



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CALIL NUNES SOUZA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DE UM MÓDULO  
FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO OPERANDO SOB AS  
CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE FORTALEZA-CE**

**FORTALEZA**

**2019**

CALIL NUNES SOUZA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DE UM MÓDULO  
FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO OPERANDO SOB AS CONDIÇÕES  
METEOROLÓGICAS DE FORTALEZA-CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S237a Souza, Calil Nunes.  
Análise do comportamento da temperatura de um módulo fotovoltaico de silício policristalino operando sob as condições meteorológicas de fortaleza-ce / Calil Nunes Souza. – 2019.  
67 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho.
1. Módulo fotovoltaico. 2. Curvas de temperatura. 3. Balanço energético. 4. Calibração. I. Título.  
CDD 620.1
-

CALIL NUNES SOUZA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DE UM MÓDULO  
FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO OPERANDO SOB AS CONDIÇÕES  
METEOROLÓGICAS DE FORTALEZA-CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng.<sup>a</sup> Mec. Bruna de Oliveira Busson

Dedico este trabalho à minha mãe, Cláudia Pereira Nunes, por todos os sacrifícios feitos por mim e meu irmão. Ao meu pai, Vital Akre de Souza, pelas longas estradas percorridas longe de casa que permitiram minha formação como Engenheiro Mecânico.

## AGRADECIMENTOS

A princípio, agradeço a conclusão deste trabalho ao Senhor Jesus Cristo, por permitir minha existência e salvação, além de me conceder o privilégio de viver sob sua graça e misericórdia. A Ele toda honra e toda glória para sempre.

A conclusão deste curso é fruto do amor e sacrifícios de meus pais, Vital Akre de Souza e Cláudia Pereira Nunes, que sempre prezaram pela educação de seus filhos. Igualmente, reconheço a importância do meu irmão, Nathanael Souza, por me forçar o exercício da paciência no trato como irmão mais velho.

Agradeço a minha melhor amiga e namorada, Leydiane Lima, por toda assistência prestada a mim, em especial pela compreensão das horas roubadas a ela para a conclusão deste trabalho. Agradeço também aos meus amigos, Régis França e Pedro Coelho, pela amizade que me propicia comunhão de irmãos em Cristo. Agradeço também a Leonardo Sátiro e Ítalo Emanuel pelas horas compartilhadas com WE9.

Da mesma forma, agradeço à Igreja Presbiteriana de Maraponga e as demais igrejas das quais já fui membro, além do projeto Vidas para Cristo, por compartilharem o Evangelho de Jesus.

São indispensáveis os agradecimentos a todo o corpo da coordenação, professores e funcionários que integram a Universidade Federal do Ceará, especialmente ao meu professor orientador, Clodoaldo Carvalho, pela inspiradora postura como docente e por todos os conselhos dados ao longo do curso. Do mesmo modo, agradeço a Bruna Busson, que me ajudou com este trabalho, em companhia de Matheus Melo. Deixo também meus agradecimentos aos professores Francisco Nivaldo e Paulo Carvalho.

Também agradeço aos meus amigos do ASHRAE FSB, Francisco Lucas, Juliana Silva, Henrique Reckziegel, Victor Hugo, Gabriel Offredi, Felipe Fideles e Thomáz Sátiro por compartilharem comigo os esforços e alegrias em cursar Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Ceará e a paixão pela Refrigeração, pelo Condicionamento de Ar e pela Geração de Potência.

“Pois qual de vós, querendo edificar uma torre, não se assenta primeiro a fazer as contas dos gastos, para ver se tem com que a acabar?”

