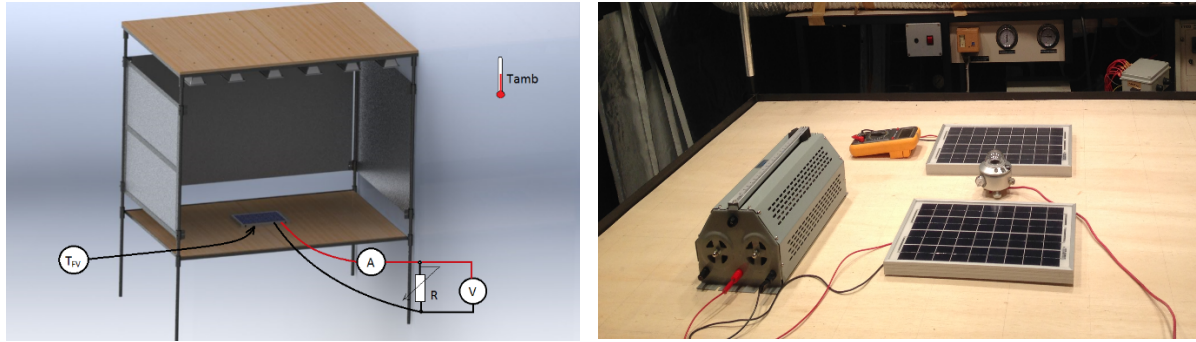


Figura 68 – Aquisição da curva característica I x V do painel FV no Simulador Solar

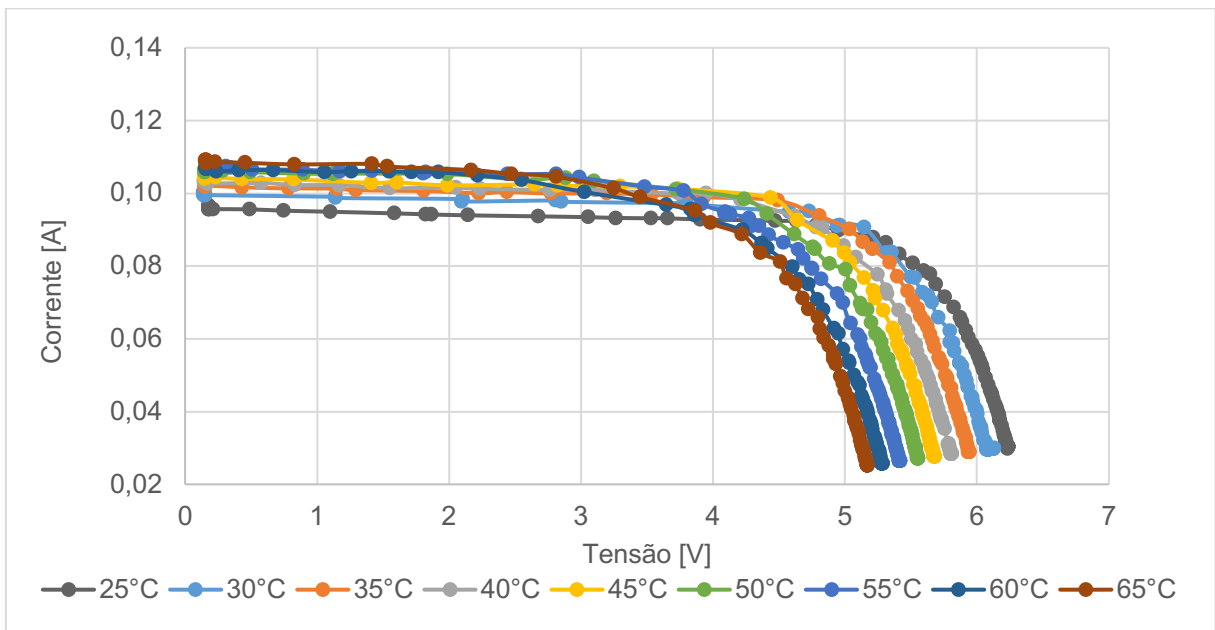


Figura 69 – Avaliação do Simulador Solar: curva característica do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação

Em seguida, observando a queda da tensão de circuito aberto (V_{OC}), a diminuição da potência e o leve aumento da corrente de curto circuito (I_{SC}), causados pelo aumento na temperatura de operação do painel FV, obteve-se o coeficiente de tensão de circuito aberto (k_V) e coeficiente de corrente de curto circuito (k_I), cujos resultados condizem com os parâmetros indicados na folha de dados do fabricante (Figura 71 e Figura 72).

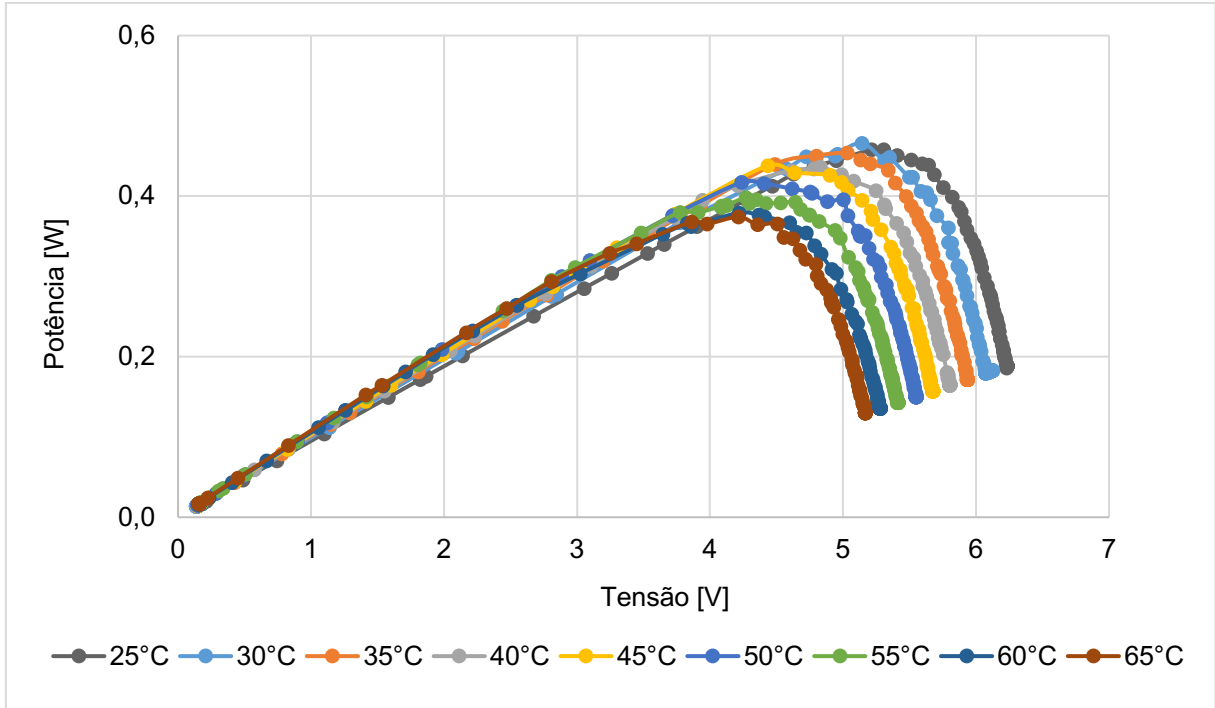


Figura 70 – Avaliação do Simulador Solar: potência do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação

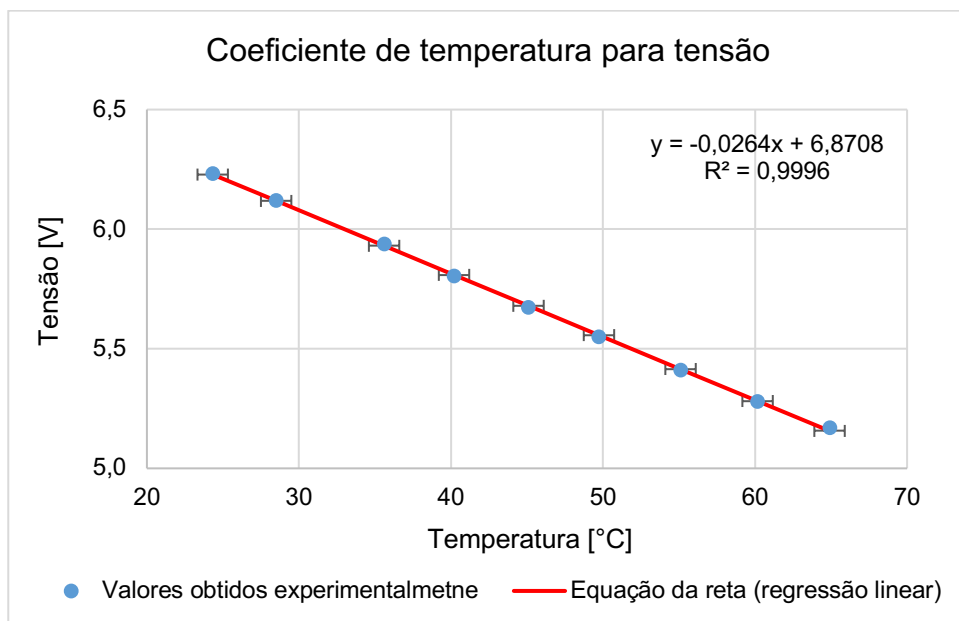


Figura 71 – Coeficiente de tensão para temperatura

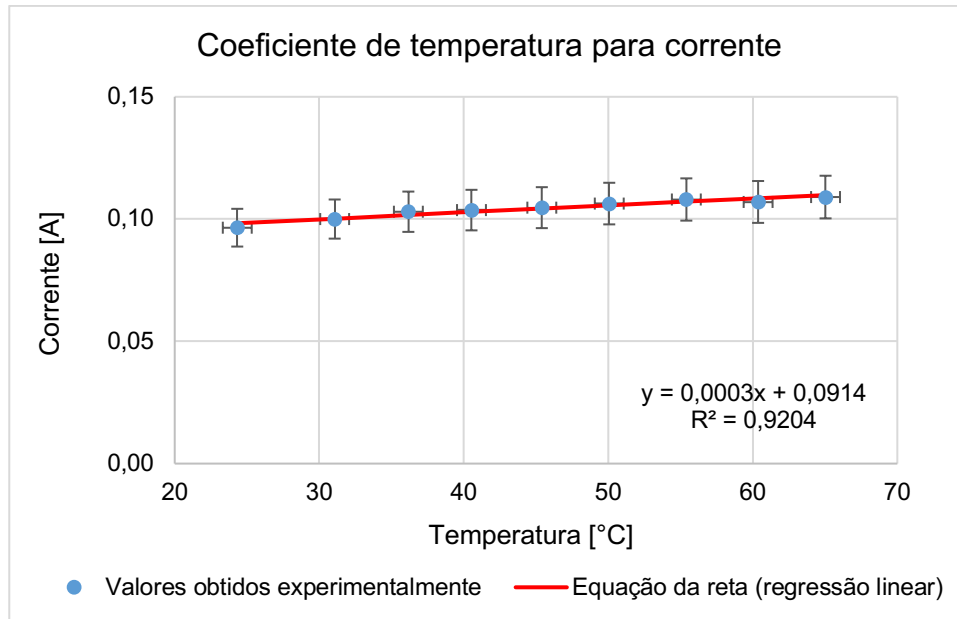


Figura 72 – Coeficiente de corrente para temperatura

Com o objetivo de avaliar esses resultados obtidos experimentalmente, foi realizada a simulação computacional do painel FV.

As principais características da simulação são:

- modelo elétrico de uma célula real com 1 diodo em anti-paralelo (apresentado no item 2.1.6);
- método para solução: Newton-Raphson;
- software utilizado: Scilab;
- como parâmetros iniciais, foram utilizados os valores V_{oc} e I_{SC} obtidos experimentalmente.

Conforme já mencionado, a equação governante da relação tensão-corrente de um painel FV é transcendental. Para resolver este problema foi empregado o método Newton-Raphson, que consiste em uma ferramenta iterativa para se encontrar as raízes que satisfaçam a equação proposta. O método Newton-Raphson pode ser implementado através da seguinte relação para se determinar as raízes:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (19)$$

Sendo, neste caso:

$$f(I) = -I + I_{FV} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_{cel}} - 1 \right) \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (20)$$

$$f'(I) = -1 - I_0 \cdot \left[\exp \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_{cel}} \right] \cdot \frac{q \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_{cel}} - \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (21)$$

A partir da Equação (20) e Equação (21) e usando o método Newton-Raphson, foi implementada a rotina para simulação do painel FV no Scilab, cujo código segue no Apêndice A.

Ao executar a simulação, obtém-se a curva característica corrente-tensão e potência-tensão para diferentes valores de temperatura de operação, partindo de 25°C até 65°C (com incremento de 5°C, mesma faixa das medições experimentais) (Figura 73 e

Figura 74).

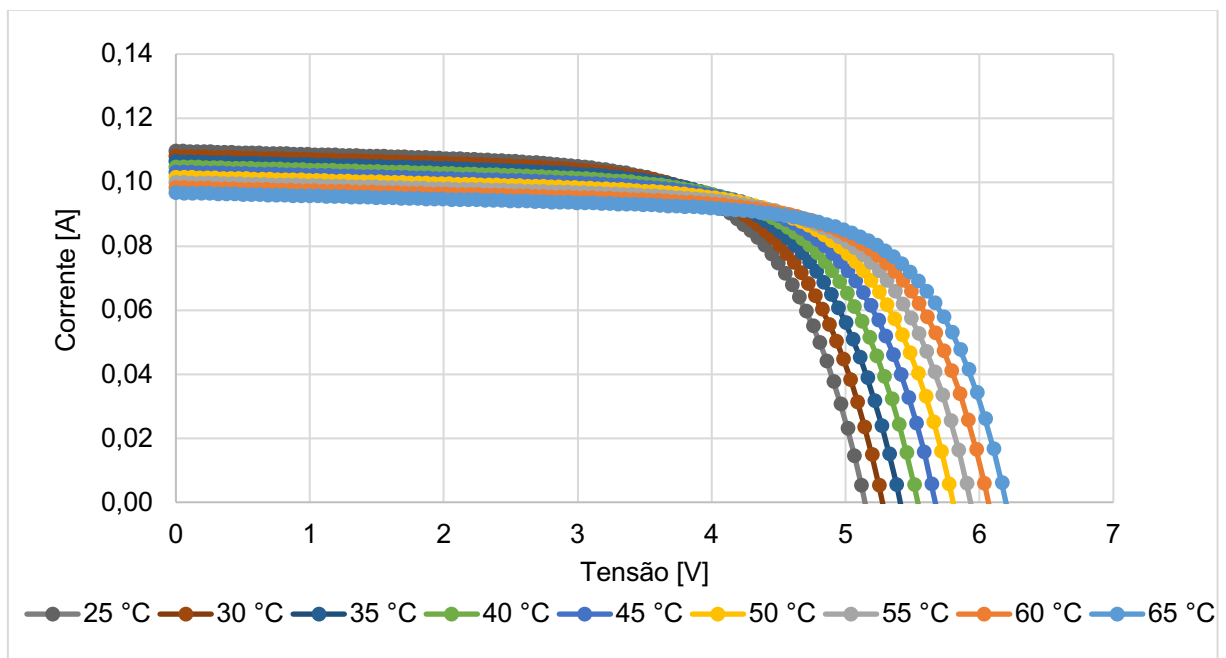


Figura 73 – Simulação do painel FV: curva característica do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação

No trabalho publicado por (Ghadiri, Sardarabadi, Pasandideh-fard, & Hoghadam, 2015), utilizou-se um Simulador Solar para avaliar a eficiência elétrica e térmica de um sistema FVT utilizando água com nano fluídos de ferro. Durante as avaliações experimentais, também foi observada uma diferença entre a eficiência

elétrica do painel FV em ambiente indoor (simulador solar) e outdoor. Eles observaram que o sistema FVT tem, de fato, um menor rendimento elétrico e maior rendimento térmico utilizando o Simulador Solar, e isto ocorre porque, comparando o espectro das lâmpadas halógenas utilizadas com o espectro solar, observa-se que o espectro das lâmpadas halógenas possuem uma menor intensidade na banda de ondas curtas (responsável pela conversão fotovoltaica) e maior intensidade na banda de ondas longas (responsável pelo efeito térmico).

No trabalho publicado por (Ghadiri, Sardarabadi, Pasandideh-fard, & Hoghadam, 2015), utilizou-se um Simulador Solar para avaliar a eficiência elétrica e térmica de um sistema FVT utilizando água com nano fluídos de ferro. Durante as avaliações experimentais, também foi observada uma diferença entre a eficiência elétrica do painel FV em ambiente indoor (simulador solar) e outdoor. Eles observaram que o sistema FVT tem, de fato, um menor rendimento elétrico e maior rendimento térmico utilizando o Simulador Solar, e isto ocorre porque, comparando o espectro das lâmpadas halógenas utilizadas com o espectro solar, observa-se que o espectro das lâmpadas halógenas possuem uma menor intensidade na banda de ondas curtas (responsável pela conversão fotovoltaica) e maior intensidade na banda de ondas longas (responsável pelo efeito térmico).

Além disto, os valores para tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito obtidos experimentalmente foram significativamente menores do que os valores divulgados na folha de dados do painel FV ($V_{oc} = 17,1 V$ e $I_{sc} = 0,59 A$). Isto ocorreu devido a dois fatores: primeiro, o espectro de irradiação das lâmpadas halógenas favorece a geração de energia térmica, pois possui uma energia maior na banda infravermelho; além disto, para a obtenção experimental da tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito foi utilizado um reostato simulando a carga, com variação de 0 a 200 Ω . Sabendo que o reostato não consegue chegar à resistência real de 0 Ω , pela resistividade dos fios e dos contatos, e que 200 Ω está longe de ser considerado um circuito aberto, os valores obtidos experimentalmente ficaram abaixo dos valores máximos do painel.

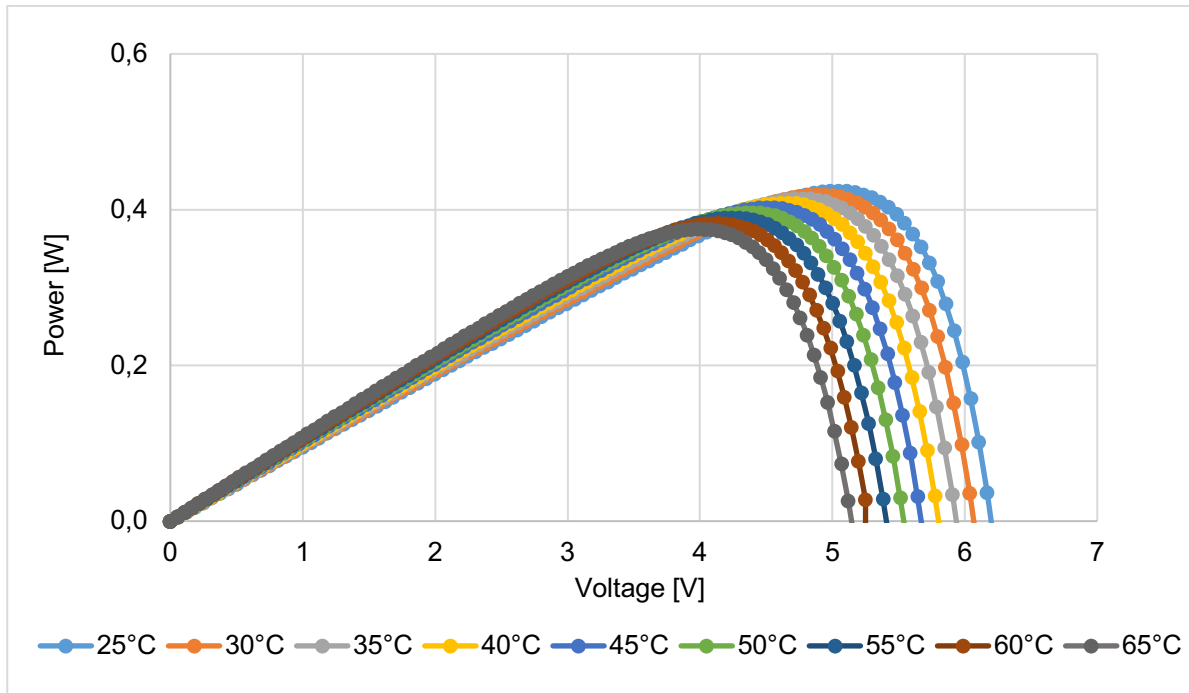


Figura 74 – Simulação do painel FV: potência do painel FV para diferentes condições de temperatura de operação

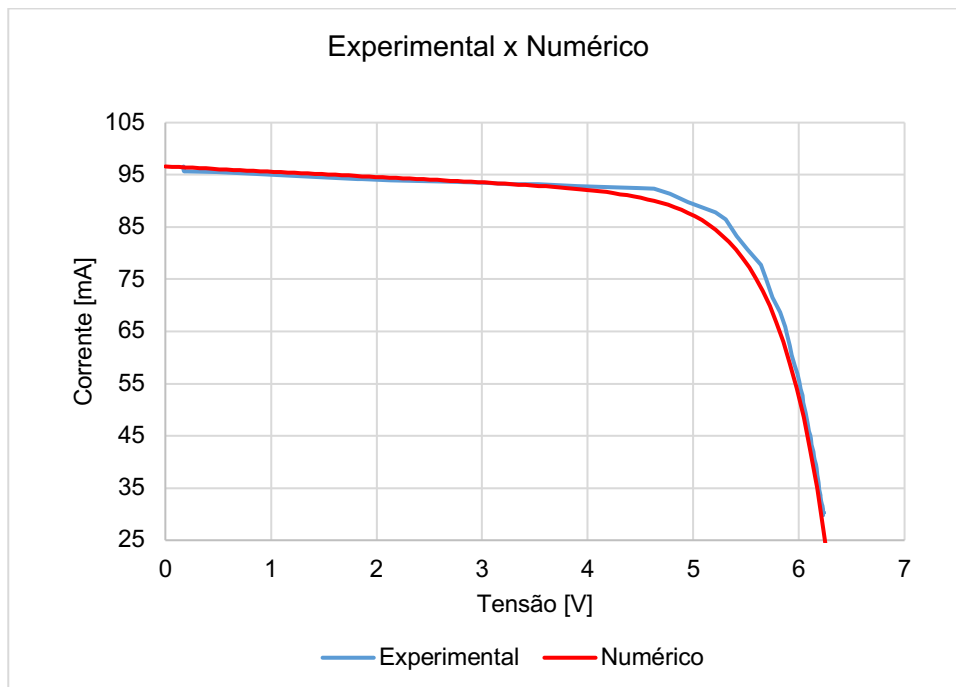


Figura 75 – Curva característica do painel FV: experimental x numérico (simulado)

É importante salientar que esta diferença no espectro das lâmpadas halógenas e da irradiância solar não comprometem a proposta do Simulador Solar neste projeto, por dois motivos principais:

- os valores obtidos experimentalmente neste projeto são relativos. Ou seja, os valores de eficiência elétrica e térmica do sistema FVT-MMF, obtidos experimentalmente, foram comparados com um painel fotovoltaico padrão, sob as mesmas condições de irradiância (com o mesmo espectro), temperatura e ventilação;
- além disto, o fato do Simulador Solar ter um efeito térmico acentuado sobre os painéis FV é interessante para este projeto, uma vez que seu principal objetivo é estudar e propor o gerenciamento térmico nos sistemas FV.