*Lucas 14: 28.*

## RESUMO

O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir do sol, o que faz com que o uso de módulos fotovoltaicos tenha aumentado no país. Contudo, esse crescimento evidencia que a maioria dos módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado nacional são projetados e fabricados para operar em condições climáticas diferentes das encontradas no Brasil e, principalmente, no Ceará. Esse fato é problemático tendo em vista as relações existentes entre as condições meteorológicas locais, a temperatura de operação do módulo fotovoltaico e a conversão de energia solar em energia elétrica. Assim, este trabalho visou analisar o comportamento térmico de um módulo FV, instalado em Fortaleza-CE, sob as condições ambientais da região. Para esse fim usou-se um módulo fotovoltaico comercial, instalado de forma convencional em um telhado. Para a medição de temperatura, utilizaram-se sensores que foram calibrados, segundo uma metodologia proposta neste trabalho, para se obter valores de medição. Das medições foram obtidas curvas que mostram os níveis de irradiância solar ao longo do primeiro semestre de 2019 em Fortaleza e curvas que mostram as temperaturas alcançadas pelo módulo fotovoltaico ao longo do dia para os dias pesquisados. Para os dias de máxima irradiação solar as temperaturas máximas do módulo FV são de 49,5°C, em média. Para os dias de média e baixa irradiação solar as temperaturas máximas alcançadas pelo módulo FV foram, respectivamente, 41,7°C e 29,5°C, em média. Foi constatado que as temperaturas se distanciam das temperaturas de teste para os módulos FV encontrados comercialmente, principalmente se tratando das condições climáticas do NE. Também foi proposto um modelo matemático de balanço térmico que foi implementado em planilhas de cálculo. Os resultados da simulação evidenciaram que o balanço térmico implementado consegue prever o comportamento gráfico das medições de temperatura, com pico ocorrendo no período próximo do meio dia para os dias observados. Para os horários entre 07h:00min e 18h:00min os erros relativos entre as temperaturas simuladas e as temperaturas medidas são inferiores a 10%. Ficou constatado que o módulo FV opera com as temperaturas das superfícies superior e inferior próximas, com diferenças relativas inferiores a 1,5%. As planilhas foram validadas e poderão servir para estudos posteriores no LEA/UFC para auxílio nas novas pesquisas.

**Palavras-chave:** Módulo Fotovoltaico, Curvas de Temperatura, Balanço Energético, Calibração.

## ABSTRACT

Brazil has great potential for electricity generation from the sun, which means that the use of photovoltaic modules has increased in the country. Such growth shows that most photovoltaic modules available in the domestic market are designed and manufactured to operate in different climatic conditions than those found in Brazil and, especially, in Ceará. This fact is problematic in view of the relationships between the local meteorological conditions, the operating temperature of the photovoltaic module and the conversion of solar energy to electric energy. Thus, this work aimed to analyze the thermal behavior of a PV module, installed in Fortaleza-CE, under the environmental conditions of the region. For this purpose, a commercial photovoltaic module, conventionally installed on a roof, was used. For the measurement of temperature, we used sensors that were calibrated, according to a methodology proposed in this work, to obtain measurement values. From the measurements were obtained curves showing the levels of solar irradiance during the first half of 2019 in Fortaleza and curves showing the temperatures reached by the photovoltaic module throughout the day for the days surveyed. For the days of maximum solar irradiation, the maximum temperatures of the PV module are 49.5°C, on average. For the days of medium and low solar irradiation the maximum temperatures reached by the FV module were, respectively, 41.7°C and 29.5°C, on average. It was found that the temperatures differ from the test temperatures for the FV modules found commercially, especially when dealing with the climatic conditions of the NE. It was also proposed a mathematical model of thermal balance that was implemented in calculation worksheets. The results of the simulation showed that the thermal balance implemented can predict the graphical behavior of the temperature measurements, with peak occurring in the period close to noon for the observed days. For the hours between 07:00am and 06:00p.m., the relative errors between the simulated temperatures and the measured temperatures are less than 10%. It was found that the PV module operates with the temperatures of the upper and lower surfaces nearby, with relative differences of less than 1.5%. The worksheets have been validated and may be used for further studies in the LEA / UFC for assistance in further research.

Keywords: Photovoltaic Module, Temperature Curves, Energy Balance, Calibration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Balanço Energético simplificado em um módulo FV.....	18
Figura 2.1 - Estrutura básica de funcionamento de uma célula FV.....	21
Figura 2.2 - Componentes básicos que compõem um módulo FV.....	23
Figura 2.3 - Balanço de energia para o módulo FV.....	29
Figura 2.4 - Circuito térmico que representa o balanço de energia para o módulo FV convencional.....	31
Figura 2.5 - Volume de controle da parte superior do módulo FV.....	33
Figura 2.6 - Volume de controle considerando a parte inferior do módulo FV.....	34
Figura 2.7 - Volume de controle considerando a célula FV.....	35
Figura 3.1 - Módulo FV sobre o telhado.....	37
Figura 3.2 - Sensor de temperatura PT100.....	38
Figura 3.3 - Piranômetro modelo LP02.....	41
Figura 3.4 - Sensores de temperatura conectados aos transmissores.....	42
Figura 3.5 - Sistema de monitoramento de dados apresentado ao usuário.....	42
Figura 3.6 - Coleta de dados do PT100 para traçar as curvas de resistência elétrica x Temperatura.....	44