Comparando-se os resultados experimentais e simulados, pode-se observar uma significativa correlação entre os resultados (Figura 75). A partir desta correlação, concluímos que o Simulador Solar atingiu um dos objetivos, que é desenvolver um ambiente para experimentação e avaliação da eficiência elétrica de sistemas FV em condições reais de temperatura, irradiância e ventilação.

3.6 Resultados da avaliação do Simulador Solar

A geração da irradiância de forma homogênea é uma tarefa complexa, porque o Simulador Solar possui vários focos de irradiância, que naturalmente favorecem uma distribuição irregular da irradiância.

Mesmo que a norma IEC 60904-9 defina que a variação da irradiância na superfície do painel deve ser menor do que $\pm 2\%$ nos testes realizados pelos fabricantes, no qual se aplica apenas um pulso de luz artificial por um curto período de tempo, é importante enfatizar que este projeto tem uma proposta diferente, na qual requer o aquecimento do painel e a simulação de condições de operação variadas para, desta forma, avaliar novas soluções tecnológicas que visem ao aumento da eficiência dos painéis FV por meio do gerenciamento térmico.

Dentro desta proposta de simular condições reais de geração de energia e aquecimento do painel FV, Atkin e Farid (2015) desenvolveram um simulador solar utilizando duas lâmpadas halógenas de 500 W cada para avaliar a eficiência de um sistema FV-MMF e obtiveram uma variação de irradiância de aproximadamente 10% em uma área de 0,22 x 0,235 m. Assim como Huang *et al.* (2006) desenvolveram um Simulador Solar com uma lâmpada halógena e conseguiram uma homogeneidade de 3% apenas em uma área de 0,3 x 0,13 m, e com irradiância máxima de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

O simulador solar produzido pela empresa All Real Apollo, utilizado no artigo de Peng et al. (2015), oferece uma uniformidade de 15% para uma área de 2,1 x 1,5 m. GHADIRI, SARDARABADI, *et al.* (2015) também utilizaram um Simulador Solar para avaliar a eficiência elétrica e térmica de um sistema FVT com nano ferrofluidos na água, e conseguiram uma irradiância com variação de aproximadamente 6% em uma área com aproximadamente 1 m². Considerando isto, o resultado mostrado no caso D do Simulador Solar foi considerado satisfatório para a presente proposta, cuja média de irradiância foi de 992,34 W · m⁻² com variação máxima da 5,6% em uma área de 1,25 x 1,85 m (aproximadamente 2,3 m²).

Futuramente, algumas ferramentas podem ser utilizadas para melhorar a distribuição da irradiância no Simulador, como o uso de análises inversas, para auxiliar na decisão sobre o posicionamento das lâmpadas. Neste sentido, LEMOS, BRITTES e FRANÇA, (2016) realizaram um projeto para a otimização da geometria de filamentos em fornos para se obter um aquecimento uniforme, cuja solução adotada foi o uso da análise inversa. O resultado foi muito satisfatório, alcançado foi um desvio máximo em toda a superfície do forno de 2% e desvio médio de apenas 0,5%.

Assim como observado por MINNAERT e VEELAERT (2014) e KLUGMANN-RADZIEMSKA e WCISTO-KUCHAREK (2017), ficou claro que a irradiância artificial produzida pelas lâmpadas incandescentes e halógenas, mesmo possuindo um espectro mais próximo da irradiância solar, não representam fielmente o espectro da irradiação solar. Ou seja, o espectro da irradiação da lâmpada halógena concentra mais energia em comprimentos de onda menores 1,15 μm, favorecendo a geração de energia térmica (calor) em detrimento da geração elétrica. Esta característica tornou-se uma importante aliada para comparar a eficiência elétrica e térmica entre dois ou mais sistemas FV, pois aumentou ainda mais a temperatura de operação dos módulos FV, evidenciando o efeito térmico sobre a eficiência elétrica.

Além disto, com o Simulador foi possível testar e avaliar a eficiência elétrica de um painel FV para diferentes valores de irradiância, temperatura e ventilação, conforme as condições climáticas típicas dos países tropicais. Durante as avaliações, se verificou a influência da temperatura de operação do painel FV sobre, principalmente, a tensão de circuito aberto, cujos resultados foram condizentes com os modelos matemáticos presentes em artigos científicos.

Diante do que foi apresentado, se conclui que o projeto e desenvolvimento do Simulador Solar é uma alternativa, de custo relativamente baixo, para o teste e

avaliação de painéis FV sob condições adversas, aportando o desenvolvimento de novas soluções que visem à melhoria da eficiência elétrica dessas tecnologias, levando em consideração, principalmente, os aspectos térmicos e radiativos.

4 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FVT-MMF

A partir dos estudos das diversas propostas que visam à melhoria da eficiência elétrica dos painéis FV através do seu gerenciamento térmico (capítulo 2.4), este projeto optou pela integração de duas tecnologias dentre as demais, por entender que ambas possuem características complementares entre si. As tecnologias utilizadas foram: sistema FVT-água e o uso dos MMFs. A integração destas duas tecnologias em um único sistema FV é chamada, neste trabalho, de sistema FVT-MMF.

Esta integração torna-se ainda mais interessante se considerarmos que, no Brasil, é previsto para 2050 que 18% dos domicílios contarão com a geração fotovoltaica distribuída, e 20% dos domicílios possuirão um coletor solar (Ministério de Minas e Energia, 2015).

Além do gerenciamento térmico, conforme já mencionado, as principais contribuições do MMF e do coletor solar para o sistema FVT-MMF são (Figura 76):

- MMF: armazenamento da energia térmica gerada pelo painel FV durante o período de irradiância solar, e disponibilização desta energia nos demais períodos do dia;
- coletor solar: pré aquecimento da água para aplicações domésticas, aumentando a eficiência térmica do sistema.

O sistema FVT-MMF é composto pelos seguintes componentes: painel FV; trocador de calor com aletas; reservatório para MMF; e coletor solar.

Muitas características em relação aos tipos de materiais utilizados e construídos foram definidas a partir dos tópicos 2.4.2 (Sistema fotovoltaico-térmico) e 2.5.3.4 (Estrutura do sistema FV-MMF), principalmente para a escolha do alumínio no trocador de calor, o espaçamento entre as aletas, a forma do coletor solar e a espessura do MMF. Outras características foram definidas a partir das possibilidades de usinagem das peças para o protótipo e pelo bom senso em relação a algumas dimensões.

Com o desenvolvimento do modelo matemático, algumas características físicas do sistema FVT-MMF podem ser alteradas com o objetivo de avaliar o impacto de cada uma sobre a temperatura de operação e eficiência elétrica do painel.

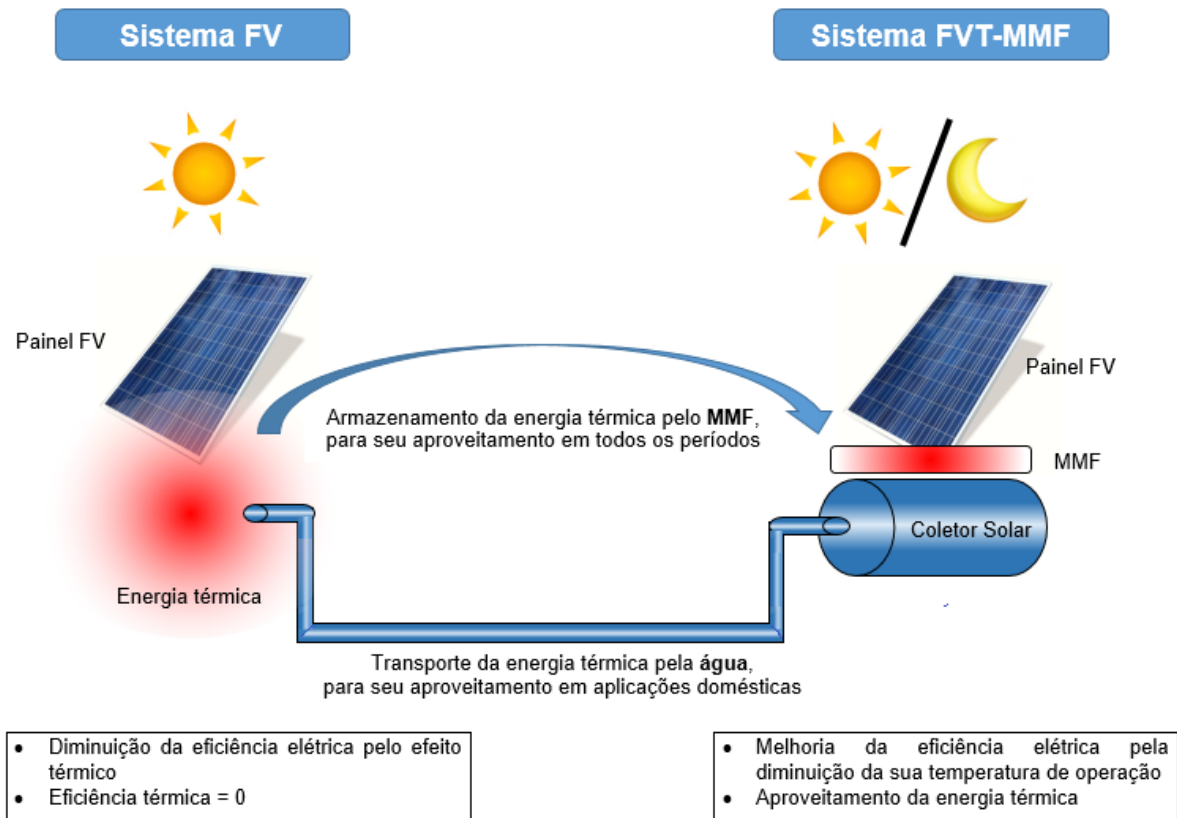


Figura 76 – Modelo conceitual do sistema FVT-MMF

4.1 Trocador de calor com aletas

O trocador de calor (Figura 77) é responsável pela troca de calor entre o painel FV e o MMF através de 7 aletas igualmente espaçadas (25 mm de espaçamento). Assim como (Zakharchenko, 2004), neste projeto optou-se pelo uso da interface de alumínio entre o painel FV e o sistema FVT-MMF por ser um material bom condutor de calor, com um custo relativamente baixo e de fácil manufatura.

4.2 Reservatório para MMF

A função do reservatório para MMF no sistema é de acondicionar o MMF (Figura 78). O reservatório para o MMF tem 30 mm de profundidade, pois, de acordo com (Malvi, Dixon-Hardy, & Crook, 2011), esta espessura é um valor ótimo para melhorar a eficiência elétrica dos painéis FV com reduzido gasto com materiais. É evidente que a espessura de 30 mm depende das características do MMF utilizado, mas se optou optou-se por este valor por acreditar ser um valor razoável o primeiro teste. Conforme já mencionado, podem ser realizados novos estudos a partir do modelo matemático variando apenas a espessura do MMF no sistema. Para a

construção do foi usado o acrílico devido à sua capacidade de isolamento térmico e por permitir observar o derretimento do MMF.

4.3 Coletor solar

O coletor solar (Figura 79) possui um canal de 8 mm para a troca de calor entre o MMF e a água. Esta peça foi usinada a partir de uma chapa de aço devido às características térmicas e físicas, permitindo uma significativa troca de calor entre a água e o MMF e boa resistência mecânica.

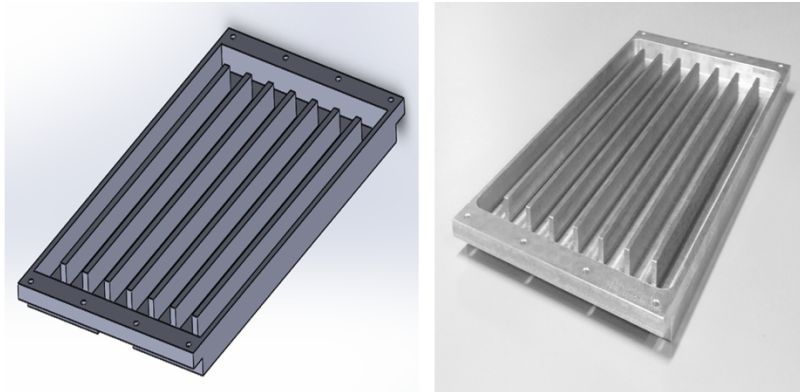


Figura 77 – Trocador de calor com aletas

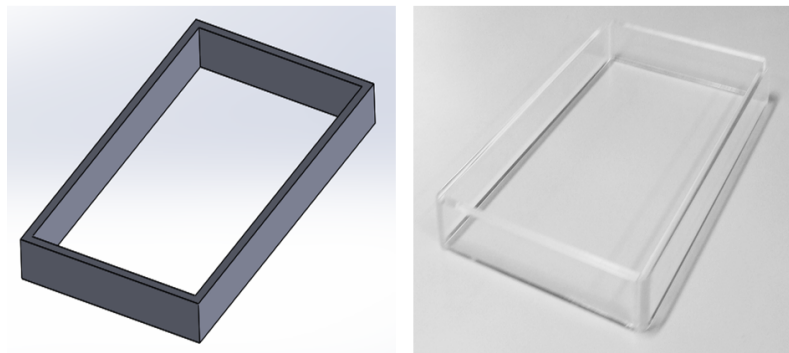


Figura 78 – Reservatório para MMF

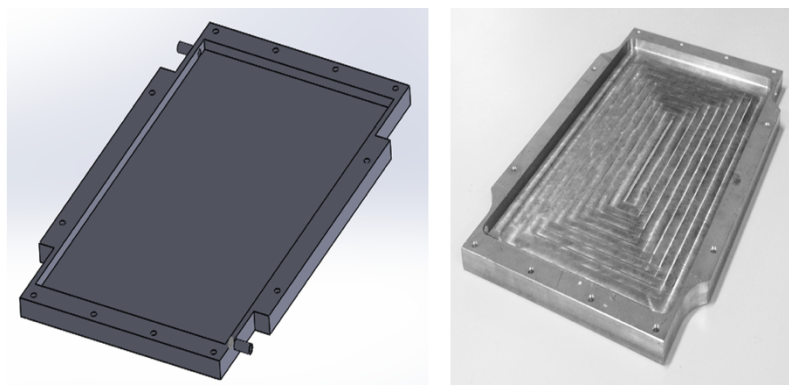


Figura 79 – Coletor solar

Para maiores detalhes das peças utilizadas no sistema, seus respectivos desenhos técnicos estão disponíveis no Apêndice C Apêndice D e Apêndice E.

4.4 Montagem do sistema FVT-MMF

No sistema FVT-MMF, a montagem das partes segue a ordem (de cima para baixo) (Figura 80):

- 1. Painel FV;
- 2. Trocador de calor com aletas;
- 3. Reservatório para MMF;
- 4. Coletor solar.

A escolha por esta disposição é pelo entendimento de que esta ordem tem como objetivo principal a melhoria da eficiência elétrica do painel, e somente depois a eficiência térmica. Como circulação de água pelo coletor solar é por termossifão, seu fluxo é máximo quando a temperatura de todo o sistema já é elevada, sendo justamente isto o que se pretende evitar neste projeto.

A definição da tecnologia para fazer interface com o painel FV levou em consideração a capacidade térmica do MMF e da água. Neste quesito, o MMF se destacou pelas seguintes características:

- capacidade térmica: conforme comentado no item 2.6, os MMF tem a capacidade de armazenar a energia térmica, por unidade de volume, entre 5 a 14 vezes maior que os demais materiais (como a água);
- espessura: neste projeto, o reservatório para o MMF tem espessura de 30 mm, enquanto que o canal para circulação da água no coletor solar possui espessura de 8 mm.

Caso se queira priorizar a eficiência térmica do sistema, deve-se inverter a disposição das tecnologias, com o painel FV em cima, o coletor solar no meio e, em baixo, o MMF. É evidente que isto requer um estudo mais aprofundado em trabalhos futuros que permitirá, também, quantificar o impacto da disposição das tecnologias no sistema FVT-MMF, por meio experimental e computacional.

Para a montagem do sistema, a base glicerizada foi avaliada no laboratório de química da PUCPR, com o auxílio do professor Dr. Clayton Fernandes de Souza (Figura 81). Na avaliação foram usados: um calorímetro; amostras da base glicerizada; e termopares para medir a temperatura das amostras e da água.

Após a avaliação, constatou-se que a base glicerinada é uma mistura, por não possuir uma temperatura de mudança de fase bem definida, conforme observado no capítulo 2.5 (Módulos FV com materiais de mudança de fase). Lembrando que, na maioria das pesquisas nesta linha, é usada uma mistura pura produzida exclusivamente para o controle da temperatura, diferente desta proposta. Este ponto de fusão é interessante por estar dentro da faixa de operação dos painéis FV em países tropicais.

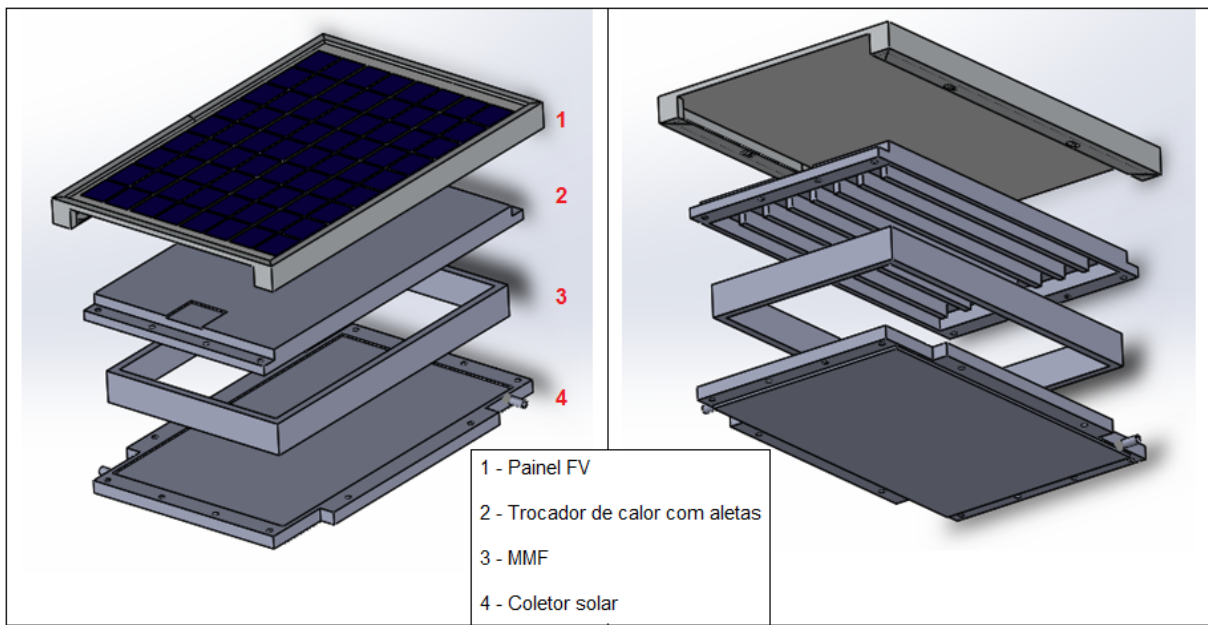


Figura 80 – Composição estrutural do sistema FVT-MMF

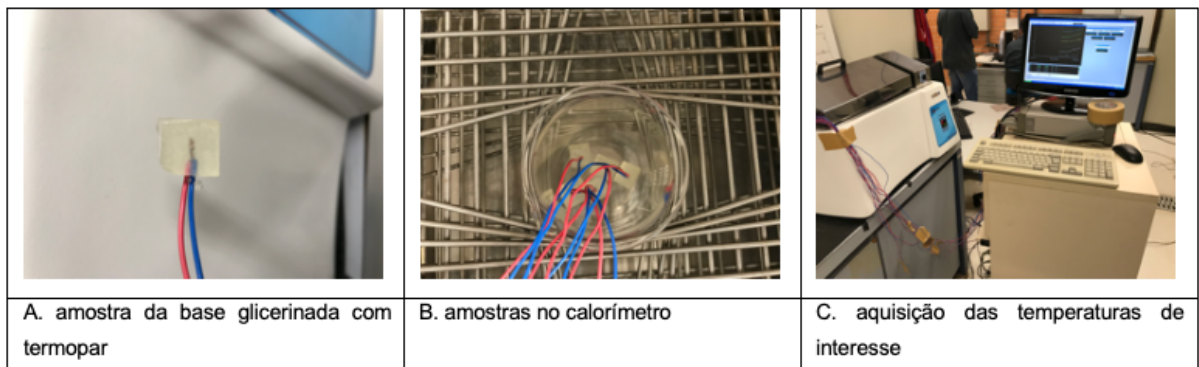


Figura 81 – Análise da base glicerinada no calorímetro

A Figura 82 apresenta o comportamento da temperatura das amostras e da água no calorímetro. Nela, pode-se observar que a base glicerinada absorve o calor desde o início da avaliação (em torno de 20 °C), já apresentando uma temperatura menor do que a temperatura da água usada no calorímetro. Após, aproximadamente,

1800 segundos, toda a base glicerizada já havia sido derretida, e a temperatura das amostras convergiram à temperatura da água.