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 - Fontes de energia participantes da matriz de geração de eletricidade mundial em 2017.....	17
Gráfico 2.1 - Influência da temperatura de operação da célula FV para um nível de irradiância de 1000 W/m <sup>2</sup> .....	24
Gráfico 3.1 - Curva do PT100 segundo a Norma DIN IEC 751.....	39
Gráfico 4.1 - Curva de resistência pela temperatura para PT100 testado.....	50
Gráfico 4.2 - Curva de resistência pela temperatura para PT100 testado em comparação com a norma DIN IEC 751.....	51
Gráfico 4.3 - Relação entre a temperatura fornecida pelo SAD e a temperatura real.....	52
Gráfico 4.4 - Comparação entre a temperatura medida pelo SAD e a temperatura corrigida para o módulo FV.....	54
Gráfico 4.5 - Curvas de irradiância para os níveis definidos na Tabela - 4.3.....	56
Gráfico 4.6 - Medições de temperatura para o módulo FV para os dias de baixa irradiância.	56
Gráfico 4.7 - Medições de temperatura para o módulo FV para os dias de média irradiância	57
Gráfico 4.8 - Medições de temperatura do módulo FV para os dias de alta irradiância.....	57
Gráfico 4.9 - Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas para o módulo FV nos dias de alta irradiação.....	59
Gráfico 4.10 - Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas para o módulo FV nos dias de alta irradiação.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	- Especificações do módulo FV modelo KS20T.....	36
Tabela 3.2	- Especificação do piranômetro LP02.....	41
Tabela 3.3	- Incógnitas do processo iterativo das planilhas de cálculo do balanço energético.....	46
Tabela 3.4	- Restrições do processo iterativo das planilhas de cálculo do balanço energético.....	47
Tabela 3.5	- Valores de espessura e condutividades térmicas para Equações da Seção 2.4.....	48
Tabela 3.6	- Valores da emissividade e fatores de forma para Equações da Seção 2.4.....	48
Tabela 4.1	- Resolução da Equação 4.4 a partir dos valores de $\beta_1$ , $\beta_2$ e $r_0$ obtidos do Gráfico 4.1.....	52
Tabela 4.2	- Resultado da correção das temperaturas medidas no módulo FV para o dia 17/03/2019.....	54
Tabela 4.3	- Número de dias por Faixa de Irradiação.....	55
Tabela 4.4	- Valores das resistências térmicas para os componentes do módulo FV.....	58
Tabela 4.5	- Resultados das simulações para os dias de alta irradiação.....	60
Tabela 4.6	- Resultados das simulações para os dias de média irradiação.....	61
Tabela 4.7	- Temperaturas das superfícies para os dias de alta irradiação.....	62
Tabela 4.8	- Temperaturas das superfícies para os dias de média irradiação.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controladores Lógicos Programáveis
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e.V.</i>
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetat</i>
FV	Fotovoltaica
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
LEECA	Laboratório de Eficiência Energética no Condicionamento de Ar
NE	Nordeste Brasileiro
NOCT	<i>Nominal Operation Cell Temperature</i>
SAD	Sistema de Aquisição de dados
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UECE	Universidade Estadual do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
UV	Ultravioleta
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem
$L_P$	Comprimento característico
$R_0$	Resistência do PT100 a 0°C
$Ra_L$	Número de Rayleigh
$T_{real}$	Temperatura corrigida
$T_{sis}$	Temperatura do SAD
$r_0$	Resistência do PT100 testado a 0°C
$\alpha_1$	Coefficiente do termo de primeiro grau para Equação 3.1
$\alpha_2$	Coefficiente do termo de segundo grau para Equação 3.
$\beta_1$	Coefficiente do termo de primeiro grau para Equação 3.1 do PT100 testado
$\beta_2$	Coefficiente do termo de segundo grau para Equação 3.1 do PT100 testado
$\infty 1$	Subíndice de identificação do fluido ar
A	Área
abs	Subíndice para radiação absorvida
b	Subíndice para superfície inferior do módulo FV
cell	Subíndice para célula FV
$E_n$	Poder emissivo máximo
eva	Subíndice para o EVA
$F_{i-telha}$	Fator de forma da superfície inferior do módulo FV com o telhado
$F_{s-céu}$	Fator de forma da superfície superior do módulo FV com o céu