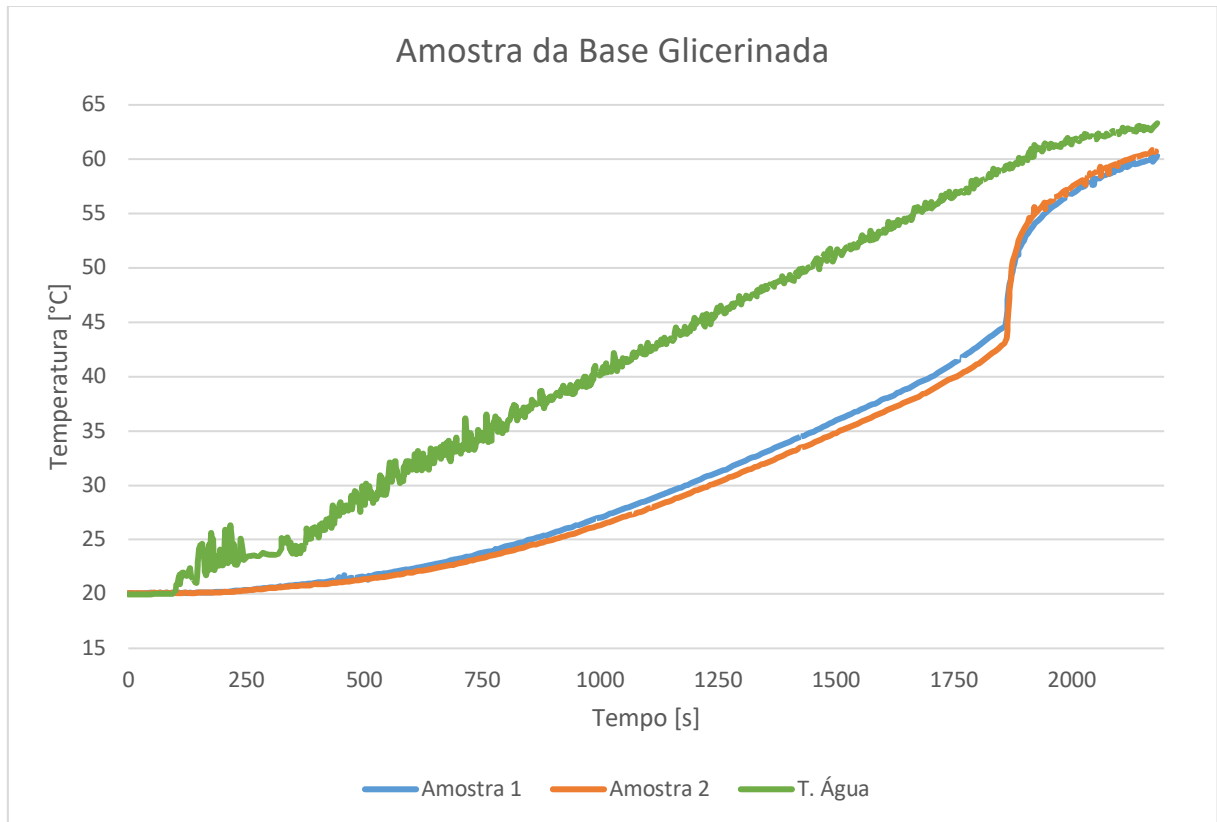


Figura 82 – Avaliação da base glicerizada como material de mudança de fase

A base glicerizada, comprada em forma de barra (1 kg) foi derretida utilizando um soprador térmico para ser acomodada no servetário para MMF (Figura 83). No sistema FVT-MMF foram utilizadas 1 e ½ barras de base glicerizada (1,5 kg).

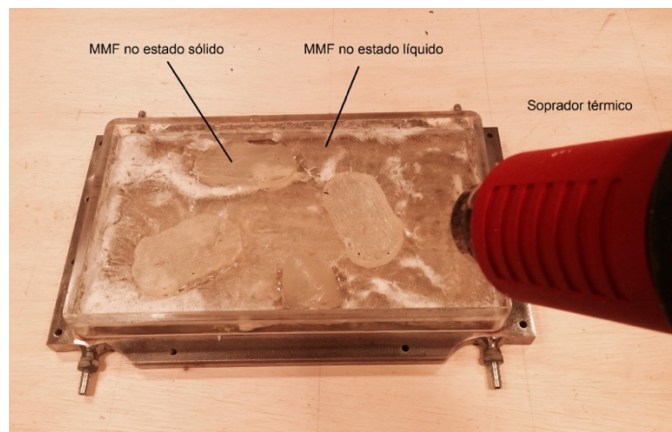


Figura 83 – Derretimento da base glicerizada no reservatório para MMF

No trocador de calor com aletas, que faz interface com o painel FV e o reservatório, foram inseridos 2 termopares para medir a temperatura do MMF (Figura 84). Ciente da existência de um gradiente de temperatura no MMF, um dos termopares foi posicionado para medir a temperatura na camada superior e o outro na camada inferior, lembrando que a altura do reservatório para MMF é de 30 milímetros.

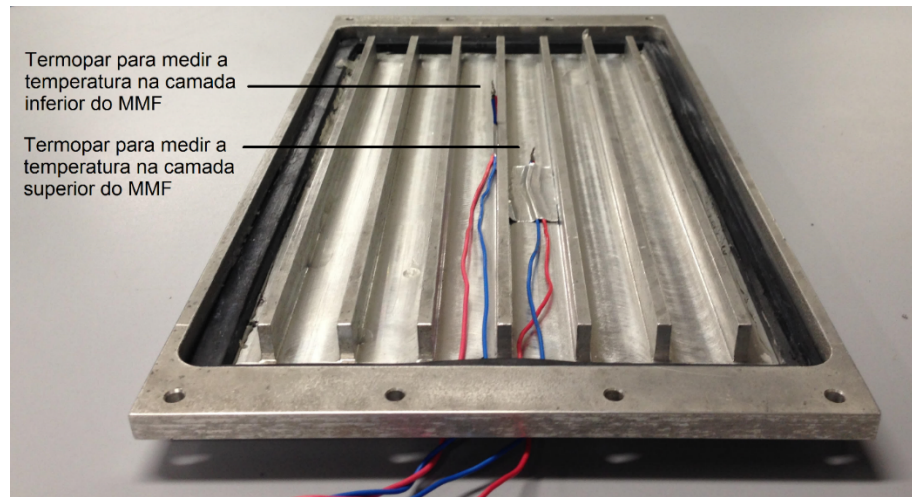


Figura 84 – Trocador de calor com 2 termopares

Para melhorar a condução entre o painel FV e o trocador de calor, foi inserida uma camada de pasta térmica na interface entre eles (Figura 85).

No coletor solar foram conectadas 2 mangueiras de 1/4 polegada, sendo uma para a entrada de água e a outra para saída. Dois termopares mediram a temperatura da água que entra e sai do coletor (Figura 86).

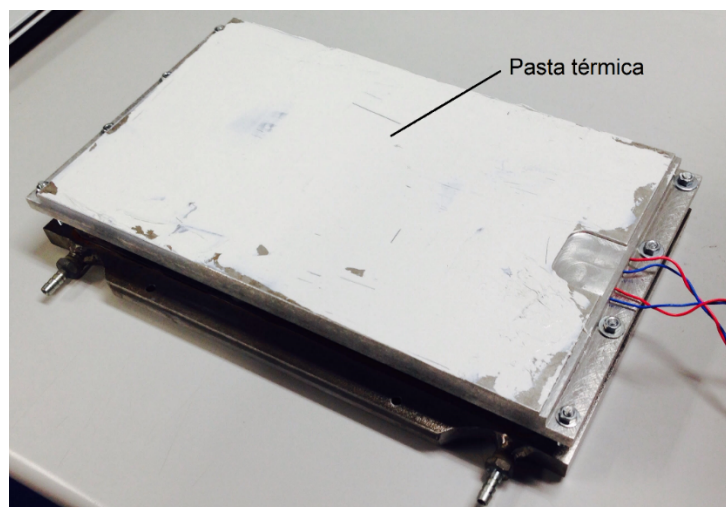


Figura 85 – Trocador de calor com pasta térmica

Na outra extremidade das mangueiras foram inseridas duas conexões (de 1/4 e 5/16 polegadas) para a conexão com o reservatório de água: uma das conexões foi posicionada na parte inferior do reservatório, para levar a água na temperatura ambiente até o coletor solar; e a outra conexão na parte superior, para o retorno da água quente ao reservatório.

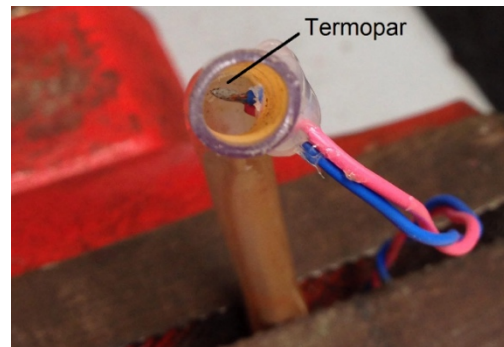


Figura 86 – Termopar para medir a temperatura da água na entrada e saída do coletor solar

A Figura 87 e Tabela 9 apresentam o posicionamento e lista dos termopares usados na avaliação experimental do sistema FVT-MMF.

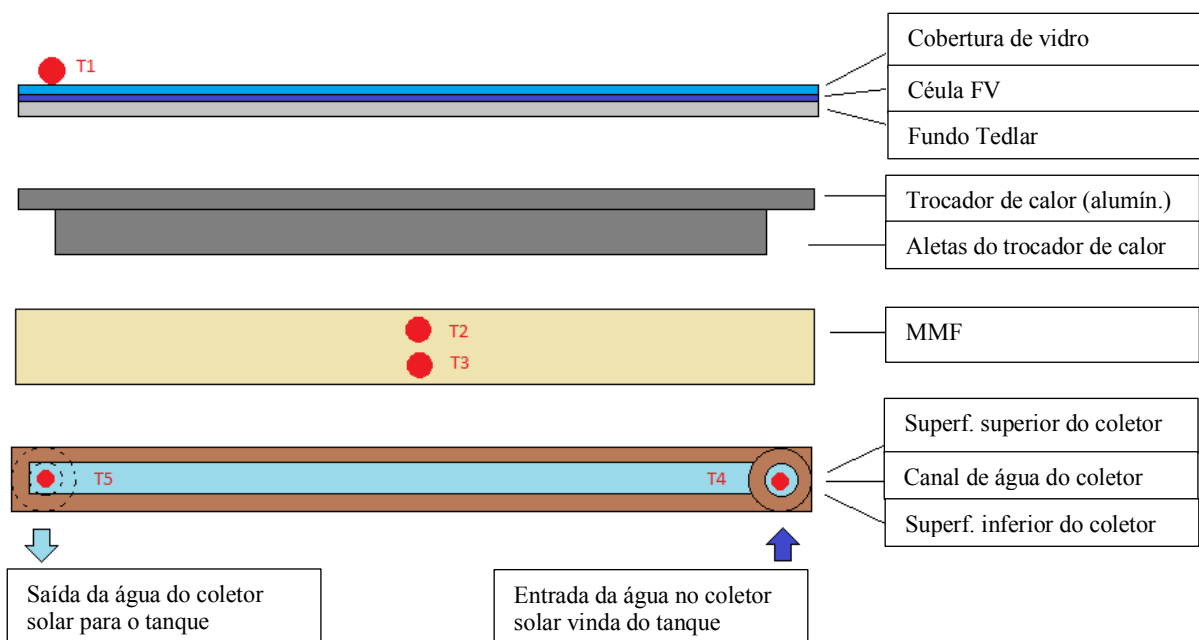


Figura 87- Posicionamento dos termopares no sistema FVT-MMF

Durante a experimentação do sistema FVT-MMF, houve dificuldades para o cálculo da vazão da água por termossifão (por ser um processo natural), havendo a necessidade de controlar a vazão e manter o fluxo constante, para uma melhor avaliação do resultado da circulação da água no sistema sobre a eficiência elétrica do painel FV. Mediante este problema, foi usada uma bomba para facilitar e controlar a

vazão da água pelo coletor solar. Todavia, é importante lembrar que na proposta do sistema foi definida que a circulação da água deve ser, prioritariamente, por termossifão, para evitar o uso da energia elétrica gerada pelos painéis.

Tabela 9 – Termopares usados na avaliação do sistema FVT-MMF

Termopares no sistema FVT-MMF	
T1	Termopar no painel FV
T2	Termopar no MMF (camada superior)
T3	Termopar no MMF (camada inferior)
T4	Termopar na entrada da água no coletor solar
T5	Termopar na saída da água do coletor solar

A montagem do sistema FVT-MMF seguiu o modelo apresentado na Figura 88, na qual, conforme já mencionado, todo o sistema foi inserido na câmara climatizada do LST da PUCPR.

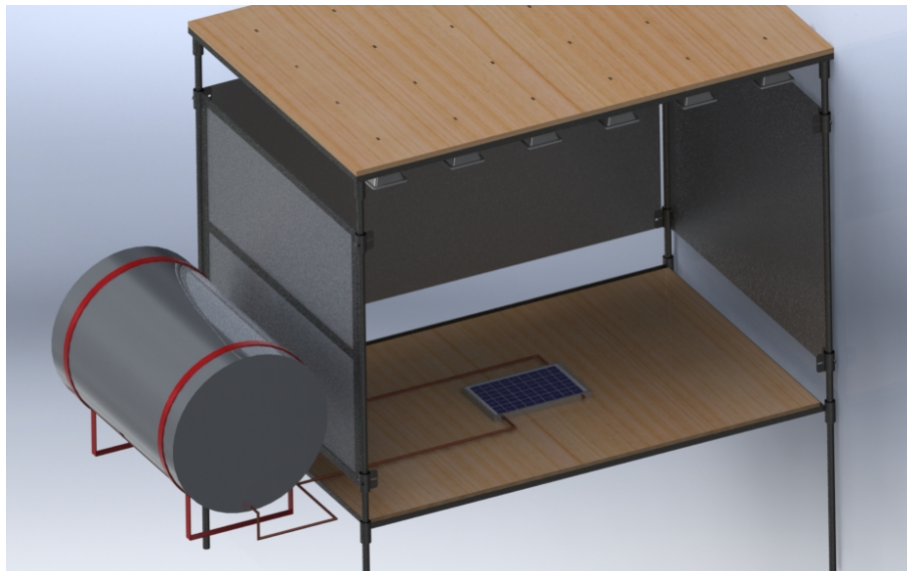


Figura 88 – Modelo do sistema FVT-MMF montado

O processo de avaliação do sistema FVT-MMF durou, aproximadamente, 6h. A primeira hora foi dedicada para a estabilização da temperatura da câmara em 25 °C (temperatura ambiente definida pelo STC). Em seguida, as lâmpadas do Simulador Solar foram ligadas e ajustadas, com o auxílio do piranômetro, para uma irradiância na superfície do painel FV de 1000 Wm^{-2} . Durante as três horas subsequentes, foram

coletados os seguintes dados, usando termopares tipo T e o voltímetro do equipamento de aquisição de dados (Figura 89):

- irradiância na superfície do painel FV;
- temperatura ambiente;
- temperatura de operação do painel FV convencional (referência) e do painel no sistema FVT-MMF;
- tensão V_{oc} do painel FV convencional e do painel no sistema FVT-MMF;
- temperatura do MMF;
- temperatura da água que sai do tanque;
- temperatura da água que retorna para o tanque, após circular pelo coletor solar.

As incertezas da avaliação experimental foram devidamente calculadas e apresentadas no apêndice, conforme especificado a seguir:

- Incertezas na leitura da tensão (Capítulo A.1);
- Incertezas na leitura da corrente (Capítulo A.2);
- Incertezas na leitura da temperatura (Capítulo A.3).

A Figura 90 é a imagem térmica do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF durante sua avaliação. Nesta figura é possível observar que a diferença entre a temperatura na superfície do painel no sistema FVT-MMF chegou a ficar mais de 12°C abaixo da temperatura do convencional. Enquanto a temperatura na superfície do painel no sistema FVT-MMF era de 64°C , a temperatura no painel convencional era de $76,2^{\circ}\text{C}$.

Após 3h com a irradiância na superfície do módulo FV de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, as lâmpadas foram desligadas para analisar a capacidade do MMF de armazenar a energia térmica. Este processo durou duas horas.

Foram estudados três casos durante o processo de avaliação do sistema FVT-MMF. A diferença entre cada um dos casos é:

- Caso A: sistema resfriado pela água com vazão de 0,026 l/s;
- Caso B: sistema resfriado pela água com vazão de 0,014 l/s,
- Caso C: sistema sem o resfriamento pela água (vazão = 0 l/s).

Os resultados obtidos a partir de cada caso são apresentados no capítulo 5 (Resultados).

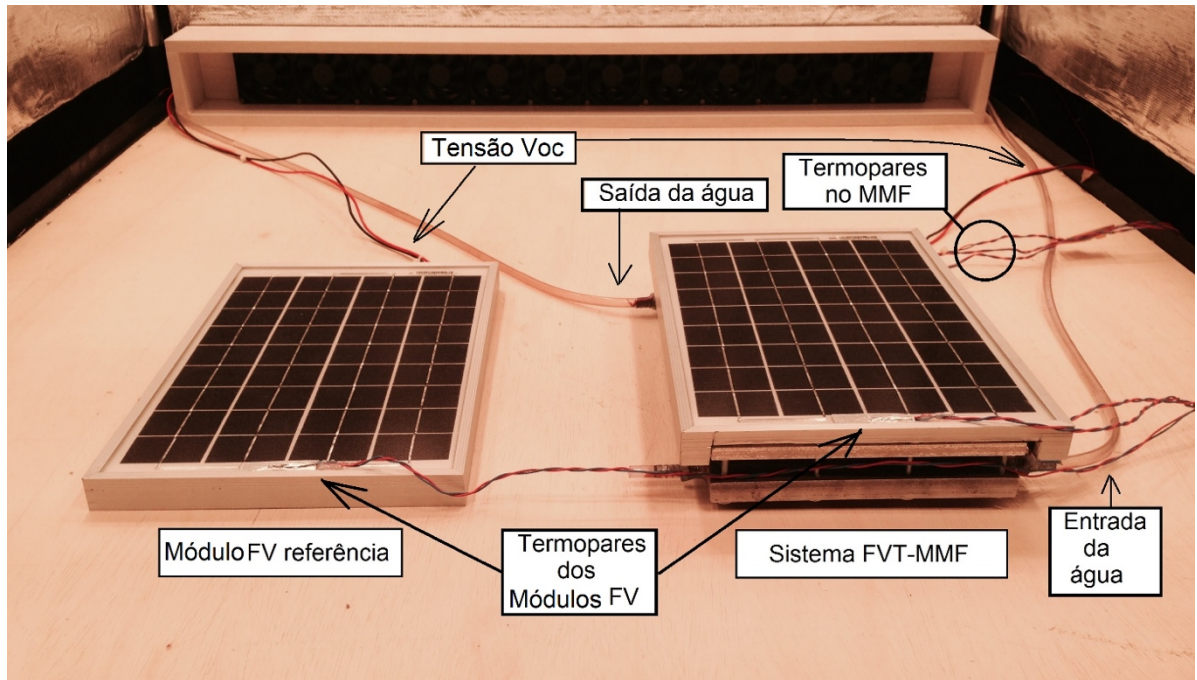


Figura 89 – Configuração dos equipamentos para a avaliação do sistema FVT-MMF e do painel convencional.

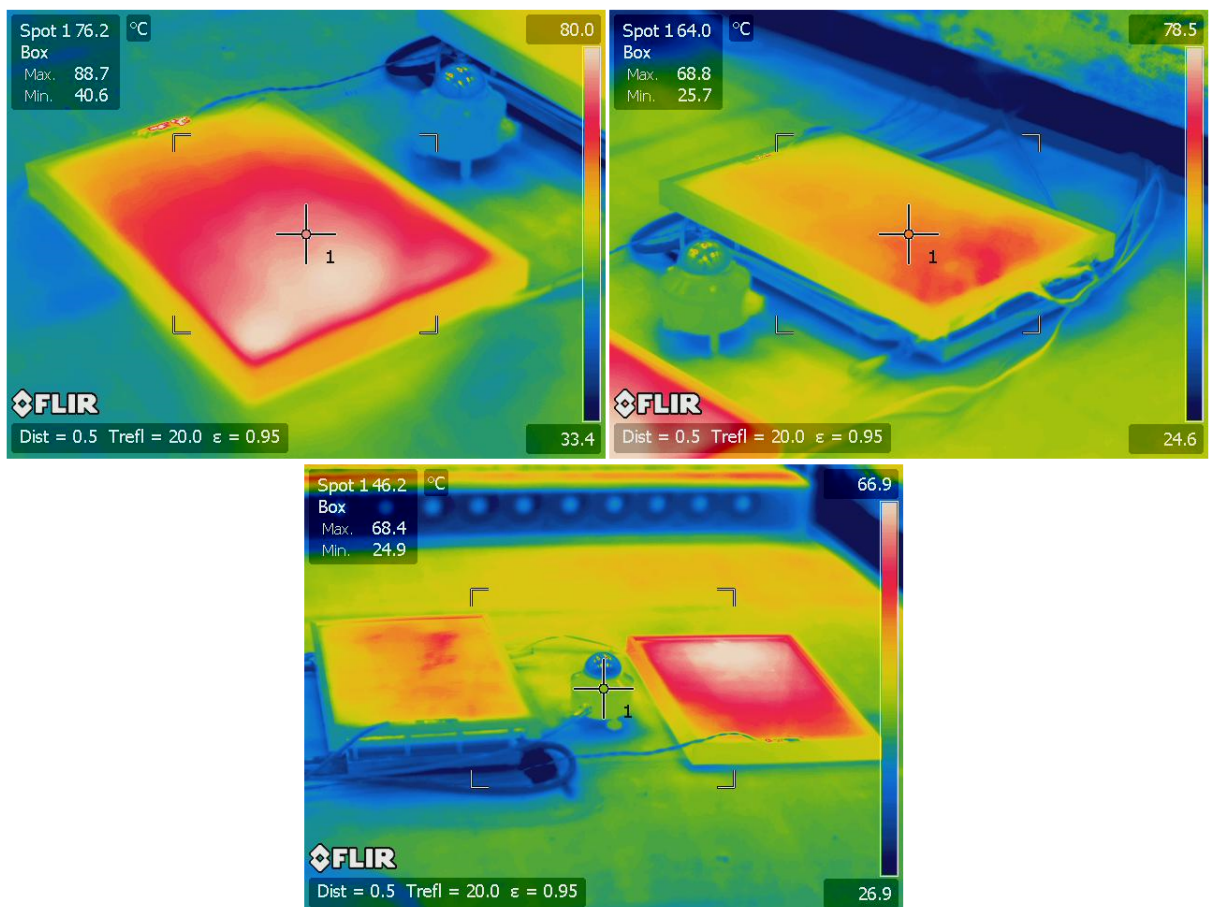


Figura 90 – Imagem térmica do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF durante a avaliação

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das avaliações experimentais do caso A, B e C, além de uma comparação entre todos eles.

5.1 Caso A: avaliação do sistema FVT-MMF com vazão de 0,026 l/s

Para o caso A, a Figura 91 exibe a temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF, onde se pode observar que durante o período de irradiância, a temperatura do sistema FVT-MMF ficou abaixo da temperatura do painel FV convencional, chegando à diferença máxima de 9,63 °C. Durante o período sem irradiância, que representa o período da noite, a temperatura do sistema FVT-MMF supera a temperatura do painel convencional, devido à ação do MMF no armazenamento da energia térmica. Esta característica é importante, porque no período da noite é que há uma maior demanda pela água aquecida para o uso doméstico.

É importante destacar que, provavelmente, a temperatura de operação dos painéis FV medida pelos termopares não representa integralmente a temperatura real, isto porque existe um gradiente de temperatura sobre toda a superfície do painel, conforme se pode observar na Figura 90. Ou seja, dependendo do ponto onde o termopar for colocado no painel FV, a temperatura medida pode apresentar algumas variações.

Mesmo sabendo do gradiente de temperatura existente, o único local disponível para medir a temperatura do painel no sistema FVT-MMF foi próximo das bordas, justamente onde a temperatura é menor. Todavia, o painel convencional e o sistema FVT-MMF tiveram sua temperatura medida na mesma posição (próximo da borda), desta forma o erro no resultado da diferença de temperatura entre ambos os painéis é minimizado.

A Figura 92 contém a tensão de saída dos dois painéis avaliados e a Figura 93 apresenta a relação entre a tensão do painel no sistema FVT-MMF e do painel convencional. Observa-se que nos primeiros minutos do ensaio, a diferença entre as tensões chega a 14%, devido principalmente à maior inércia térmica do sistema FVT-MMF. Este valor diminui ao longo do tempo, aproximando-se de um comportamento estável próximo de 10%.

Durante todo o período do ensaio, a temperatura da água aumentou de 25°C até 33°C. Após o desligamento do sistema de iluminação do simulador solar, a temperatura da água que entrava no tanque continuava sendo, por um certo período, maior do que a temperatura da água que saía do tanque, isto devido a maior inércia térmica do MMF.

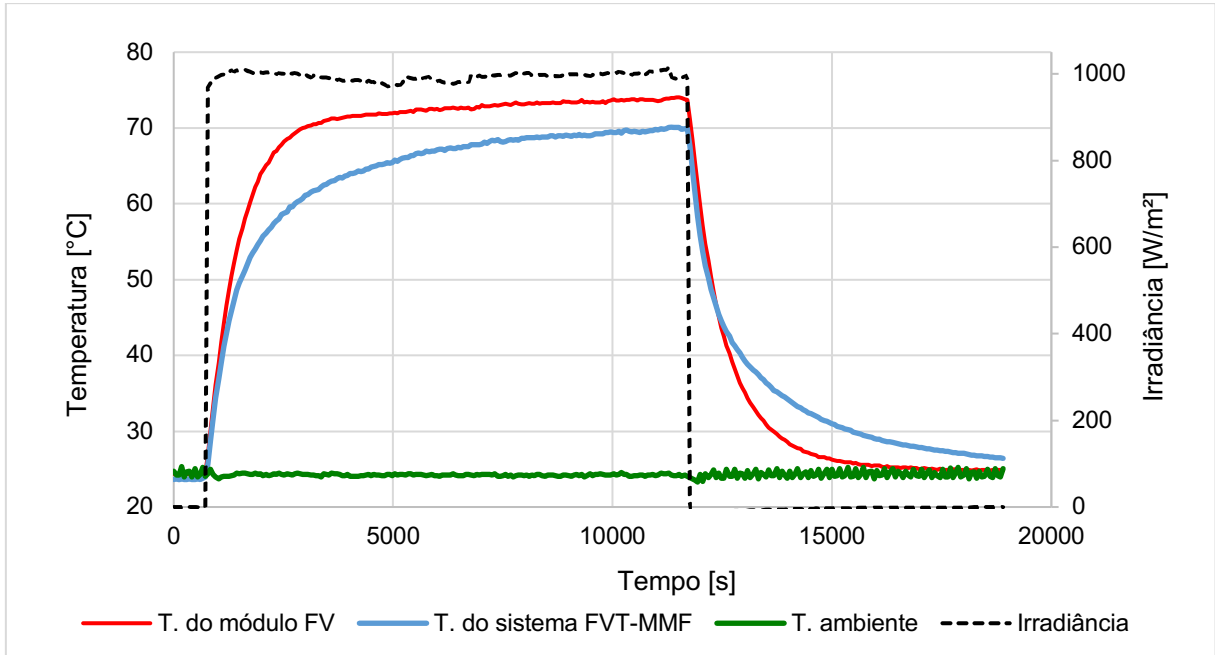


Figura 91 – Temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,026 l/s)

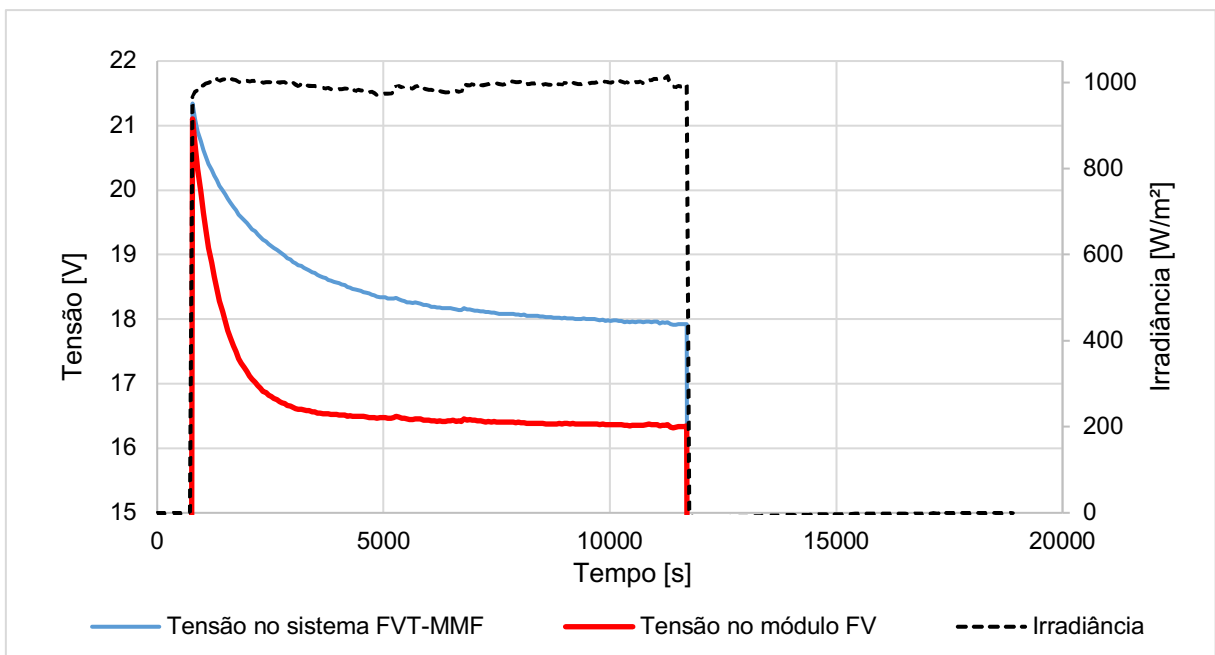


Figura 92 – Tensão Voc do painel FV e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,026 l/s)

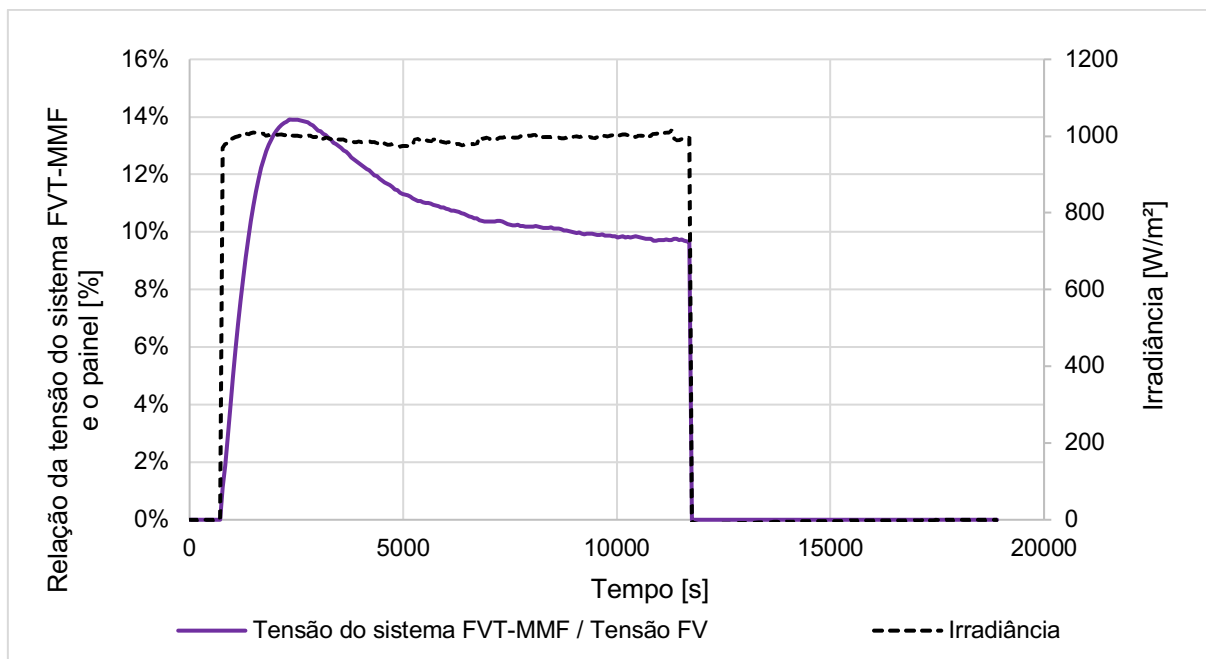


Figura 93 – Relação entre a tensão Voc do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional (vazão = 0,026 l/s)

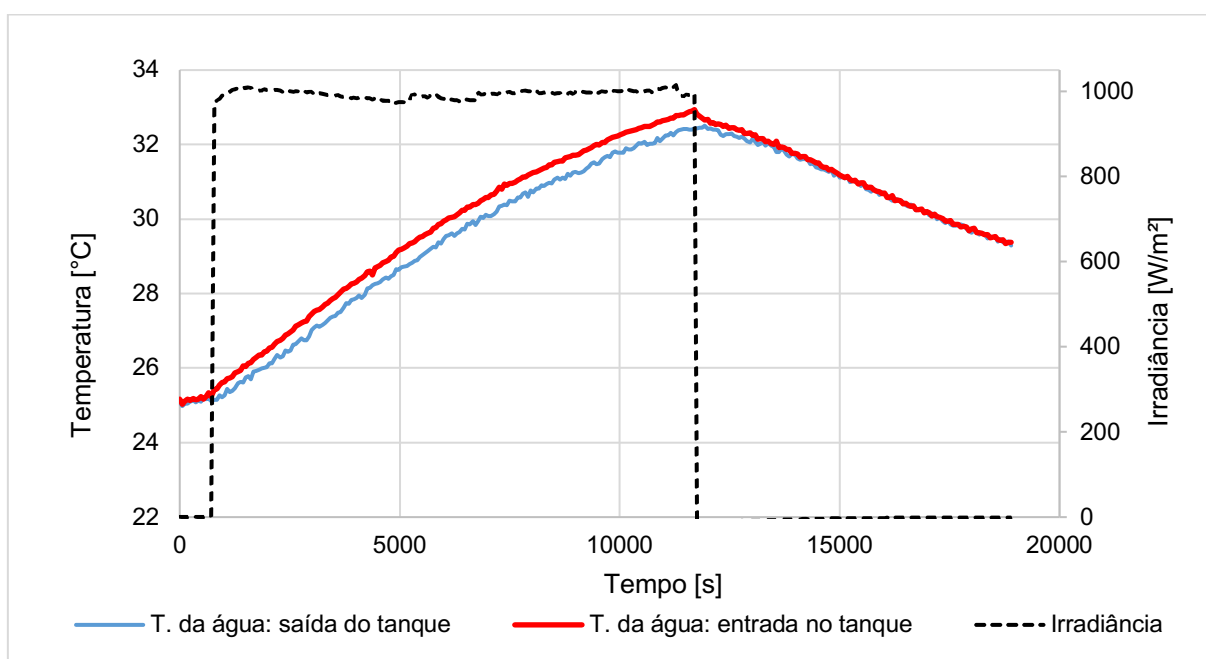


Figura 94 – Temperatura da água que sai e retorna do tanque (vazão = 0,026 l/s)

5.2 Caso B: avaliação do sistema FVT-MMF com vazão de 0,014 l/s

Os resultados obtidos no caso B, com a vazão da água de 0,014 l/s, não apresentaram diferenças significativas quando comparados com os resultados obtidos no caso A.

As Figura 95, Figura 96, Figura 97 e Figura 98 apresentam, respectivamente, a temperatura dos sistemas, a tensão de saída, a relação entre as tensões e a temperatura da água que entrava e saía do tanque.

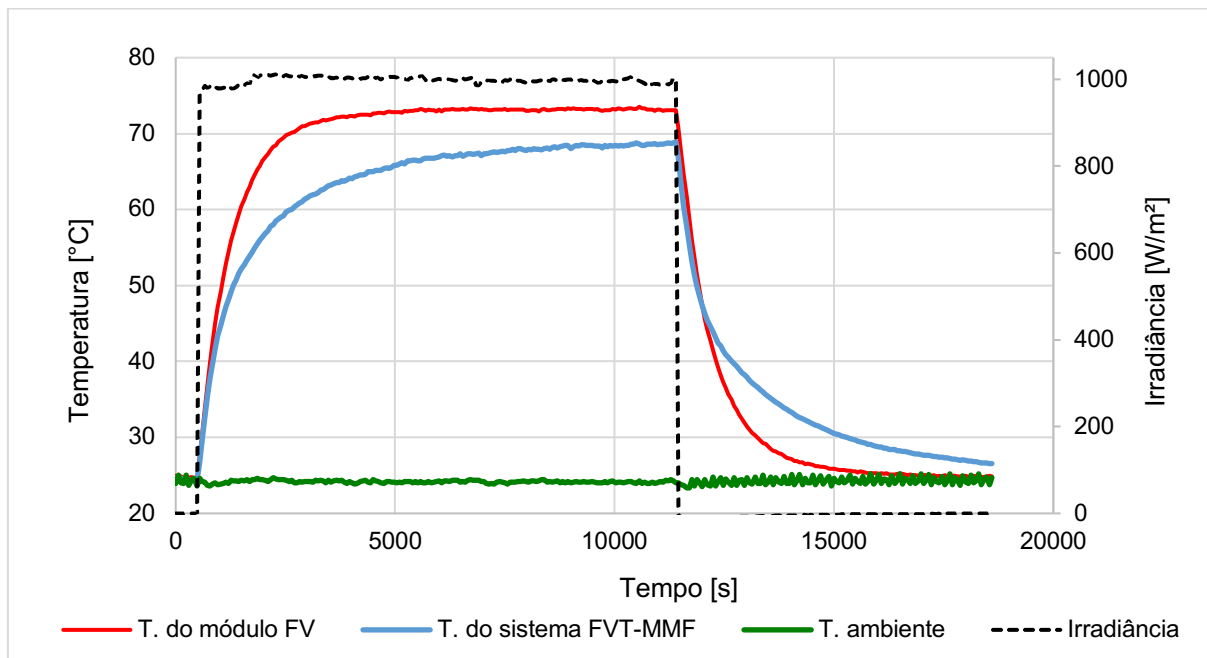


Figura 95 - Temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,014 l/s)

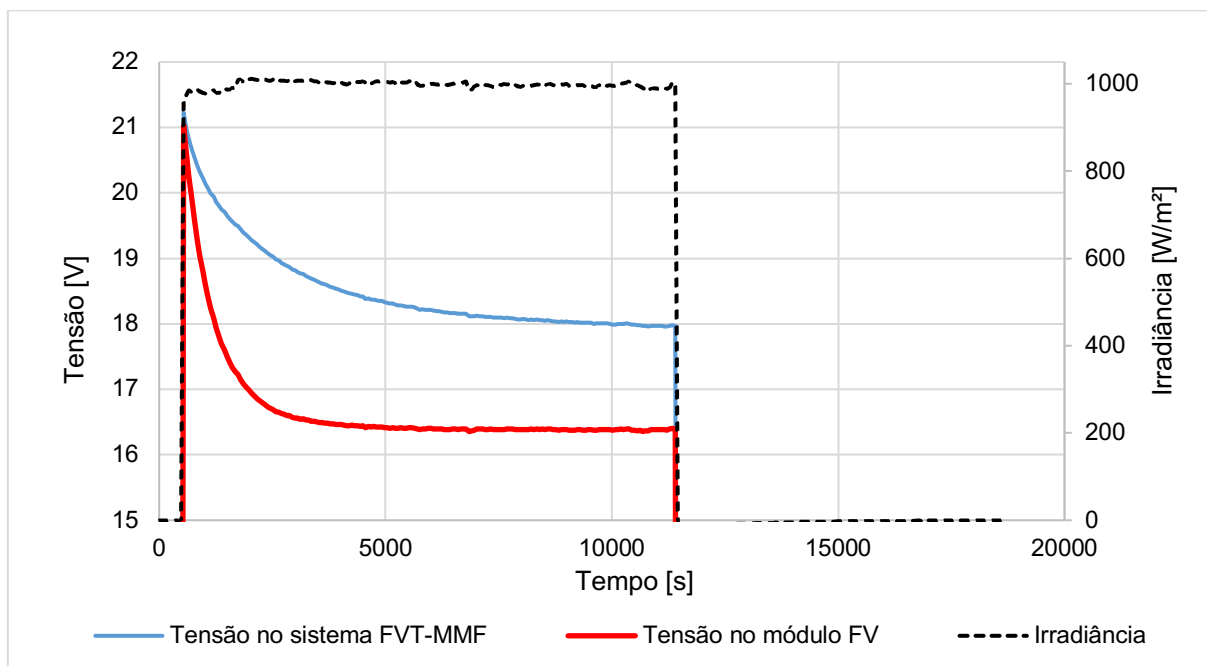


Figura 96 - Tensão Voc do painel FV e do sistema FVT-MMF (vazão = 0,014 l/s)

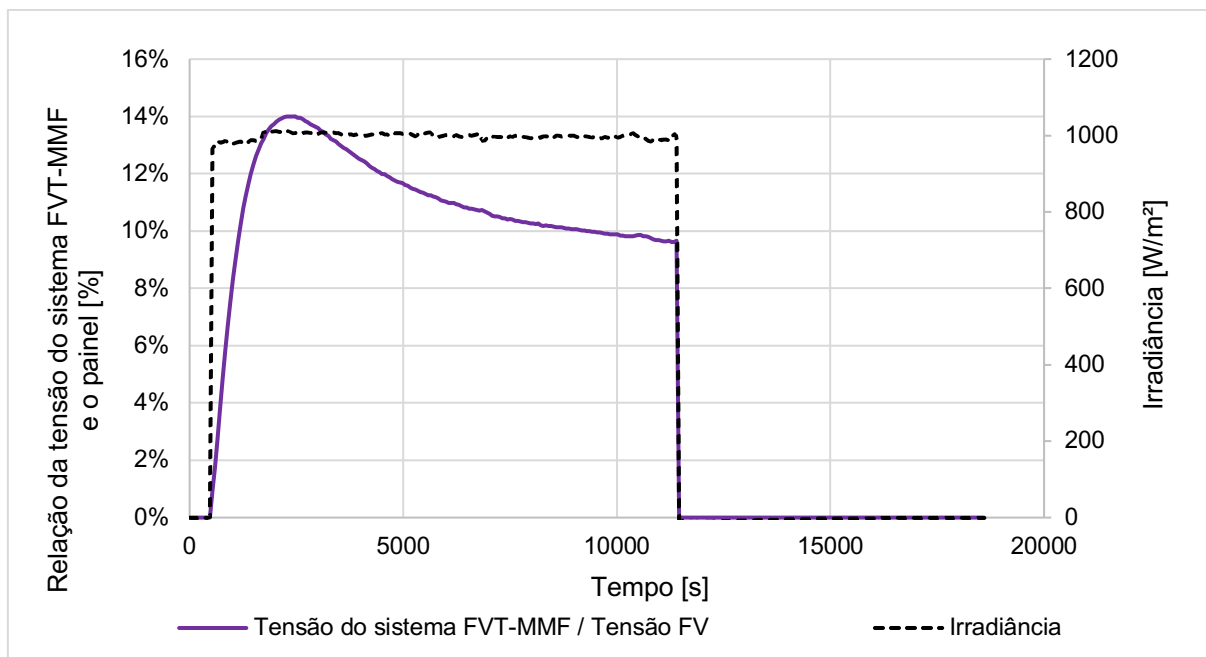


Figura 97 - Relação entre a tensão Voc do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional (vazão = 0,014 l/s)

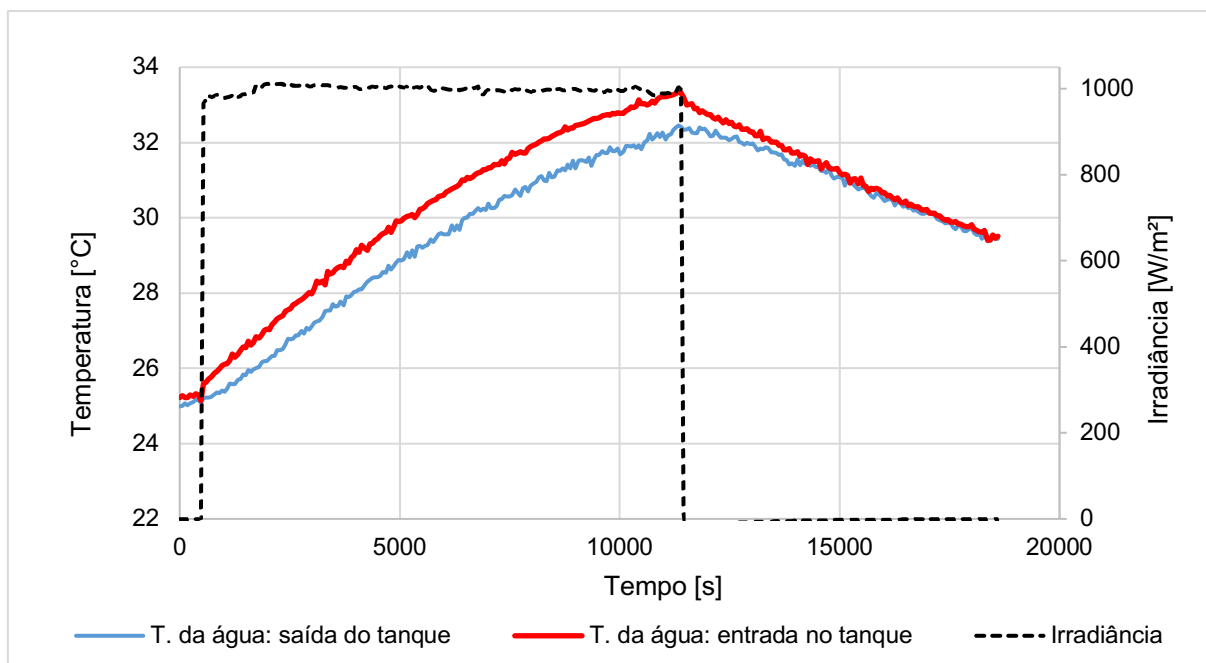


Figura 98 - Temperatura da água que sai e retorna do tanque (vazão = 0,014 l/s)

5.3 Caso C: avaliação do sistema FVT-MMF sem vazão

No caso C, o sistema FVT-MMF foi avaliado sem o fluxo da água pelo coletor solar com o objetivo de quantificar a importância da água no gerenciamento térmico. Desta forma, o sistema se tornou apenas FV com MMF.