$G$	Irradiância
$h$	Coeficiente convectivo
$L$	Espessura
$orv$	Subíndice para orvalho
$q$	Taxa de calor
$q_i$	Calor dissipado na superfície inferior
$q_s$	Calor dissipador na superfície superior
$R$	Resistência Térmica
$s$	Subíndice para superfície superior do módulo FV
$T_{c\acute{e}u}$	Temperatura do céu
$ted$	Subíndice para o <i>Tedlar</i> ®
$telha$	Subíndice para telha
$viz$	Subíndice para vizinhança
$W_{el}$	Potência elétrica gerada
$x$	Eixo $x$
$\alpha$	Absortividade
$\varepsilon$	Emissividade
$\eta_{el}$	Eficiência de conversão
$\eta_{NOCT}$	Eficiência do módulo FV sob as condições NOCT
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann

$T$	Temperatura absoluta
$g$	Aceleração da gravidade no local
$k$	Condutividade térmica
$\nu$	Subíndice para vidro
$\gamma$	Coefficiente de expansão térmica
$\rho$	Densidade

# SUMÁRIO

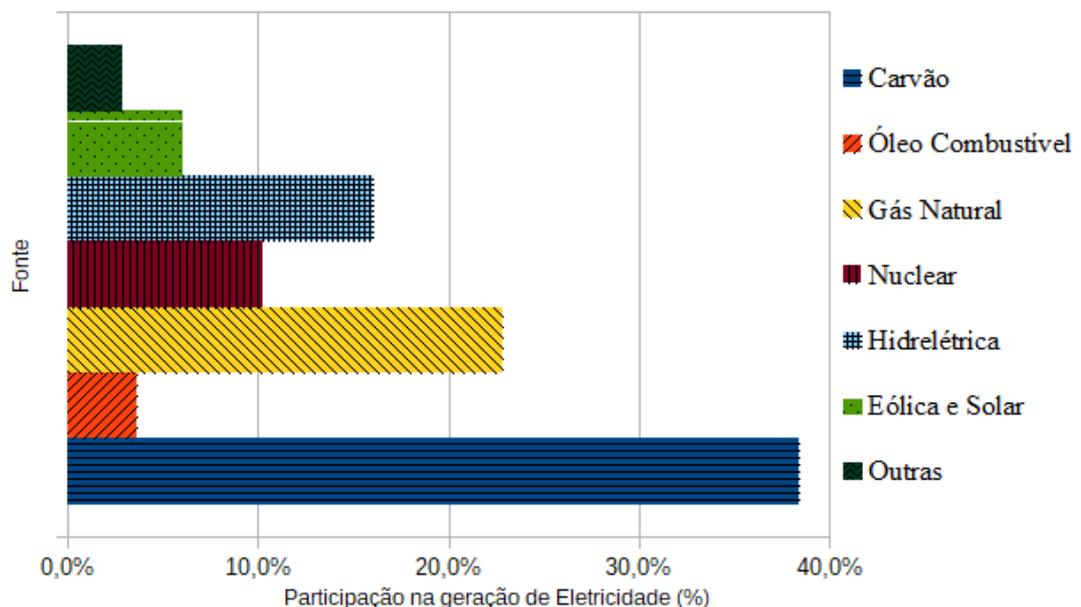
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVO .....	19
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	19
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	19
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 MÓDULOS FV .....	21
2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA EM UM MÓDULO FV .....	23
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	24
2.3.1 <i>Condução</i> .....	24
2.3.2 <i>Convecção</i> .....	25
2.3.3 <i>Radiação</i> .....	26
2.3.4 <i>Resistência Térmica</i> .....	28
2.4 BALANÇO DE ENERGIA PARA O MÓDULO FV .....	28
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1 PRIMEIRA PARTE .....	36
3.1.1 <i>Transdutores de Medição</i> .....	37
3.1.1.1 Sensores de Temperatura PT100.....	37
3.1.1.2 Termômetro de Mercúrio .....	40
3.1.1.3 Piranômetro .....	40
3.1.1.4 Sistema de Aquisição de Dados .....	41
3.1.2 <i>Calibração</i> .....	42
3.2 SEGUNDA PARTE .....	45
3.2.1 <i>Planilhas de Cálculo</i> .....	45
3.2.2 <i>Propriedades Termofísicas e Geométricas do Balanço de Energia</i> .....	47
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
4.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES PT100 .....	50
4.2 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MÓDULO FV INSTALADO NO TELHADO.....	54
4.3 SIMULAÇÕES DO BALANÇO ENERGÉTICO PARA O MÓDULO FV.....	58
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial tem gerado um crescimento acelerado da demanda de energia elétrica em todo o mundo. Entretanto, esse consumo é atendido em sua maior parte por fontes de energia não renováveis. A sociedade está cada vez mais consciente dos impactos negativos advindos da poluição causada pelo uso de combustíveis fósseis e busca um maior consumo de “energias limpas” para contribuir com a redução dos efeitos causados pela utilização do petróleo e outras matrizes energéticas que causam mais impacto ao meio ambiente (SOUZA *et al.*, 2016).