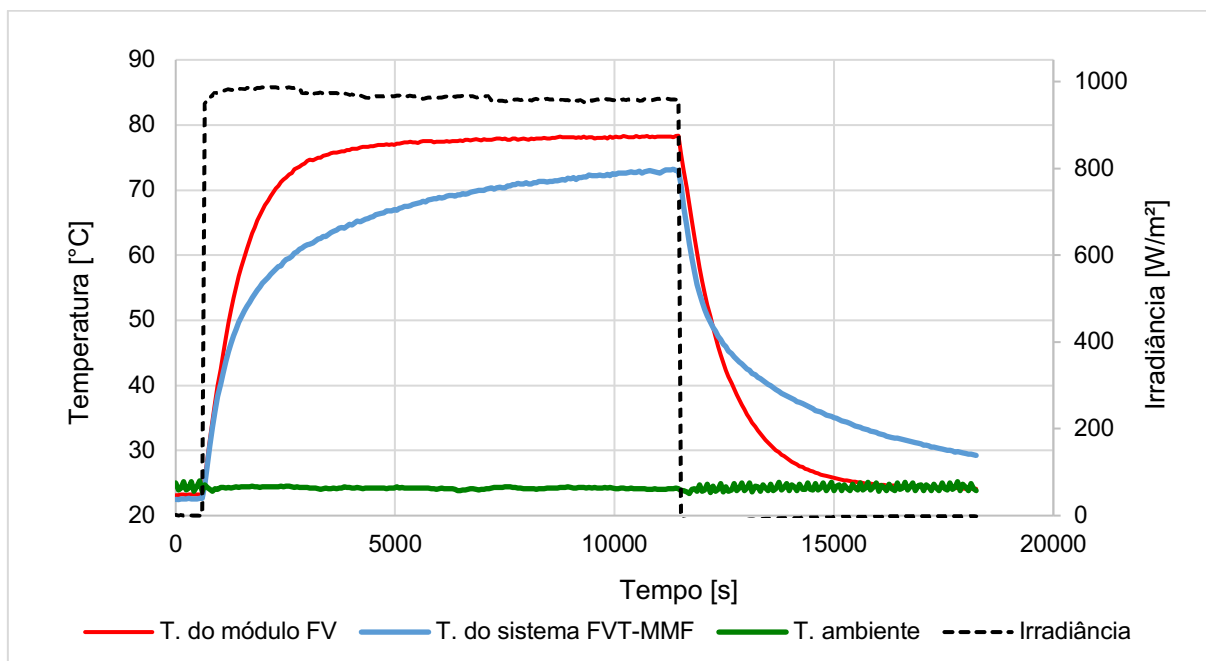


Figura 99 - Temperatura de operação do painel FV convencional e do sistema FVT-MMF (vazão = 0 l/s).

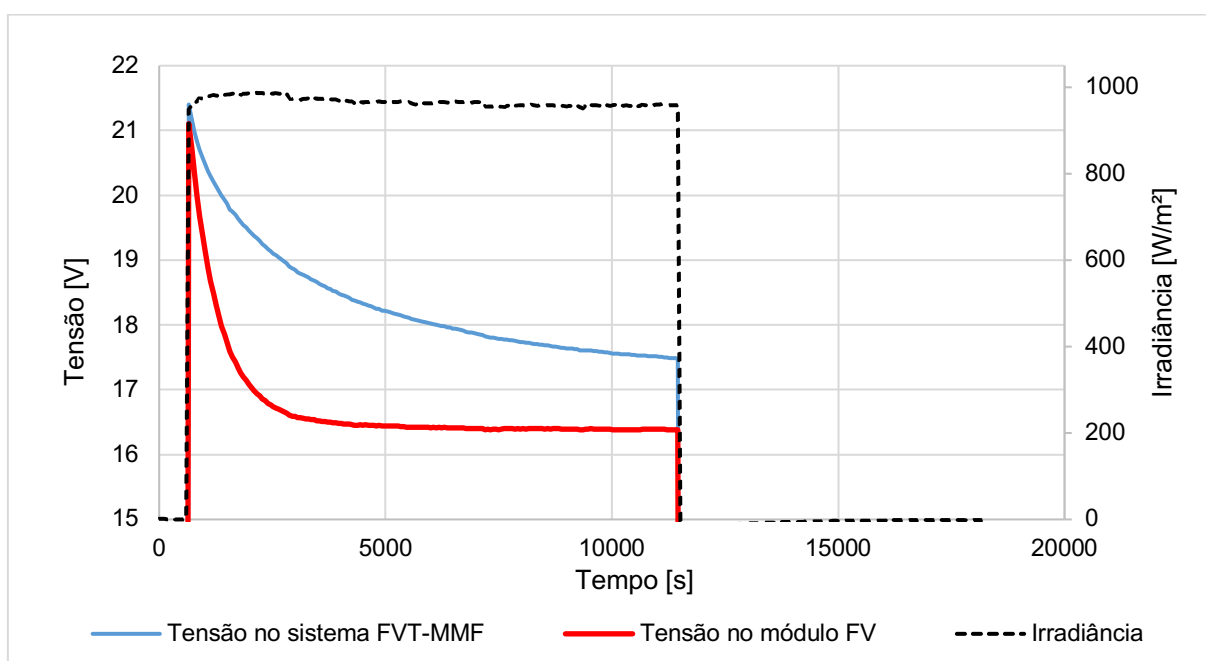


Figura 100 - Tensão Voc do painel FV e do sistema FVT-MMF (vazão = 0 l/s)

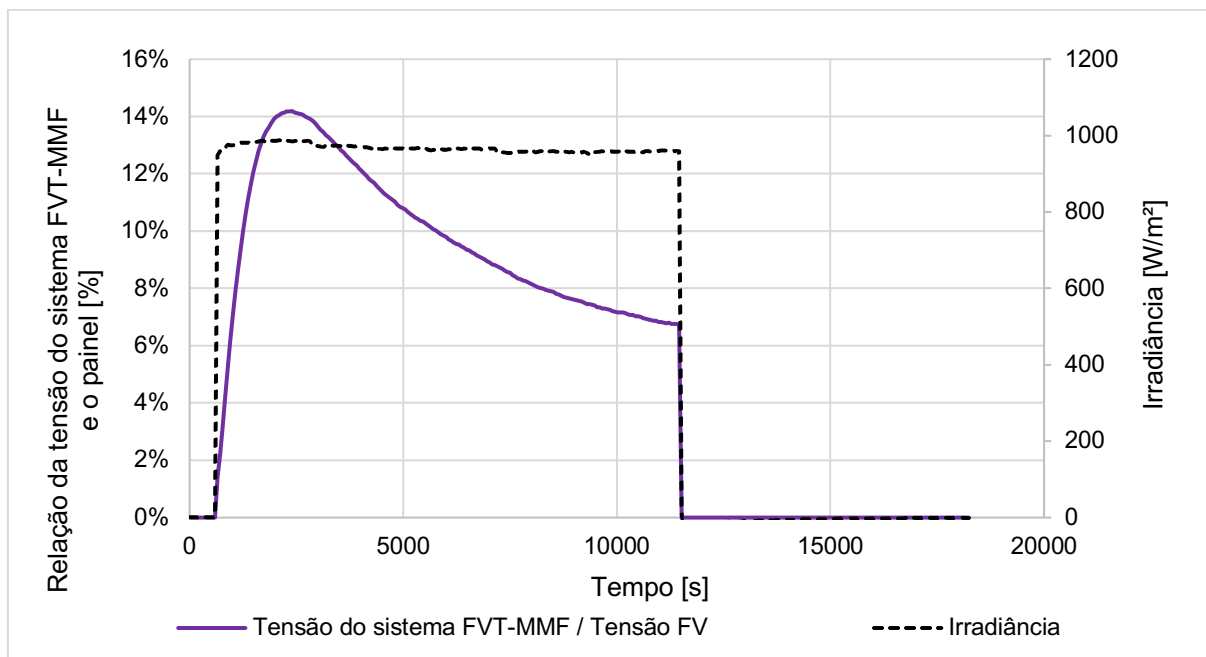


Figura 101 - Relação entre a tensão Voc do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional (vazão = 0 l/s)

5.4 Comparação entre os casos A, B e C

Ao comparar os três casos ensaiados (Figura 102), observa-se que:

- a diferença na tensão dos painéis FV chegou a quase 3% maior para os casos A e B (sistemas com água) em relação ao sistema C (sem o fluxo da água);
- a variação na vazão da água de 0,026 para 0,014 l/min no sistema FVT-MMF não causou impactos relevantes sobre a tensão dos painéis FV.

Ou seja, esta comparação demonstrou que a presença da água para a refrigeração do sistema FV tem um impacto significativo na tensão de saída dos painéis, mas a variação da velocidade da vazão da água entre os casos A e B aparentou ser pequena ou pouco significativa para resultar em uma maior diminuição da temperatura do painel FV.

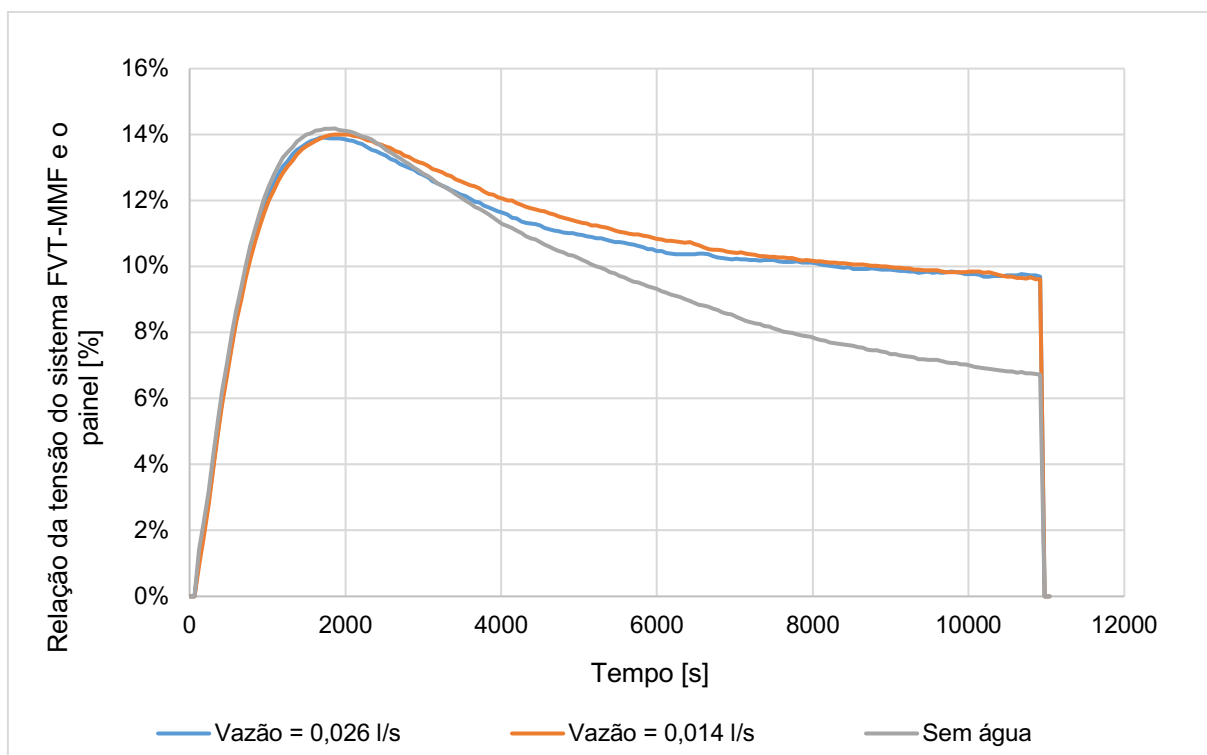


Figura 102 – Comparação entre as tensões de saída dos painéis FV nos casos A, B e C

6 MODELO MATEMÁTICO

Este capítulo apresenta o modelo matemático da proposta, com o objetivo de comparar os resultados simulados com os experimentais, avaliando-a e permitindo a rápida análise do sistema sob outras condições de irradiância.

O modelo foi desenvolvido a partir da figura do FTV-MMF em vista explodida (Figura 103) e corte (Figura 104), tendo como princípio a proposta de (Weiss, Amara, & Menezes, 2012). Nele faz-se uso dos circuitos elétricos para representar o modelo térmico.

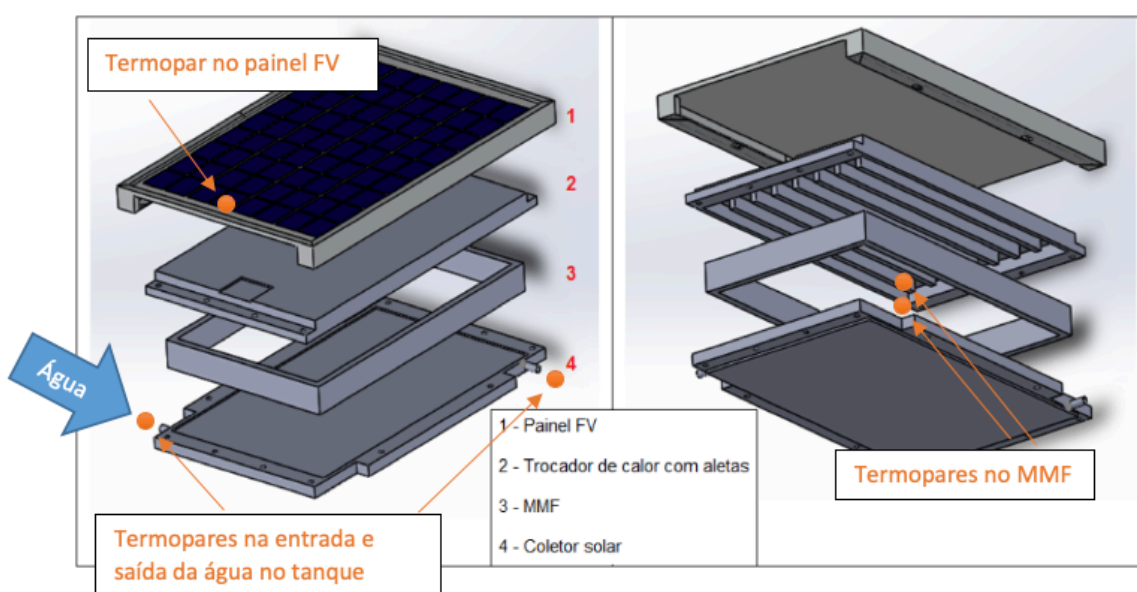


Figura 103 – Vista explodida do sistema FVT-MMF com termopares posicionados

A

Figura 105 apresenta o modelo proposto, sendo à esquerda o circuito completo e à direita o circuito simplificado (circuito equivalente). Os resistores representam os coeficientes de troca de calor entre cada camada do sistema (sendo inversamente proporcional à condutividade térmica). Os capacitores dos circuitos representam a capacidade térmica de cada material usado no sistema.

No nó indicado por T_{pv} (temperatura do painel fotovoltaico) há a incidência da radiação $I_{(t)}$ associada à transmissividade do vidro ($\tau_{(g)}$) e a absorptância das células FV ($\alpha_{(pv)}$). Neste mesmo nó, há ainda, a saída de energia associada à energia elétrica gerada, produto da radiação incidente e a eficiência elétrica do painel (η_{pv}).

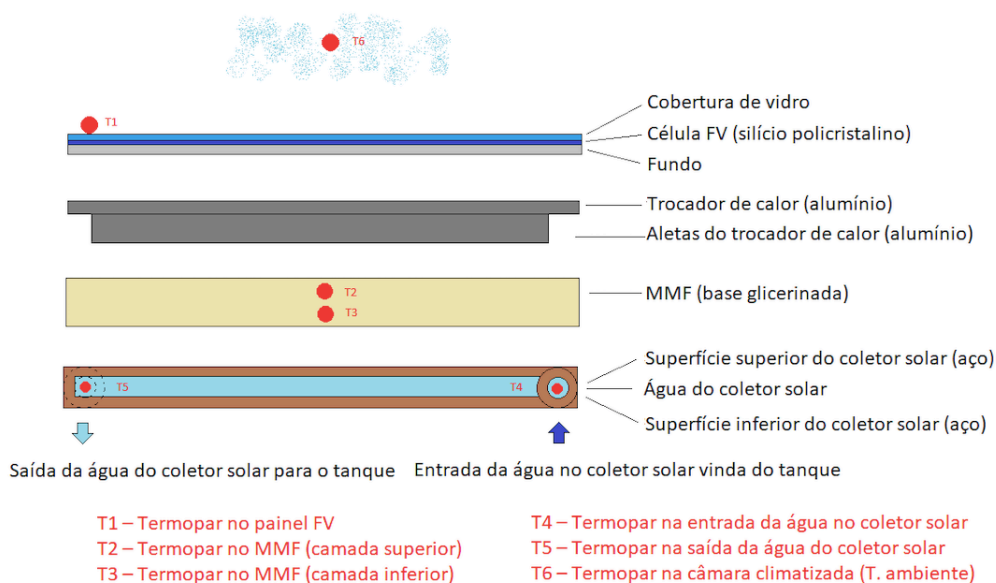


Figura 104 – Estrutura em corte do sistema FVT-MMF

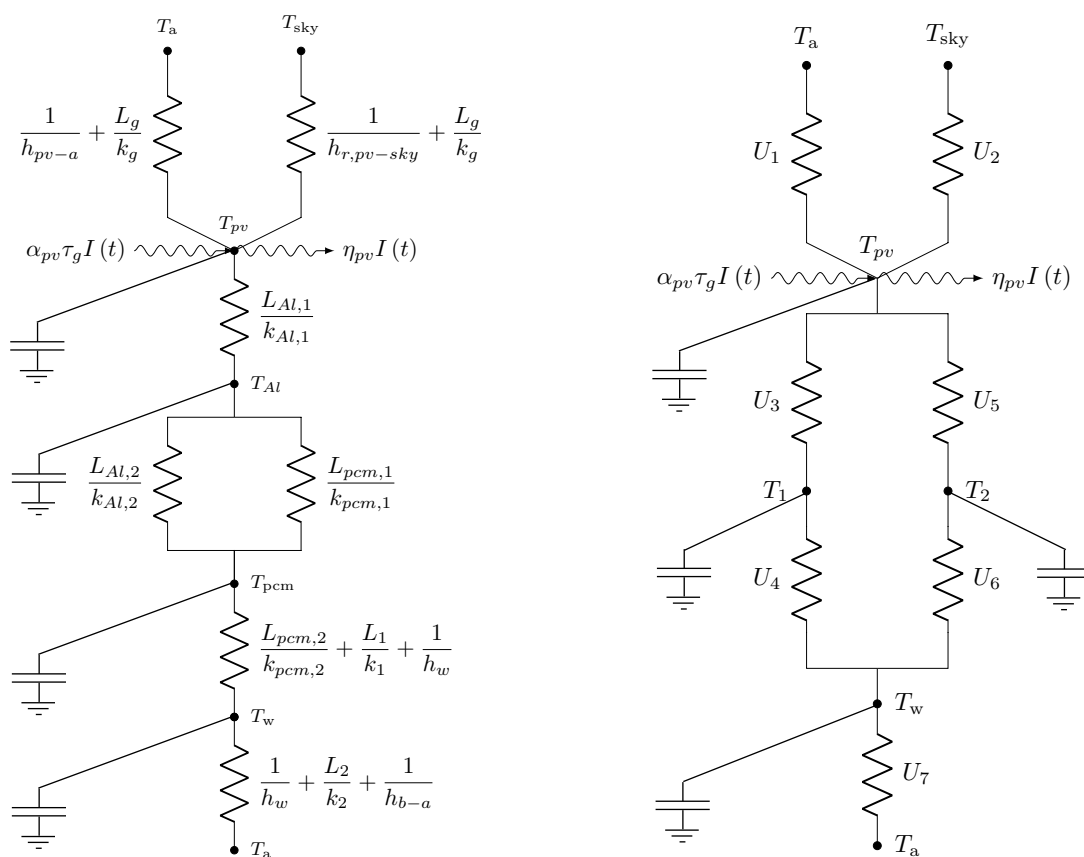


Figura 105 – Modelo matemático do sistema FTV-MMF

A partir do modelo completo da

Figura 105 (esquerda), foi elaborado o modelo do circuito equivalente (lado direito da figura), após as devidas associações em série dos resistores (coeficientes de troca de calor).

No modelo do circuito equivalente foram inseridos dois nós (T_1 e T_2) para auxiliar na implementação do modelo matemático. Cada nó representa a interface entre o MMF e as aletas do trocador de calor, que são explicados com mais detalhes no ítem 6.2.

Três equações compõem o modelo do circuito equivalente, sendo cada uma para uma temperatura de interesse no sistema. As temperaturas de interesse são:

- temperatura do painel FV (T_{pv});
- temperatura do MMF (T_{pcm});
- temperatura da água no coletor solar (T_w).

Na construção do modelo foram assumidas as seguintes condições:

- as propriedades dos materiais de cada camada são homogêneas e isotrópicas;
- a irradiância solar é homogênea sobre toda a superfície do painel FV;
- não havia poeira ou qualquer outra substância depositada sobre a superfície do painel;
- o fluxo da água no coletor solar e nos tubos é newtoniano.

6.1 Temperatura do painel FV (T_{pv})

O balanço energético apresentado na equação (22) foi desenvolvido a partir do circuito da

Figura 105 para o nó T_{pv} . Na equação, a temperatura do painel FV é resultado da diferença entre a energia de entrada (radiação incidente no painel) e a troca de calor por convecção com o ambiente e o trocador de calor, e troca de calor por radiação.

$$m_{pv}c_{pv}\frac{dT_{pv}}{dt} = \{\alpha_{pv}\tau_g I_{(t)} - U_1(T_{pv} - T_a) - U_2(T_{pv} - T_{sky}) - U_3(T_{pv} - T_{Al}) - U_5(T_{pv} - T_2) - \eta_{pv}I_{(t)}\}\beta A_b \quad (22)$$

Sendo a temperatura do céu (T_{sky}) definida como:

$$T_{sky} = 0.0533T_a^{1.5} \quad (23)$$

6.2 Temperatura no MMF (T_1 e T_2)

No modelo foi adotada uma solução para o fluxo de calor entre o painel FV e o MMF, considerando que o fluxo ocorre de duas formas distintas (Figura 106):

- por meio das aletas (U_3);
- ou direto entre a base do trocador de calor e o MMF (U_5).

Considerou-se, também, que o fluxo de calor ocorre apenas no sentido vertical.

Conforme observado no resultado experimental, o MMF, por não ser uma substância pura, não apresentou um ponto bem definido no qual a sua temperatura fica estável durante a fusão do material ($T_{1/2} = T_{fusão}$). Por conta disso, na equação para o cálculo da temperatura do MMF foram adotadas apenas duas condições, com diferentes condições termofísicas em cada um dos casos:

- $T_{1/2} < T_{fusão}$;
- $T_{1/2} > T_{fusão}$.

Onde as equações (28) e (29) representam T_1 e T_2 :

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = [U_3(T_{pv} - T_1) - U_4(T_{pv} - T_2)]A_b \quad (24)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = [U_5(T_{pv} - T_2) - U_6(T_2 - T_w)]A_b \quad (25)$$

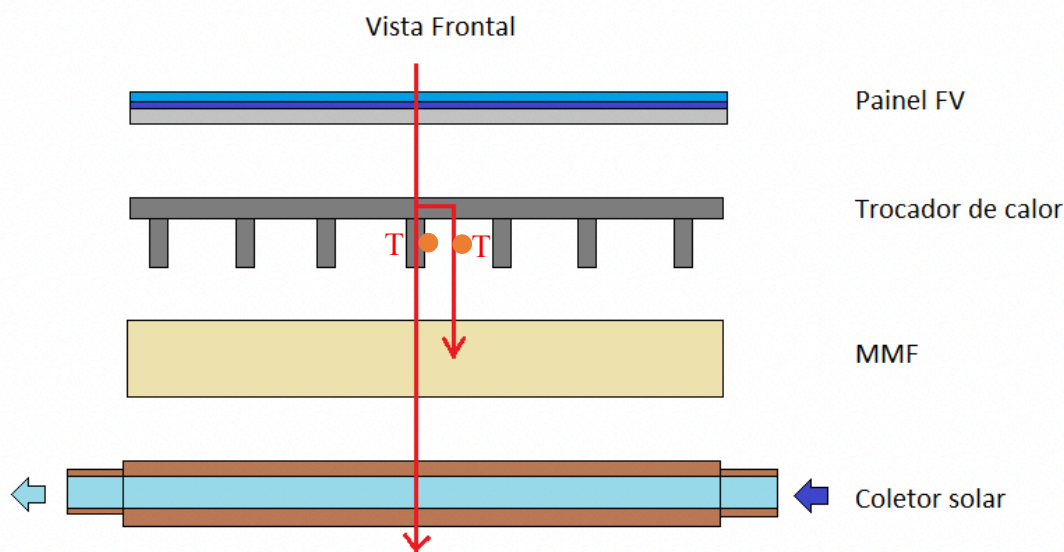


Figura 106 – Fluxo de calor entre o trocador de calor e o MMF: contato direto com a base de alumínio ou por meio das aletas.

6.3 Temperatura da água no coletor solar (T_w)

O aumento na temperatura da água leva em consideração o calor absorvido do MMF, por meio dos coeficientes de troca de calor U_4 e U_6 e as perdas por convecção para o ambiente, além da fluxo da água pelo coletor solar (\dot{m}_w)

$$\dot{m}_w c_w \frac{dT_w}{dx} dx = [U_4(T_1 - T_w) + U_6(T_2 - T_w) - U_7(T_w - T_a)] b dx \quad (26)$$

6.4 Simulação do sistema FVT-MMF

Para a simulação computacional do sistema FVT-MMF se fez necessária a quantificação exata dos coeficientes de troca de calor e suas propriedades físicas e químicas. A obtenção de alguns desses parâmetros não foi uma atividade trivial, especialmente para a definição da entalpia da base glicerizada. A indústria fornecedora da base glicerizada optou por não compartilhar algumas informações específicas do produto e outras informações ela não as possuía.

Uma amostra da base glicerizada foi enviada ao prof. Helcio Rangel Orlande, do Programa de Engenharia de Nanotecnologia do COPPE-UFRJ, para que fosse realizada uma análise da substância no calorímetro diferencial de varredura (DSC).

A análise do DSC (Figura 107) foi realizada para uma faixa de temperatura desde -50 °C até valores superiores a 50 °C, mas, no gráfico, não ficou evidente o

ponto de mudança de fase da substância, inviabilizando, desta forma, o cálculo da sua entalpia. Com este gráfico se chegou à conclusão de que a ausência de um ponto bem definido do ponto de mudança de fase é devido ao fato da base glicerinada ser uma mistura, diferente da maioria dos trabalhos científicos nesta linha, nos quais foram usadas substâncias puras, fabricadas exclusivamente com o propósito específico de ser um MMF.

Diante da dificuldade de se obter os valores exatos das propriedades térmicas, físicas e químicas dos elementos que integram o sistema FVT-MMF, a solução para obtenção dos coeficientes U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , U_5 e U_6 foi pelo método de identificação de parâmetros, função minimize do Python, que consiste em um método determinístico para otimização não linear baseado em um gradiente para se chegar à função mínima (erro quadrático mínimo) (Nocedal & Wright, 1999).

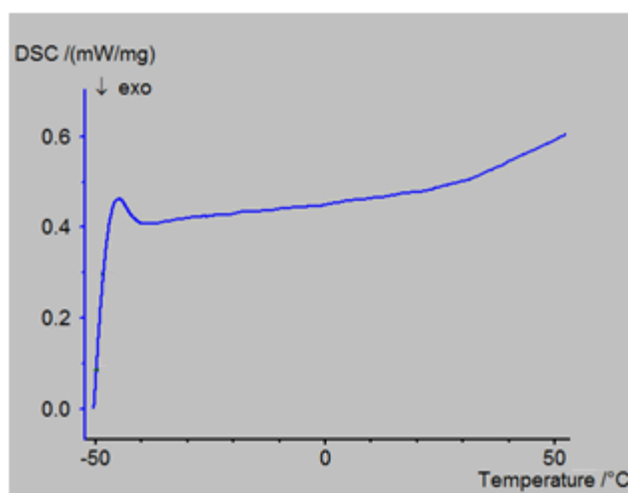


Figura 107 – Análise em calorímetro diferencial de varredura da base glicerinada

A identificação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados é uma técnica matemática que visa a encontrar os melhores valores para uma equação baseados em um conjunto de dados. Especificamente para o modelo matemático do sistema FVT-MMF, os parâmetros estimados foram os coeficientes de troca de calor U_n . Foi implementada uma rotina para a identificação desses parâmetros no qual, na sua primeira iteração, estimaram-se valores iniciais para os coeficientes U_n . A partir dos valores estimados, foram resolvidas as equações (22) à (27) cujos resultados foram comparados com os obtidos experimentalmente. A cada iteração da rotina, sendo significativa a soma dos quadrados das diferenças entre os resultados

experimentais e simulados, chamado de erro, os coeficientes eram corrigidos e o processo se repetiu até chegar a um erro mínimo aceitável.

Na função do Python usada para a identificação dos parâmetros desejados, SLQP (Sequential Linear Quadratic Programming), os coeficientes da função (U_n) são resolvidos sequencialmente e aos pares, com o objetivo de otimizar o processo a cada iteração da rotina. (Hertzberg, 1995).

Ou seja, os resultados da rotina foram valores otimizados para os coeficientes de troca de calor que melhor representaram os resultados obtidos experimentalmente. A Tabela 10 apresenta os valores obtidos pelo método de identificação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados. O coeficiente U_2 foi desprezado, pois a perda de calor do sistema FVT-MMF por radiação para o céu é relativamente baixa na câmara climatizada.

Tabela 10 – Valores dos coeficientes U_n obtidos

Coeficiente	Coef. de transferência de calor
U_1	13,655
U_2	0 (desprezível)
U_3	5,017
U_4	0,248
U_5	0,810
U_6	0,421
U_7	1,040

6.5 Resultados da simulação

A partir do modelo matemático e da obtenção dos valores otimizados para os coeficientes de troca de calor (U_n), foram simuladas diferentes condições de operação do sistema FVT-MMF e do painel FV convencional.

Inicialmente foram atribuídas às simulações as condições de irradiância de 1.000 W/m^2 e os três casos para a vazão da água no coletor solar (da mesma forma que ocorreu experimentalmente):

- Caso A: irradiância = 1.000 W/m^2 e vazão = $0,026 \text{ l/s}$;
- Caso B: irradiância = 1.000 W/m^2 e vazão = $0,014 \text{ l/s}$;
- Caso c: irradiância = 1.000 W/m^2 e sem vazão.

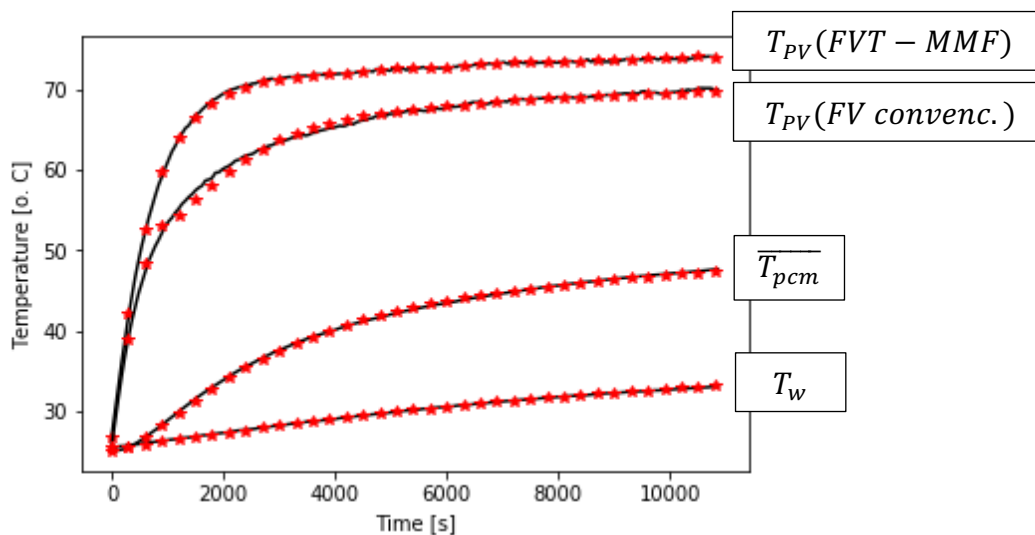


Figura 108 – Simulação do sistema FVT-MMF para irradiância de 1000 W/m^2 e vazão de $0,026 \text{ l/s}$

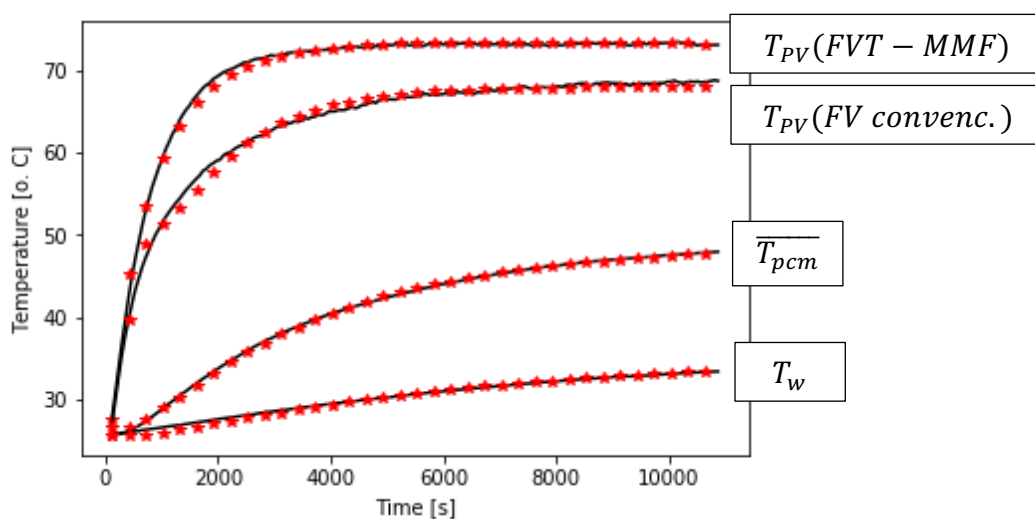


Figura 109 - Simulação do sistema FVT-MMF para irradiância de 1000 W/m^2 e vazão de $0,014 \text{ l/s}$

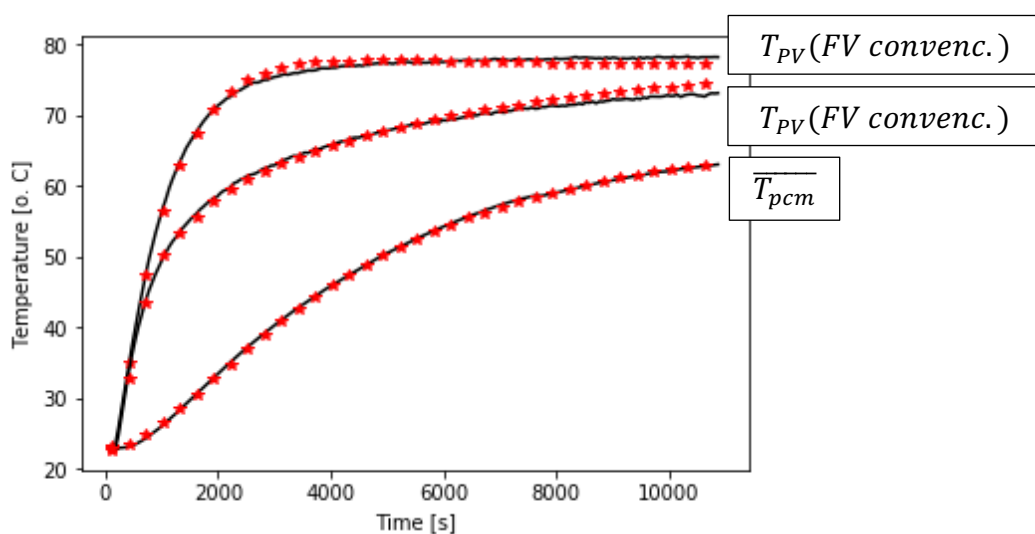


Figura 110 - Simulação do sistema FVT-MMF para irradiância de 1000 W/m^2 e sem vazão da água

Os resultados das simulações foram comparados com os resultados experimentais dos três casos supracitados, e apresentados nas Figuras 108, 109 e 110.

Com o objetivo de avaliar as simulações, assim como os coeficientes obtidos por identificação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados, os resultados experimentais foram comparados com os simulados em cada caso, levando em consideração as temperaturas do painel FV convencional, sistema FVT-MMF e MMF. Para comparar os resultados experimentais simulados e experimentais foi calculada a média da dispersão (diferença) entre as temperaturas experimentais e simuladas para cada ponto medido, cujos resultados são:

- Caso A: $\delta = 0,079$;
- Caso B: $\delta = 0,308$;
- Caso B: $\delta = 0,339$.

As Figuras 111, 112 e 113 apresentam os resultados das simulações do sistema FVT-MMF e o painel FV convencional para as vazões definidas no caso A, B e C, mas com os valores de irradiância variando de 500 a 900 W/m^2 .

Coforme será melhor discutido nas conclusões, pode-se observar que o modelo matemático proposto, com o aporte da identificação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados para a obtenção dos coeficientes de troca de calor do sistema FVT-MMF, apresentou uma significativa correlação com os resultados obtidos experimentalmente. Sua importância é fundamental para a simulação novas situações envolvendo o sistema sob condições variadas de irradiância e vazão da água.

Para finalizar, com base na diminuição da temperatura de operação do sistema FVT-MMF em relação ao painel FV convencional, simulou-se o ganho de energia elétrica e energia global (energia elétrica e térmica) para a condição de irradiância de 1000 Wm^{-2} e vazão de 0,024 l/s. A Figura 114 apresenta a eficiência do coletor solar do sistema FVT, chegando a 70% da energia recebida por irradiância. O ganho na energia elétrica gerada pelo sistema FVT-MMF no decorrer das 3h de irradiância foi de, aproximadamente, 3,19% (Figura 115) e o ganho na energia global (foi de, aproximadamente, 593,7% (Figura 116).