Dessa forma, fontes renováveis de energia aparecem hoje como soluções sustentáveis, duradouras e capazes de resolver alguns desses impasses (CANTOR, 2017). O Gráfico 1.1 apresenta as fontes que fizeram parte da geração de eletricidade mundial no ano de 2017. Por exemplo, em 2017, 64,9% da produção de eletricidade mundial proveio de fontes fósseis (IEA, 2018).

Gráfico 1.1 – Fontes de energia participantes da matriz de geração de eletricidade mundial em 2017.



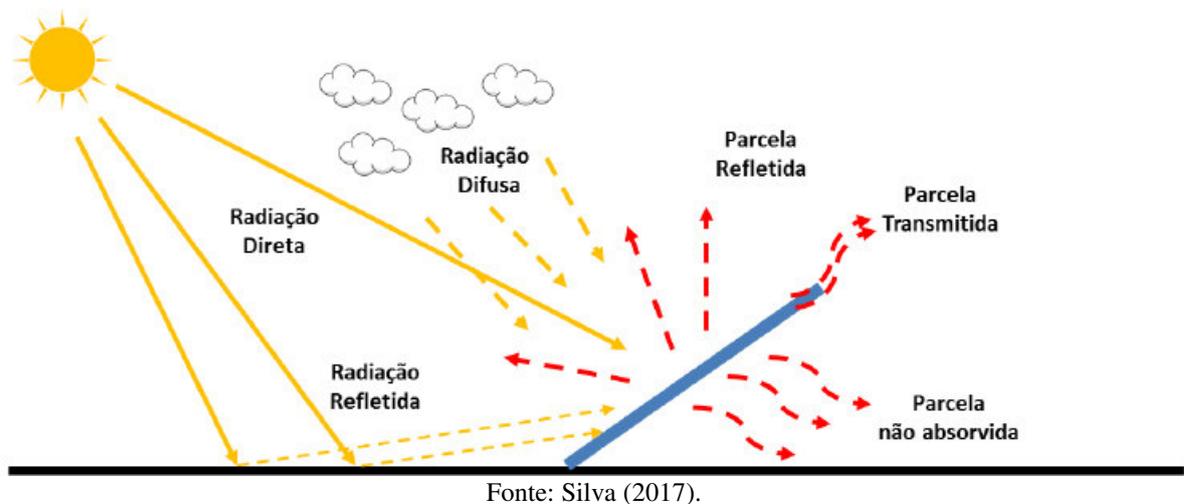
Fonte: IEA (2018).

Dentre as fontes renováveis de energia destaca-se a solar (PINHO e GALDINO, 2014). O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir da conversão da irradiação solar feita em células fotovoltaicas (FV). Os níveis de irradiação solar no Brasil são maiores do que em países onde projetos para utilização dessa fonte já são

amplamente difundidos, como Alemanha, França e Espanha (NASCIMENTO, 2017). Mesmo com os diferentes climas do território brasileiro, a irradiação solar global horizontal total diária é razoavelmente uniforme no país. O Nordeste brasileiro (NE) apresenta um valor máximo médio diário de 6,25 kWh/m<sup>2</sup>, sendo também a região com menor quantidade de sombreamento por nuvens no país. O NE também apresenta a menor variabilidade interanual da irradiação solar com 50% dos valores diários de irradiância contidos no intervalo entre 5,43 e 5,50 kWh/m<sup>2</sup> (PEREIRA *et al.*, 2017).

Células FV convertem cerca de 10-20% da irradiação solar que incide sobre elas, o restante é, em grande parte, transformado em calor e liberado ao ambiente, como representado na Figura 1.1. Uma parte da irradiação solar também é refletida para o meio ambiente. A parte da energia incidente transformada em calor faz com que a temperatura da célula FV aumente (HUIDE *et al.*, 2017; DIMRI *et al.*, 2017).