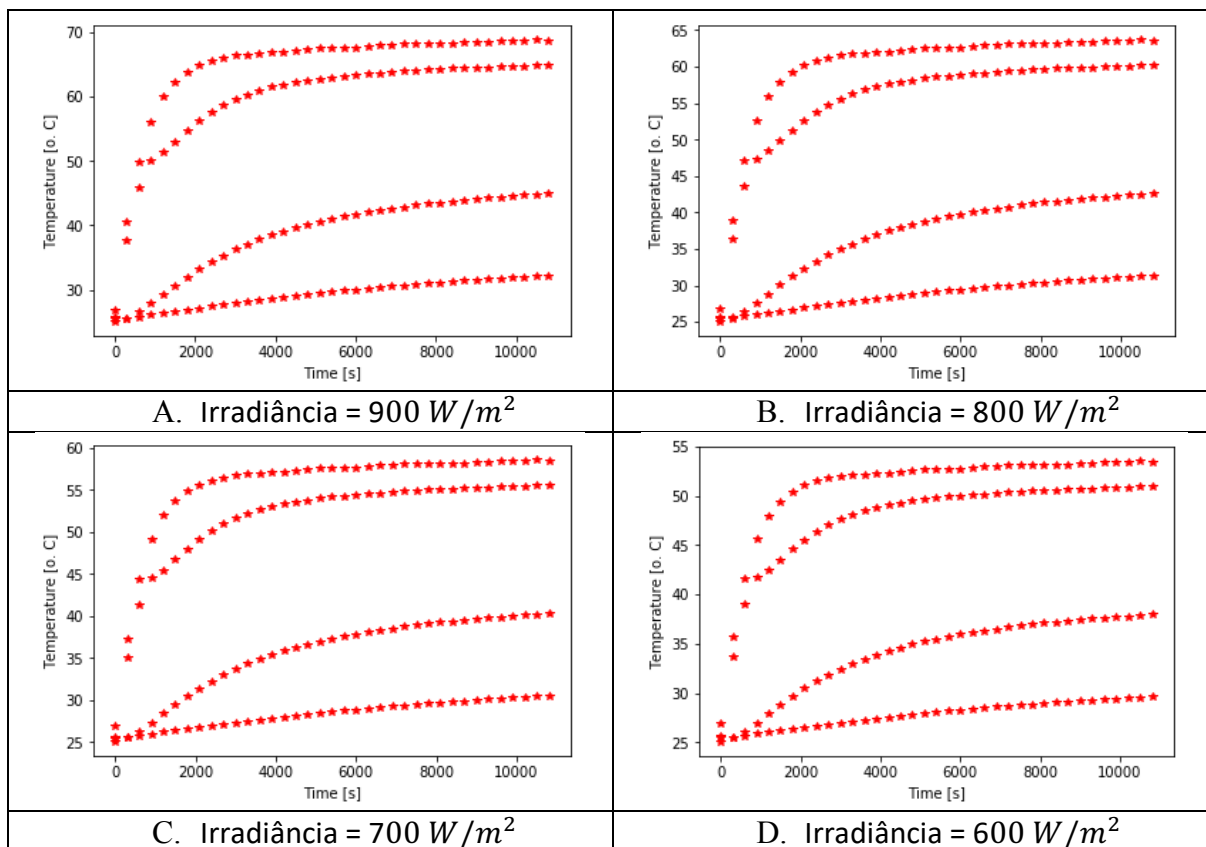


Figura 111 – Simulação do sistema FVT-MMF para vazão 0,026 l/s

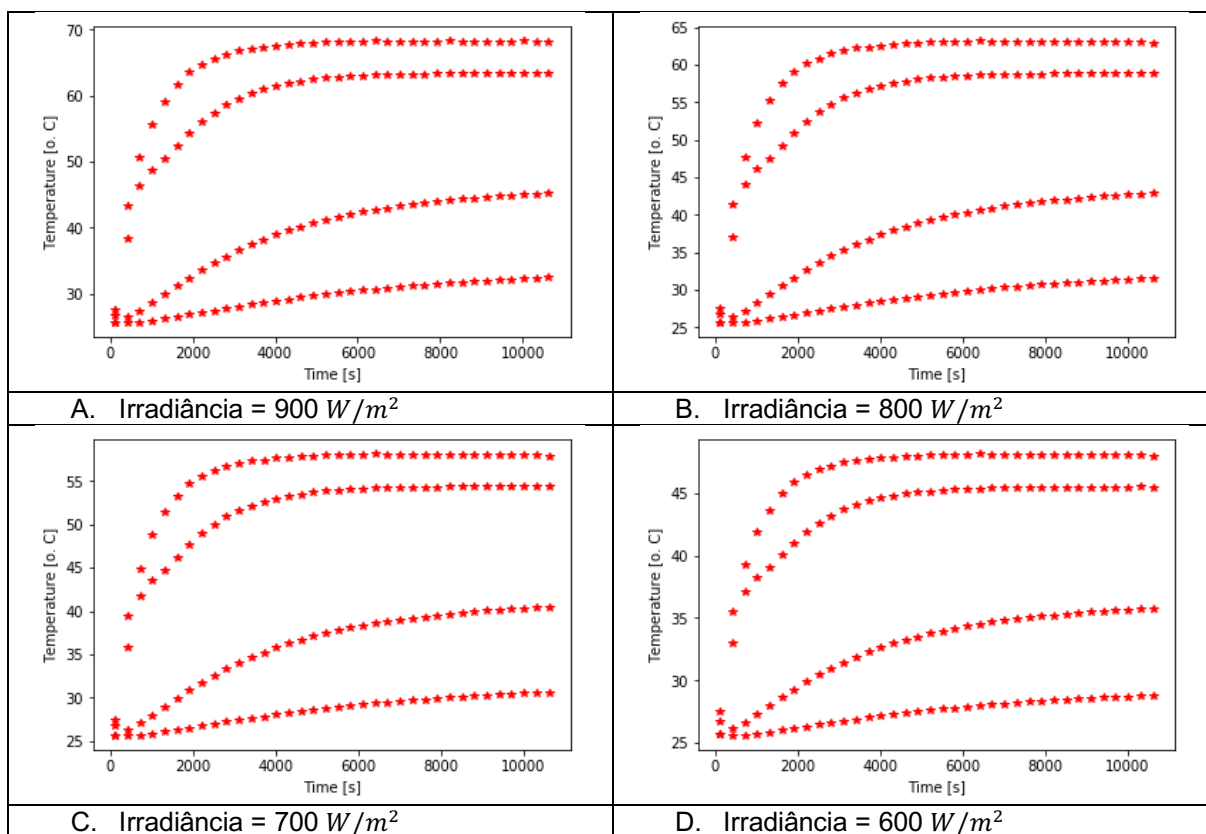


Figura 112 – Simulação do sistema FVT-MMF para vazão 0,014 l/s

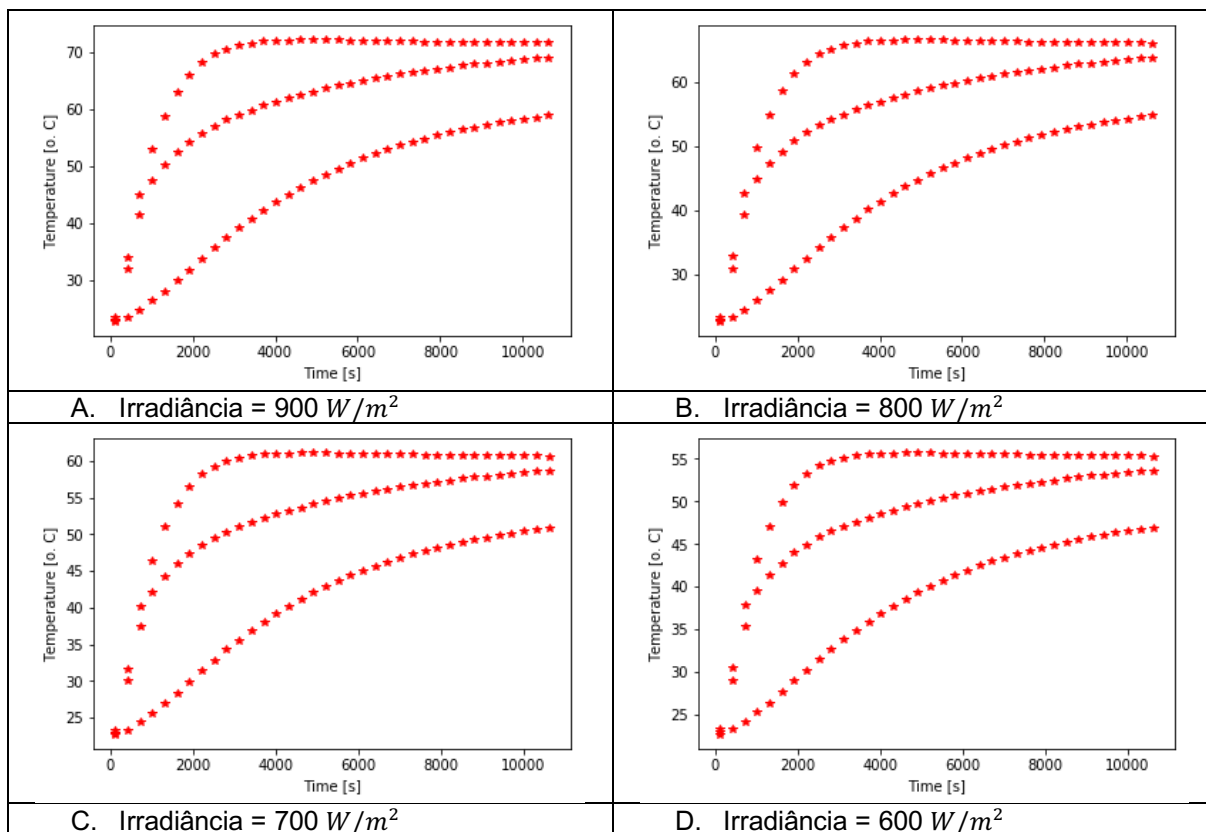


Figura 113 – Simulação do sistema FVT-MMF e sem vazão

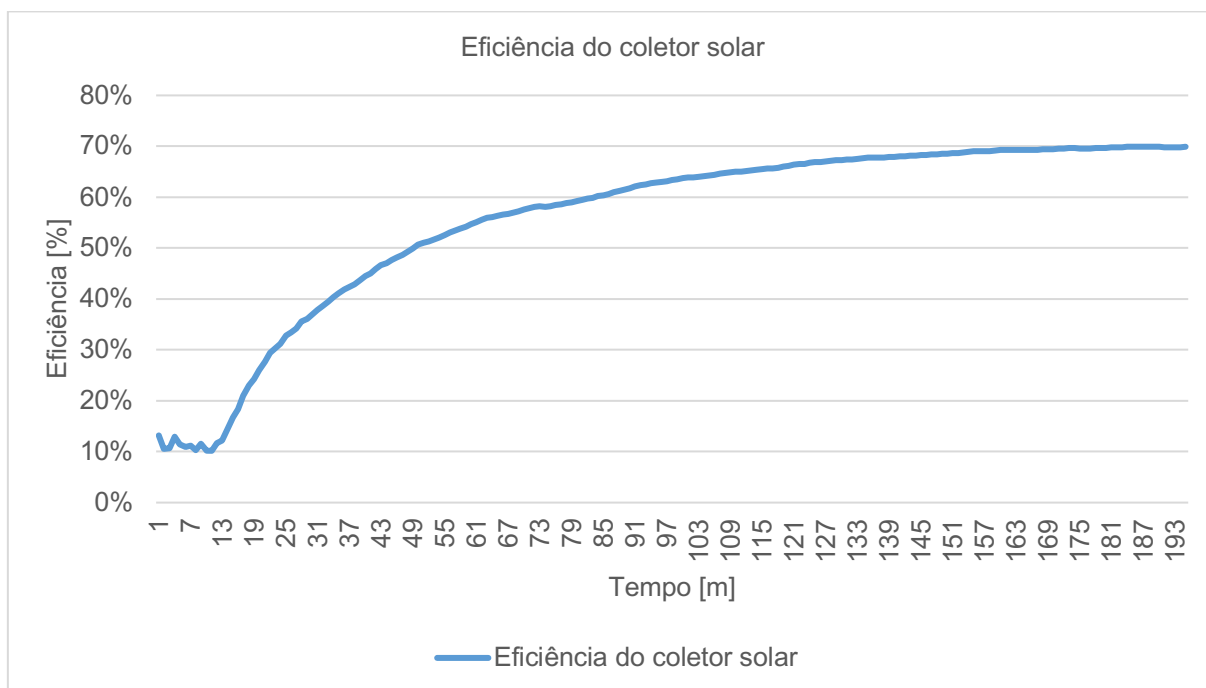


Figura 114 – Eficiência do coletor solar do sistema FVT-MMF

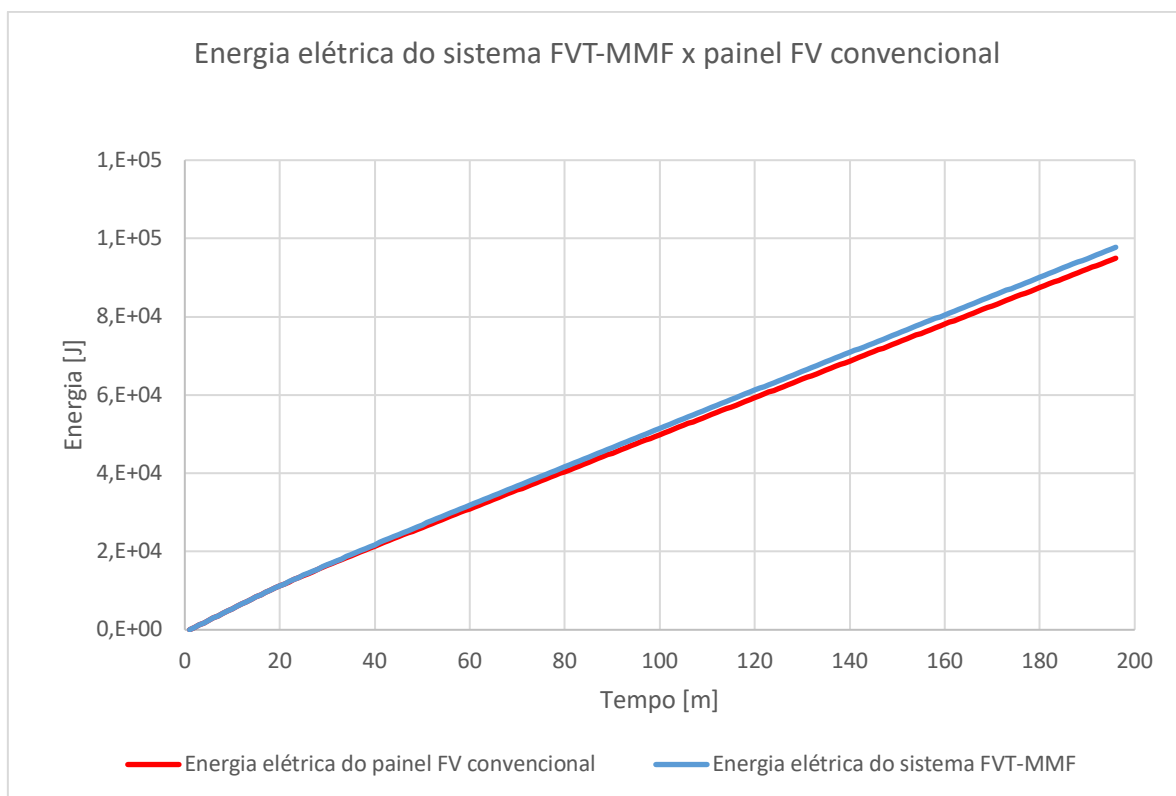


Figura 115 – Comparação entre a energia elétrica gerada pelo sistema FVT-MMF e o painel FV convencional

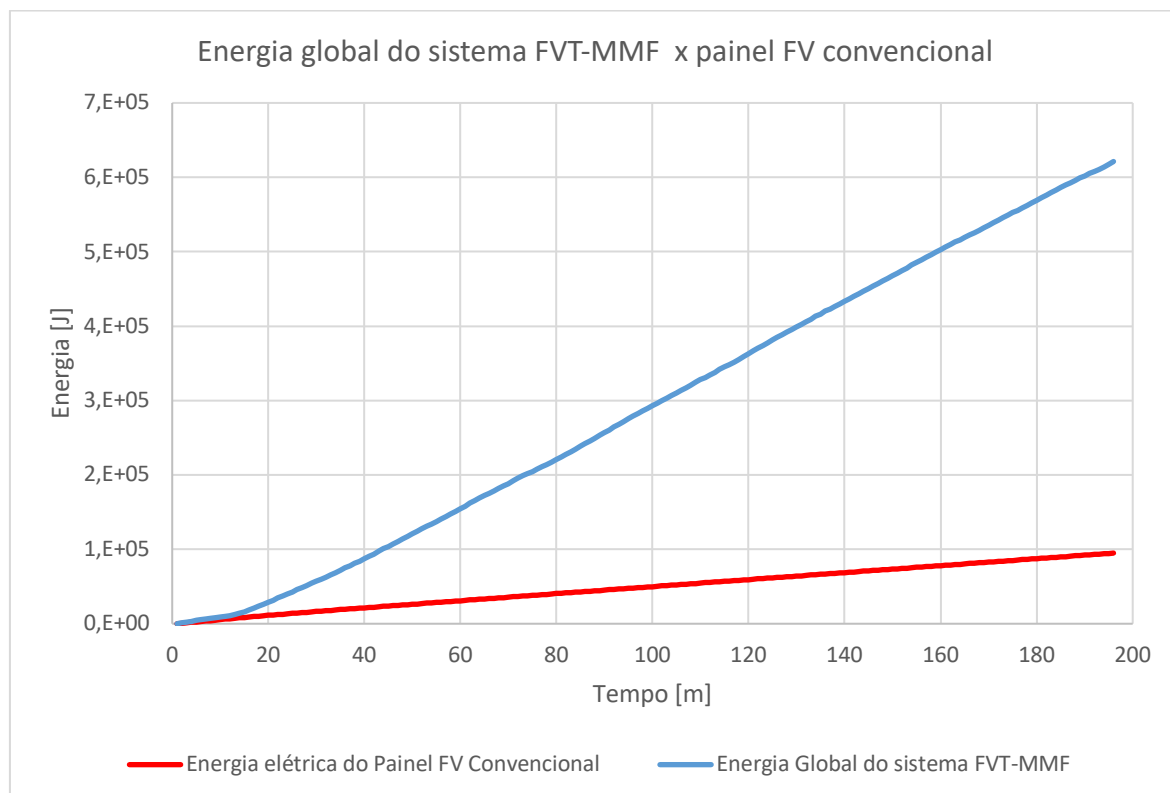


Figura 116 – Comparação entre a energia global gerada pelo sistema FVT-MMF e o painel FV convencional

7 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado integrou a tecnologia dos coletores térmicos, materiais de mudança de fase e painéis FV em um mesmo sistema, chamado nesta tese de sistema FVT-MMF. Este sistema foi proposto após o entendimento de que as tecnologias que integram o sistema FVT-MMF podem ser complementares ao longo do ciclo circadiano. Nele, o efeito térmico, responsável pela diminuição da eficiência elétrica e degradação dos painéis FV, no sistema FVT-MMF é reaproveitado melhorando a sua eficiência elétrica e global, por meio do aquecimento da água para aplicações domésticas e redução da temperatura de operação das células.

Optou-se pelo uso da base glicerizada como MMF por ser uma substância biodegradável, não corrosiva, atóxica e, relativamente, baixo custo. O principal ponto negativo no uso desta substância é pela sua capacidade térmica não ser tão alta quando comparada com outros materiais, como o ácido cáprico, palmítico e produtos industrializados para esta finalidade. O uso deste material foi mais uma contribuição para pesquisas futuras nesta linha de pesquisa.

Para avaliar o sistema FVT-MMF sob as condições climáticas desejadas, foi projetado e desenvolvido um simulador solar dentro da câmara climatizada do LST da PUCPR. O simulador solar é uma solução de baixo custo para avaliar o sistema FVT-MMF e atendeu aos requisitos de controle da irradiância com boa distribuição da radiação sobre toda a superfície, ventilação e temperatura ambiente, previamente definidos.

No simulador solar foram utilizadas lâmpadas halógenas como fonte de radiação, por apresentar um espectro próximo da radiação solar. Entretanto, as lâmpadas halógenas possuem, relativamente, uma maior energia na banda do infravermelho, e isto fez com que o rendimento elétrico do painel FV fosse menor do que o especificado pelo fabricante, sendo a sua temperatura de operação foi superior. Mesmo assim, isto não foi considerado um problema que inviabilizou a avaliação do sistema FVT-MMF, pois a maior concentração de parte da energia irradiada na banda infra-vermelha favoreceu a avaliação do sistema em sua proposta de análise térmica.

Além disto, após o uso de um *software* para simulações de irradiância em ambientes, foi possível redistribuir as posições das lâmpadas de tal forma que a variação da irradiância sobre toda a superfície do simulador solar não ultrapassou

5,6%, sendo considerado um ótimo valor ao comparar este resultado com propostas semelhantes de simuladores solares apresentados em outros artigos científicos.

No sistema FVT-MMF a circulação da água deve ocorrer, prioritariamente, pelo modo passivo, termossifão, para evitar o uso da energia elétrica e aumentar a sua eficiência global. No protótipo avaliado em laboratório foi utilizada uma bomba de água para permitir controlar a sua vazão pelo coletor solar e, conseqüentemente, avaliar a correlação da vazão da água com a tensão de saída do painel FV.

A avaliação da proposta foi dividida em 3 casos, os dois primeiros casos foram avaliados com uma variação na vazão da água (caso A e B) e no último caso sem o fluxo da água (caso C). Nos três casos avaliados, a tensão do sistema FVT-MMF foi superior à do painel FV convencional, mas algumas observações se fazem necessárias, conformes descritas a seguir.

Quanto ao comportamento do sistema FVT-MMF nos casos A e B, com fluxo da água de 0,026 l/s (A) e 0,014 l/s (B), podem ser considerados três momentos:

- No primeiro momento a temperatura do sistema FVT-MMF ficou bem menor do que o painel convencional. Isto ocorreu, principalmente, devido ao efeito do MMF, que absorveu uma significativa parte da energia térmica do painel;
- Próximo de dez mil segundos de simulação, após a total fusão do MMF, a diferença de temperatura entre o sistema FVT-MMF e o painel FV convencional chegou a um equilíbrio. Mesmo assim, a temperatura do sistema FVT-MMF continuou sendo menor, mas apenas devido à ação do coletor solar, através do fluxo da água;
- Por último, após desligar o sistema de lâmpadas, a temperatura do sistema FVT-MMF superou a temperatura do painel convencional, em decorrência da energia térmica armazenada no MMF.

O caso C apresentou um comportamento um pouco diferente, devido à ausência do fluxo da água no sistema. Observou-se que, neste caso, a diferença de temperatura entre o sistema FVT-MMF e o painel FV convencional continuou diminuindo ao longo do tempo, mesmo após dez mil segundos de simulação.

Desta forma, concluiu-se que todos elementos que integraram o sistema FVT-MMF possuem potencial para o gerenciamento térmico dos painéis FV e, conseqüentemente, aumentando a sua eficiência elétrica e a eficiência global por meio do aquecimento da água para o uso doméstico.

Como o sistema FVT-MMF integra duas soluções tecnológicas, cada uma com suas propriedades termofísicas específicas, definir os coeficientes de troca de calor entre cada camada que o integra pode não ser uma tarefa simples e acertiva. Por isto, o uso da identificação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados demonstrou ser uma solução adequada e inovadora para esta linha de pesquisa. Uma vez definidos os coeficientes de troca de calor do modelo matemático, a simulação de outras condições de irradiância e vazão da água se tornou muito mais rápida do que solução experimental. Além disto, é possível, com algumas melhorias, inserir dados climáticos de irradiância de uma determinada região para analisar a eficiência do sistema FVT-MMF comparada à do painel FV convencional.

Conforme pode-se observar, em todas os casos simulados a diferença inicial entre a temperatura do sistema FVT-MMF e o painel FV convencional é significativa, devido, principalmente, à capacidade térmica do MMF retardando o aumento da temperatura do painel. Entre 800 a 1000 segundos, dependendo da irradiância adotada na simulação, a diferença de temperatura entre os dois painéis entra em equilíbrio, mas sempre com a temperatura do painel no sistema FVT-MMF menor, devido à ação do coletor solar (fluxo da água).

É importante ressaltar que nesta tese não se buscou apenas a melhoria da eficiência elétrica dos painéis, mas também a eficiência global, uma vez que no Brasil um dos usos que mais consomem a energia elétrica nas residências é o aquecimento da água por meio do chuveiro elétrico. Desta forma, além das simulações apontarem uma melhoria na eficiência elétrica do sistema de 3,19%, sua eficiência global foi de 593,7% durante 3h de irradiância de 1000 Wm^{-2} .

A avaliação do custo do sistema FVT-MMF não fez parte dos objetivos do projeto, mas pode-se citar, com o propósito de reflexão, o estudo de (Yin, Yang, Kelly, & Garant, 2013), que realizaram uma análise comparativa dos custos de um sistema FVT-MMF e FV, e se chegou à conclusão que, nos E.U.A., o custo de um sistema FVT-MMF pode ser apenas 20% mais caro do que o custo de um sistema FV convencional.

As maiores contribuições deste projeto em relação aos trabalhos publicados até o momento são:

- tipo do MMF usado: grande parte dos projetos nesta linha de pesquisa usou um MMF a base de parafina; porém, nesta proposta foi usada uma base

glicerinada, por, além de ter um potencial para o gerenciamento térmico, é barata, abundante, biodegradável, não tóxica e não corrosiva;

- método para avaliação experimental: embora existam alguns trabalhos onde foram realizadas avaliações de sistemas FVT ou FVT-MMF em ambientes indoor, para melhorar o controle e confiabilidade das variáveis externas, ainda não se tem conhecimento de um ambiente indoor para esta finalidade com controle de irradiação com significativa precisão e uniformidade, além do controle da temperatura ambiente e ventilação;
- método para avaliação numérica: os resultados obtidos experimentalmente foram avaliados por simulação computacional usando o método de identificação de parâmetros para se obter os coeficientes de troca de calor entre as diversas camadas do sistema.

7.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- estudo de novos MMFs com baixo custo e reduzidos impactos ambientais;
- estudo do ciclo de vida da base glicerinada como material de mudança de fase, como o tempo de deterioração ou variações em suas propriedades termofísicas;
- aperfeiçoamento do simulador solar, visando, principalmente, a melhoria da distribuição da irradiância sobre a superfície, ventilação e redução dos custos para a sua construção;
- construção de um protótipo do sistema FVT-MMF invertendo o posicionamento do coletor solar e o MMF, para verificar o impacto sobre a eficiência elétrica e térmica;
- avaliação do sistema FVT-MMF em ambientes *outdoor* (condições reais de irradiância, ventilação, temperatura ambiente, nuvens, poeiras, chuva, etc);
- estimativa do custo do sistema FVT-MMF e seu retorno de investimento;
- análise multivariada do método numérico, observando o peso de cada variável sobre a eficiência elétrica do painel FV.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altas, H., & Sharaf, A. M. (2007). A photovoltaic array simulation modl for matlab-simulink GUI environment. *International Conference on Clean Electrical Power* (pp. 341-345). Capri: IEEE.
- Assoa, Y. B., & Ménézo, C. (2014). Dynamic study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy*, *107*, 637-652.
- Atkin, P., & Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, *114*, 217-228.
- Bhandari, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., & Apul, D. S. (2015). Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*.
- Bloem, J. J. (2008). Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor environment. *Building and Environment*, pp. 205-216.
- Browne, M. C., Lawlor, K., Kelly, A., Norton, B., & McCormack, S. J. (2015). Indoor characterisation of a phovoltaic/thermal phase change material system. *Energy Procedia*, *70*, 163-171.
- Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, 762-782.
- Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2016). Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM. *Solar Energy*(133), 533-548.
- Chen, Z., & Chen, G. (2010). Experimental Study on the Thermal Storage Performance and Preparation of Glycerin Mixtures Used in the Phase Change Wall. *WASE International Conference on Information Engineering*, (pp. 52-54).
- Chow, T. T., He, W., & Ji, J. (2006). Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy*, pp. 298-306.
- Chow, T. T., He, W., Ji, J., & Chan, A. L. (2007). Performance evaluation of photovoltaic-thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, *81*, pp. 123-130.
- Dolara, A., Lazaroiu, G. C., Leva, S., & Manzolini, G. (2013). Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules. *Energy*, *55*, pp. 466-475.
- Du, D., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2013). Thermalmanagement systems for Photovoltaics (PV) installations: A critical review. *Solar Energy*, *97*, 238-254.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Willey & Sons.
- Dupeyrat, P., Ménézo, C., & Fortuin, S. (2014). Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. *Energy and Buildings*.
- Dupeyrat, P., Ménézo, C., Rommel, M., & Henning, H.-M. (May de 2011). Efficient single glazed flat plata photovoltaic-thermal hybrid collector for domestic hot water system. *Solar Energy*, pp. 1457-1468.
- (2015). *Energia Solar no Brasil e Mundo*. Ministério de Minas e Energia - Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia.
- EPIA. (s.d.). *European Photovoltaic Industry Association*. Acesso em 03 de Julho de 2017, disponível em Global Market Outlook: <http://www.epia.org/news/publications/>
- FC Solar Green Energy. (s.d.). Acesso em 30 de Setembro de 2015, disponível em FC Solar Green Energy: <http://www.fcsolar.eco.br/aprenda-aqui/>
- Ghadiri, M., Sardarabadi, M., Pasandideh-fard, M., & Hoghadam, A. J. (2015). Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. *103*, pp. 468-476.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2016). Solar cell efficiency tables (Version 48). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *24*, 3-11.