Figura 1.1 - Balanço Energético simplificado em um módulo FV.



A temperatura de operação, que é definida como sendo a temperatura da célula FV, é uma das propriedades físicas que se destaca por permitir a avaliação do desempenho e da integridade das células FV (CANTOR, 2017; DA SILVA, 2017). As consequências do aumento da temperatura de operação acarretam uma redução na conversão global do sistema FV em energia elétrica (SIECKER *et al.*, 2017).

A temperatura de operação é consequência do balanço de energia, considerando a irradiação, potência elétrica e condições ambientais como temperatura ambiente e velocidade do vento (DA SILVA, 2017). Em termos operacionais, a medição da temperatura de operação não é algo prático de ser feita, pois a célula FV está disposta internamente a um módulo FV,

composto pela célula FV e outros materiais estruturais dispostos em camadas. Entretanto, pode-se medir a temperatura da superfície inferior ou da superfície superior do módulo e, com um balanço de energia, determinar a temperatura de operação.

Os módulos FV encontrados comercialmente são testados em condições diferentes das condições de operação encontradas no NE. Como consequência das diferentes condições de uso e de testes há também um decréscimo na geração de eletricidade comparado a geração nominal fornecida pelos fabricantes.

Assim, devido à importância da temperatura de operação dos módulos FV e das consequências do uso de módulos testados em condições distintas das encontradas no em boa parte do Brasil, este trabalho visa analisar o comportamento térmico de um módulo FV, instalado em Fortaleza-CE, sob as condições ambientais da região. Para a análise, foi realizada a calibração de sensores, coleta de dados, um referencial teórico e a elaboração de uma planilha de cálculo para previsão das temperaturas de operação do módulo FV. O trabalho foi delimitado em calibrar os sensores, corrigir os dados obtidos e determinar as curvas de temperatura do módulo FV ao longo do dia, para os dias analisados.

## **1.1 Objetivo**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Este trabalho tem por objetivo calibrar os sensores de medição de temperatura de um módulo FV instalado no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA/UFC) e analisar o comportamento térmico de um módulo FV para se encontrar as curvas de temperatura do módulo ao longo do dia.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- a) Propor uma Metodologia para calibração do sensor de medição de temperatura do LEA/UFC que é usado para medir a temperatura do módulo;
- b) Medir e elaborar as curvas de temperatura de operação de um módulo FV comercial em funcionamento sob as condições meteorológicas típicas da cidade de Fortaleza-CE;

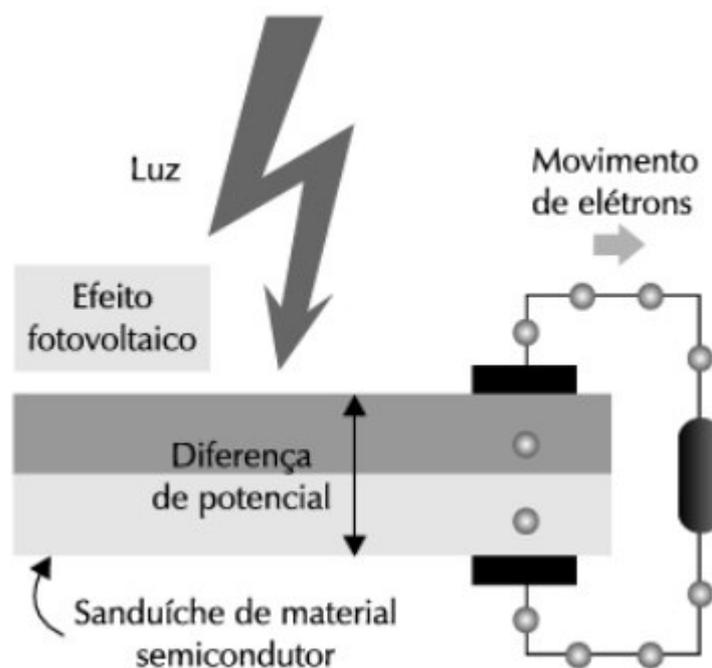
- c) Desenvolver uma planilha de cálculo capaz de determinar as temperaturas atingidas ao longo do dia, a partir de informações básicas de medição colhidas no laboratório;
- d) Testar a hipótese de que o módulo pode ser aproximado como isotérmico;
- e) Validar a planilha com os dados colhidos no laboratório.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Módulos FV

A geração FV se origina da transformação direta da irradiação solar em energia elétrica. Para tal, são utilizados materiais semicondutores, que são capazes de produzir uma diferença de potencial elétrico durante o processo de absorção da energia proveniente do Sol. A unidade básica de conversão, utilizada nesse tipo de aproveitamento da energia solar, é conhecida como célula FV (CANTOR, 2017). As células FV são as responsáveis por converter radiação solar em corrente contínua a partir de fótons colidindo no módulo como representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Estrutura básica de funcionamento de uma célula FV.