- Handricks, J. H., & Sark, W. G. (2013). Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21, 620-630.
- Hasan, A., Alnoman, H., & Rashid, Y. (2016). Impact of integrated photovoltaic-phase change material system on building energy efficiency in hot climate. *Energy and Buildings*(130), 495-505.
- Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., & Norton, B. (2014). Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics. *Energies*, pp. 1318-1331.
- Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., Saswar, J., & Norton, B. (2015). Increase photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: materials comparison in different climates. *Solar Energy*, 115, 264-276.
- Hertzberg, S. S. (1995). The sequential linear quadratic programming algorithm for solving dynamic optimization problems - A review. *Computer chemical engineering*, 19.
- Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 2715-2773.
- Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, pp. 1121-1130.
- Indartono, Y. S., Prakoso, S. D., Suwono, A., Zaini, I. N., & Fernaldi, B. (2015). Simulation and Experimental Study on Effect of Phase Change Material Thickness to Reduce Temperature of Photovoltaic Panel. *Material Science and Engineering*, 88.
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri^a, H., & Syafaruddin. (August de 2011). Modeling and simulation of a photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, pp. 1613-1626.
- Islam, M. M., Pandey, A. K., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2016). Recent progresses and achievements in photovoltaic-phase change material technology: A review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems. *Energy Conversion and Management*, 126, 177-204.
- Keysight. (s.d.). *Keysight 34907a*. Acesso em 19 de July de 2017, disponível em Solução de aquisição de dados/comutação: <http://www.keysight.com/en/>
- Klugmann-Radziemska, E., & Wcisto-Kucharek, P. (2017). Photovoltaic module temperature stabilization with the use of phase change materials. *Solar Energy*, 150, 538-545.
- Knapp, K. E., & Jester, T. L. (2000). An Empirical Perspective on the Energy Payback Time for Photovoltaic Module. *Solar 2000 Conference*, (pp. 1-6). Madison.
- Krauter, S. C. (2004). Development of an integrated solar home system. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82, pp. 119-130.
- Lemos, L. D., Brittes, R., França, F. H. R. (2016). Application of inverse analysis to determine the geometric configuration of filament heaters for uniform heating. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 1-12.
- Lopes, R. J. (2013). *Efeito dos Sombreamentos nos Painéis Fotovoltaicos*. Lisboa: Dissertação de Mestrado. Instituto de Engenharia de Lisboa.
- Ma, T., Yang, H., Zhang, Y., Lu, L., & Wang, X. (2015). Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1273-1284.
- Malvi, C. S., Dixon-Hardy, D. W., & Crook, R. (29 de March de 2011). Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporatin phase change material. *Solar Energy*, 85, pp. 1440-1446.
- Mettawee, E. S., & Ead, A. I. (2013). Energy Saving in Building with Latent Heat Storage. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, 5, 21-30.
- Ministério da Educação. (2015). *Desafio da Sustentabilidade*.
- Minnaert, B., & Velaert, P. (2014). A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications. *Energies*, 7, 1500-1516.
- National Renewable Energy Laboratory. (s.d.). Acesso em 01 de July de 2-14, disponível em www.nrel.gov

- Nocedal, J., & Wright, S. J. (1999). *Numerical Optimization*. Springer.
- Painéis Solares Fotovoltaicos*. (2012). Acesso em 07 de Março de 2016, disponível em www.paineissolaresfotovoltaicos.com: <http://www.paineissolaresfotovoltaicos.com/o-que-e-a-energia-solar/>
- Park, J., Kim, T., & Leigh, S.-B. (2014). Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions. *Solar Energy*, 105, 561-574.
- Peng, J., Lu, L., Yang, H., & Ma, T. (2015). Validation of the Sandia model with indoor and outdoor measurements for semi-transparent amorphous silicon PV modules. *Renewable Energy*, 80, 316-323.
- Peng, J., Lu, L., Yang, H., & Ma, T. (2015). Validation of the Sandia Model with indoor and outdoor measurements for semi-transparent amorphous silicon PV modules. 80, 316-323.
- Preet, S., Bhushan, B., & Mahajan, T. (2017). Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Solar Energy*, 155, 1104-1120.
- Preet, S., Bhushan, B., & Mahajan, T. (2017). Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Solar Energy*, 155, pp. 1104-1120.
- Pó, J. M. (2011). *Assessment of the IEC 60891 norm conversion methods under outdoor test conditions*. Lisboa: Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia.
- Reis, L. B. (2011). *Geração de energia elétrica* (2 ed.). Barueri: Manole.
- Rodiek, J. A., & Best, S. R. (2010). Comparison of photovoltaic modeling analysis and actual performance data of Lee County Justice Center solar power installation project. *8th Annual International Energy Conversion Engineering Conference*, (pp. 1-5). Nashville.
- Romero, M. d., & Reis, L. B. (2012). *Eficiência energética em edifícios* (1 ed.). Barueri: Manole.
- Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., Maghrebi, M.-J., & Ghazikhani, M. (2017). Experimental study of using both ZnO/ water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems. 161, 62-69.
- Sari, A., & Karaipekli, A. (2008). Preparation and thermal properties of capric acid/palmitic acid eutectic mixture as a phase change energy storage material. *Materials Letters*, pp. 903-906.
- Sari, A., Biçer, A., Karaipekli, A., Alkan, C., & Karadag, A. (2010). Synthesis, thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters with glycerol as novel solid-liquid phase change materials. *Solar energy materials & solar cells*, pp. 1711-1715.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34, pp. 23-29.
- Solargis*. (s.d.). Acesso em 03 de Julho de 2017, disponível em <http://www.solargis.com>
- Stropnik, R., & Stritih, U. (Junho de 2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, 671-679.
- Tiepolo, G. M. (2015). *Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do paraná* (Vol. Tese de doutorado). Curitiba: Programa de PósGraduação em Engenharia de Produção e Sistemas. PUCPR.
- Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M., & Yianoulis, P. (2002). Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*, pp. 217-234.
- Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2012). *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações* (1 ed.). São Paulo: Érica.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24, pp. 1198-1207.
- Vokas, G., & Christandonis, N. S. (2006). Hybrid photovoltaic-thermal system for domestic heating and cooling - a theoretical approach. *Solar Energy*, 80, pp. 607-615.

- Weiss, L., Amara, M., & Menezo, C. (1-6 de July de 2012). Influence of thermal behaviour of a photovoltaic module on its electrical performance. *ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*. Bath.
- (2004). *What is the energy payback for PV?* The National Renewable Energy Laboratory , Washington D. C.
- Wikipedia. (2016). *Solar power by country*. Acesso em 03 de Julho de 2017, disponível em Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country
- Yin, H. M., Yang, D. J., Kelly, G., & Garant, J. (2013). Design and performance of a novel building integrated PV/thermal system for energy efficiency of buildings. *Solar Energy*, 87, 184-195.
- Zakharchenko, R. (2004). Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82, 253-261.
- Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-thermal collectors and systems: a review. *Renewable & Sustainable Energy Review*, pp. 891-959.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Incertezas nas medições

As medições de tensão, corrente e temperatura foram realizadas usando o equipamento para aquisição de dados Agilent 34970a. De acordo com o fabricante (Keysight, s.d.), as incertezas nas leituras deste equipamento são impactadas por dois fatores principais: o tempo da última calibração do equipamento e a temperatura de operação. Todos os cálculos das incertezas estão disponíveis no manual do fabricante (Keysight, s.d.).

A última calibração do equipamento foi realizada há mais de 1 ano e a temperatura de operação foi em torno de 25 °C.

A.1. Incerteza na leitura da tensão

A Equação (27) representa a incerteza na leitura da tensão devido ao tempo da última calibração, que foi realizada há mais de um ano.

$$i_{calibração} = \frac{i_{leitura}}{100} \cdot V_{leitura} + \frac{i_{faixa}}{100} \cdot V_{faixa} \quad (27)$$

$$i_{calibração} = \frac{0,0035}{100} \cdot 6,23 + \frac{0,0005}{100} \cdot 10 \cong 0,00027 \quad (28)$$

Sendo:

Máxima tensão lida: $V_{leitura} = V_{oc} = 6,23 V$

Faixa de operação do equipamento: $V_{faixa} = 10 V$

$i_{leitura}$: incerteza de leitura do equipamento;

i_{faixa} : incerteza para uma determinada faixa de leitura.

Para calcular a incerteza relacionada à temperatura de operação do equipamento de aquisição de dados, foi usada a Equação (29). A temperatura do equipamento ficou em torno de 25 °C.

$$i_{temp-equip} = \frac{i_{leitura}}{100} \cdot V_{leitura} + \frac{i_{faixa}}{100} \cdot V_{faixa} \quad (29)$$

$$i_{temp-equip} = \frac{0,0005}{100} \cdot 6,23 + \frac{0,0001}{100} \cdot 10 \cong 0,00004 \quad (30)$$

Logo, a incerteza na leitura da tensão foi definida pela Equação (31).

$$i_{tensão} = \sqrt{(i_{calibração})^2 + (i_{temp-equip})^2} \quad (31)$$

$$i_{tensão} = \sqrt{(0,00027)^2 + (0,00004)^2} \quad (32)$$

$$i_{tensão} \cong 0,0003 V \quad (33)$$

A.2. Incerteza na leitura da corrente

Assim como foi calculada a incerteza na leitura da tensão, a incerteza na leitura da corrente foi definida por dois fatores principais: a incerteza decorrente do tempo da última calibração do equipamento (Equação (34)) e a temperatura de operação do equipamento (Equação (36)).

$$i_{calibração} = \frac{i_{leitura}}{100} \cdot I_{leitura} + \frac{i_{faixa}}{100} \cdot I_{faixa} \quad (34)$$

$$i_{calibração} = \frac{0,05}{100} \cdot 0,097 + \frac{0,005}{100} \cdot 0,1 \cong 0,000053 \quad (35)$$

Sendo:

Máxima corrente lida: $I_{leitura} = V_{oc} = 0,097 A$

Faixa de operação do equipamento: $I_{faixa} = 0,100 A$

$$i_{temp-equip} = \frac{i_{leitura}}{100} \cdot I_{leitura} + \frac{i_{faixa}}{100} \cdot I_{faixa} \quad (36)$$

$$i_{temp-equip} = \frac{0,002}{100} \cdot 0,097 + \frac{0,0005}{100} \cdot 0,1 \cong 0,000002 \quad (37)$$

A Equação (38) foi usada para calcular a incerteza total da corrente.

$$i_{corrente} = \sqrt{i_{calibração} + i_{temp-equip}} \quad (38)$$

$$i_{corrente} = \sqrt{0,000053 + 0,000002} \quad (39)$$

$$i_{corrente} \cong 0,00005 \text{ A} \quad (40)$$

A.3. Incerteza na leitura da temperatura

A incerteza na leitura da temperatura depende, principalmente, do tipo do termopar e da leitura do equipamento.

O termopar utilizado foi do tipo T, com incerteza de aproximadamente 1 °C. E a incerteza da leitura do equipamento, para a faixa entre -100 °C e 400 °C, também é de 1°C. Logo, a incerteza na leitura da temperatura foi calculada pela Equação (41).

$$i_{temperatura} = i_{termopar-T} + i_{temp-equip} \quad (41)$$

$$i_{temperatura} = 1 + 1 = 2 \text{ °C} \quad (42)$$

Sendo:

$i_{termopar-T}$: incerteza do termopar utilizado (tipo T), com incerteza de 1 °C.

$i_{temp-equip}$: incerteza na leitura da temperatura pelo equipamento na faixa entre -100 °C e 400 °C, também de 1°C.

Portanto, as incertezas dos ensaios experimentais realizados neste trabalho são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Incertezas dos ensaios experimentais

Tipo de incerteza	Valor da incerteza
Tensão	0,0003 [V]
Corrente	0,00005 [A]
Temperatura	[°C]

APÊNDICE B. Rotina para simulação de painel fotovoltaico em Scilab

A seguir, rotina para simulação de painel fotovoltaico em Scilab.

```
//Rotina para simulação de painel fotovoltaico (FV)
clear
//Parâmetros iniciais do painel FV
Voc_ref = 6.23 //tensão de circuito aberto
Isc_ref = 0.0966 //corrente de curto circuito
ki = 0.000325 //coeficiente de temperatura para corrente
kv = -0.0265 //coeficiente de temperatura para tensão
G = 1000 //irradiância
q = 1.6*10^(-19) //carga do elétron
a = 0.5 //coeficiente de idealidade do diodo de Silício
k = 1.3806*10^(-23) //constante Stefan Boltzmann
Ns = 36 //número de células FV em série
Eg = 1.12 //energia do elétron na camada de valência
Vmax = 5.30 //tensão no ponto de máxima potência
Imax = 0.0864 //corrente no ponto de máxima potência
tolerancia = 0.01 //critério de parada
erro = 1.0 //valor inicial para parada no loop
I = 10 //chute inicial da corrente
Tcel = 298.15 //temperatura da célula
Tamb = 298.15 //temperatura ambiente
delta_T = Tcel - Tamb //temperatura de operação
f = 0
fd = 0
contador = 0

////////////////////////////////////
//Equações de entrada para Tcel = 25 C
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
Rs = 0.001/(Voc - Vmax) / Imax
Rsh = 1000/Voc / (Isc - Imax)
```

```
n = 100
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 25 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+Rs/Rsh
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
    erro = 1
    I_25(contador) = I
    V_25(contador) = V
    V = V+passo
end
////////////////////////////////////
//Equações de entrada para Tcel = 30 C
Tcel = 303.15
delta_T = Tcel - Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 30 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+Rs/Rsh
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
```

```

erro = 1
I_30(contador) = I
V_30(contador) = V
V = V+passo
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 35 C
Tcel = 308.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 35 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
    erro = 1
    I_35(contador) = I
    V_35(contador) = V
    V = V+passo
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 40 C
Tcel = 313.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
n = 100

```

```

passo = Voc/n
//Código para Tcel = 40 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
    erro = 1
    I_40(contador) = I
    V_40(contador) = V
    V = V+passo
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 45 C
Tcel = 318.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
n = 100
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 45 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
end

```

```

erro = 1
I_45(contador) = I
V_45(contador) = V
V = V+passo
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 50 C
Tcel = 323.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
n = 100
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 50 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
    erro = 1
    I_50(contador) = I
    V_50(contador) = V
    V = V+passo
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 55 C
Tcel = 328.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)

```

```

n = 100
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 55 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
    erro = 1
    I_55(contador) = I
    V_55(contador) = V
    V = V+passo
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 60 C
Tcel = 333.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 60 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
end

```

```

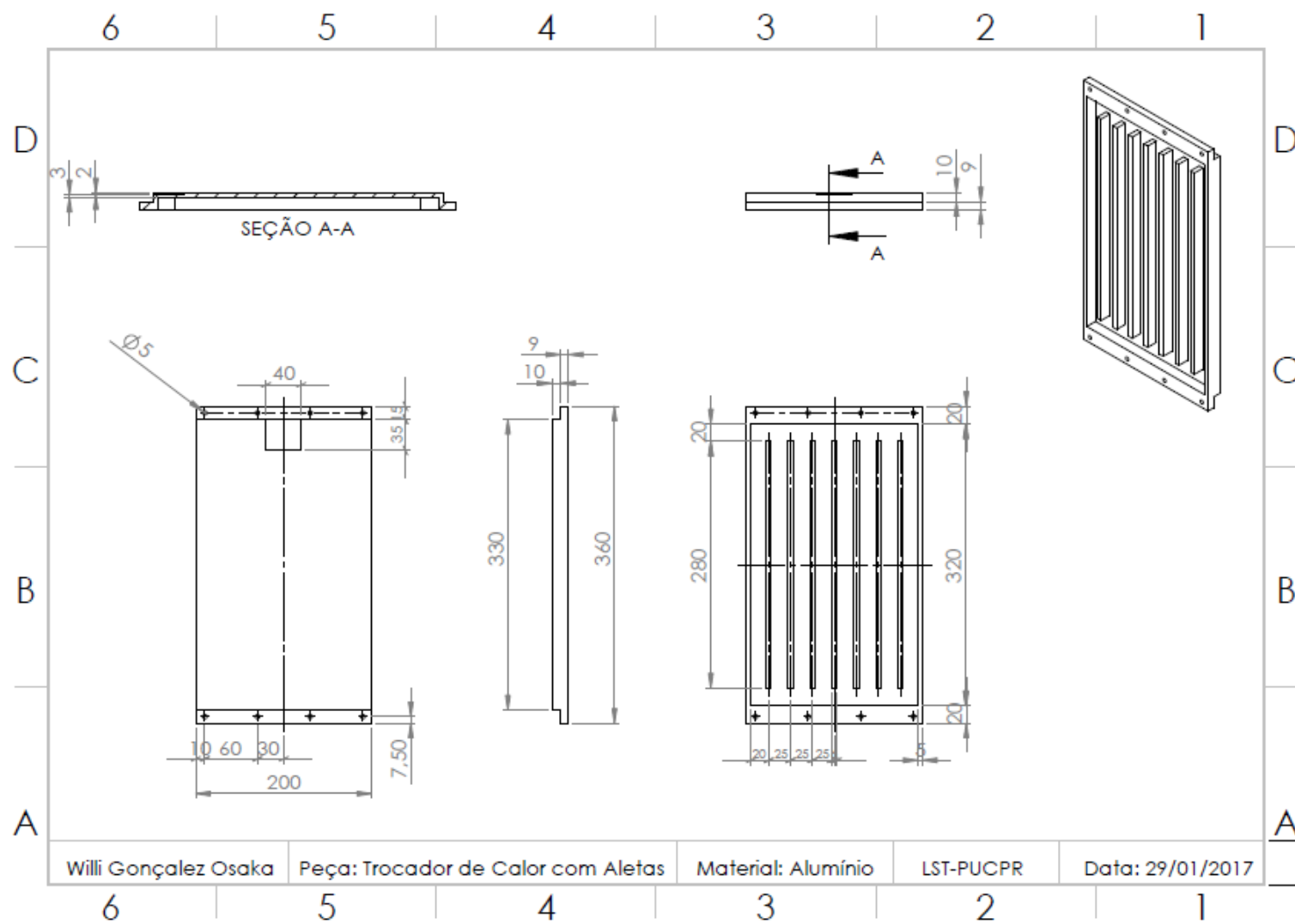
erro = 1
I_60(contador) = I
V_60(contador) = V
V = V+passo

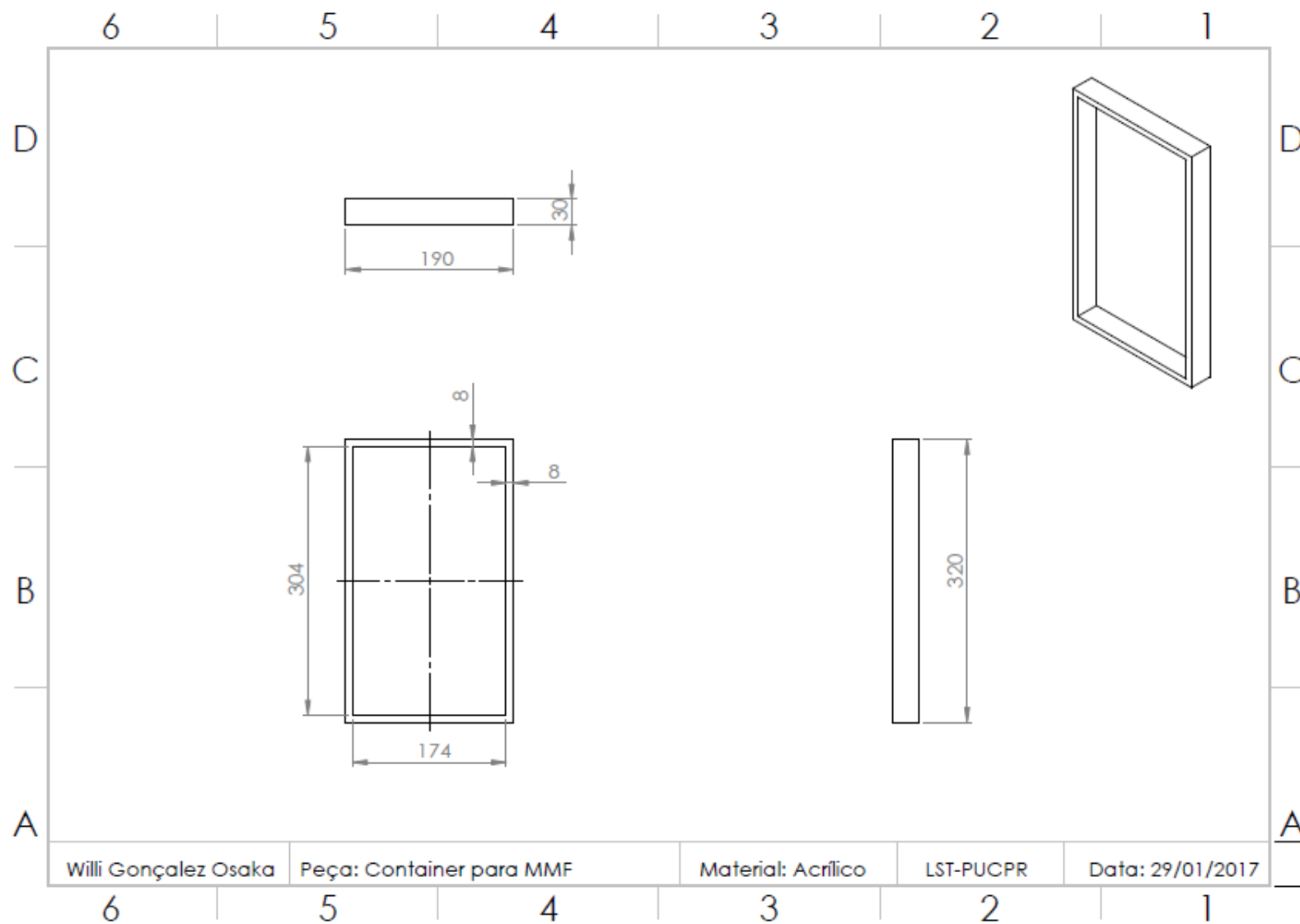
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
//Equações de entrada para Tcel = 65 C
Tcel = 338.15
delta_T = Tcel-Tamb //temperatura de operação
A = Ns*k*Tcel/q
Voc = Voc_ref + kv*(delta_T)
Isc = Isc_ref + ki*(delta_T)
Iph = Isc_ref + ki*(delta_T)
Io = Isc/(exp((Voc)/(a*A))-1.0)
passo = Voc/n
//Código para Tcel = 65 C
V = 0
contador = 0
for x = 0:1:n
    contador = contador+1
    I = 1.0
    while erro >= 0.0001
        f = I-Iph+Io*(exp((V+I*Rs)/(a*A))-1.0)+(V+I*Rs)/(Rsh)
        fd = 1+((Io*Rs)/(a*A))*exp((V+I*Rs)/(a*A))+(Rs/Rsh)
        I_nova = I-f/fd
        erro = abs(I_nova-I)
        I=I_nova
    end
    erro = 1
    I_65(contador) = I
    V_65(contador) = V
    V = V+passo
end
//set(gca(),"off")
plot(V_25,I_25)
plot(V_30,I_30)
plot(V_35,I_35)
plot(V_40,I_40)
plot(V_45,I_45)
plot(V_50,I_50)
plot(V_55,I_55)
plot(V_60,I_60)
plot(V_65,I_65)
//set(gca(),"on")

```

APÊNDICE C. Desenho técnico: Trocador de calor com aletas



APÊNDICE D. Desenho técnico: Reservatório para MMF

APÊNDICE E. Desenho técnico: Coletor solar