Fonte: Villalva (2012).

Para se conseguir níveis de corrente, tensão e potência elétrica adequados, células FV são associadas em série, em paralelo ou em uma configuração em série e paralelo. Esse arranjo das células FV é encapsulado juntamente com outros materiais estruturais para resultar em um módulo FV. Um módulo FV pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células FV e esta associação depende dos parâmetros elétricos mais adequados à aplicação a que o módulo FV se destina. Estas células são soldadas em tiras, geralmente com soldagem realizada com iluminação com lâmpadas halógenas ou radiação *laser*. Depois de soldadas, as

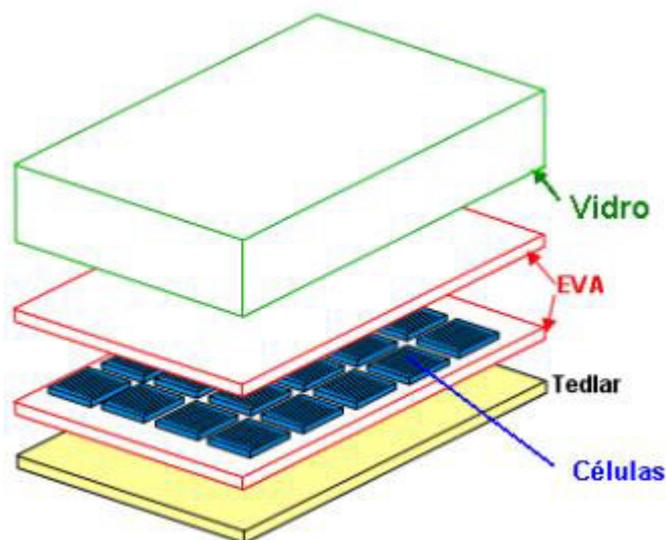
células FV são encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo FV (PINHO e GALDINO, 2014). Plantas FV são formadas pela associação de vários módulos FV.

Em termos estruturais, da face superior que recebe a irradiância solar para a camada inferior, considerando os principais componentes para este trabalho, o módulo FV é geralmente constituído por uma camada de vidro, um primeiro filme encapsulante, a camada de silício, um segundo filme de encapsulante e uma camada de *Backsheet*, conforme mostrado na Figura 2.2:

- a) Vidro: é um vidro especial ultra puro com baixo teor de ferro, desenvolvido especialmente para deixar o máximo de luz atravessa-lo. Trata-se de um vidro temperado especial, geralmente com 3,2 mm ou 4 mm de espessura, revestido com uma substância antirreflexiva (PORTAL SOLAR, 2019);
- b) Filme Encapsulante: O filme encapsulante para o módulo FV, tradicionalmente conhecido como *EVA*, acetato-vinilo de etileno (que deriva do inglês, *Ethylene Vinyl Acetat*), é um material selante de cura rápida e especificamente projetado para os módulos FV. Ele protege as células FV contra o envelhecimento causado por raios Ultravioleta (UV), temperaturas extremas e umidade, assegurando que o máximo de luz atinja as células solares (PORTAL SOLAR, 2019);
- c) Camada de Silício: A célula FV é o principal componente do seu módulo solar, e é nessa camada que através de uma reação físico-química converte-se luz do Sol em energia elétrica. O silício representa aproximadamente 60% do custo de um módulo solar. As camadas de silício têm aproximadamente 0,2 mm de espessura. São feitas a partir de um filme fino de cristal de silício ultra puro e precisam ser manuseadas com cuidado, pois trincam com facilidade (PORTAL SOLAR, 2019);
- d) *Backsheet*: É o filme branco que vai à parte de trás do módulo solar. É feito de fluoreto de polivinilideno, um material polimérico de notável resistência mecânica. A função principal da *Backsheet* é proteger os componentes internos do módulo solar, especificamente as células FV bem como agir como um isolante elétrico. Tem uma composição robusta sendo composta por várias camadas. Possui a aparência de um filme branco de plástico grosso (PORTAL

SOLAR, 2019). Existem algumas versões comerciais de *Backsheet*, uma delas é o *Tedlar*®.

Figura 2.2 – Componentes básicos que compõem um Módulo FV.



Fonte: Andrade (2009).

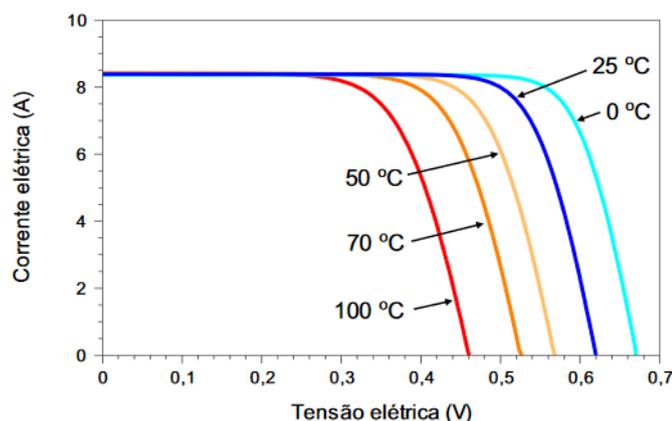
## 2.2 Influência da Temperatura em um Módulo FV

Os módulos FV encontrados comercialmente são testados em condições diferentes das condições de operação encontradas em certas regiões do Brasil, como o NE. Os módulos são testados em condições padronizadas de teste STC (deriva do inglês, *Standard Test Conditions*) e *Normal Operation Cell Temperature* (NOCT), ambas definidas por normas da IEC (do inglês, *International Electrotechnical Commission*). As STC são definidas na Norma IEC 60891 e a NOCT é definida na Norma IEC 60904-5 (VERLINDEN, 2017). As STC consideram a irradiância  $1000\text{W/m}^2$  e a temperatura da célula FV de  $25^\circ\text{C}$ . Esta condição é produzida em laboratório, dentro de uma câmara climática que possui um sistema preciso de controle e medição, de iluminação e de temperatura. Todos os fabricantes de módulos FV realizam os testes nas mesmas condições, sendo possível assim comparar módulos de diversos fabricantes de acordo com os mesmos critérios (VILLAVA, 2012). Como consequência das diferentes condições de uso e de testes há um decréscimo na geração de eletricidade comparado a geração nominal fornecida pelos fabricantes.

O estado térmico de um corpo é expresso pela sua temperatura. Quando um corpo recebe calor sua temperatura aumenta. Para este trabalho a temperatura será a variável física mais importante, pois a geração de energia elétrica do módulo FV é dependente da

temperatura da célula FV. Segundo Pinho e Galdino, a potência elétrica gerada pelo módulo FV cai devido ao fato de que a tensão gerada no módulo FV diminuir com o aumento da temperatura da célula, conforme representado no Gráfico 2.1.

Gráfico 2.1– Influência da temperatura de operação da célula FV para um nível de irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

## 2.3 Transferência de Calor

Transferência de calor (ou calor) é a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperatura no espaço (INCROPERA, 2008). Sendo assim, sempre que existir uma diferença de temperatura entre dois pontos no espaço, espontaneamente o calor fluirá do ponto mais quente ao ponto mais frio. A transferência de calor não necessita, obrigatoriamente, de um meio físico para ocorrer, podendo ocorrer no vácuo. No meio físico há duas formas de transferência de calor. A primeira forma de transferência de calor ocorre internamente a sólidos, líquidos ou meios gasosos, usa-se o termo condução. Quando há uma interface entre um sólido e um fluido a transferência de calor ocorrerá por convecção. A terceira forma de transferir calor ocorre por radiação, onde um meio físico com temperatura não nula emite calor por radiação eletromagnética.

### 2.3.1 Condução

A transferência de calor por condução é um processo em que o calor flui através de um meio físico material. No modo de condução, o calor é transferido por um mecanismo submicroscópico complexo, no qual átomos do meio interagem em colisões elásticas e inelásticas, a fim de propagar a energia das regiões de mais altas temperaturas para as de mais baixa temperatura (KREITH e BOHN, 2003).

O mecanismo de transferência de calor denominado condução é mantido por atividades atômicas e moleculares. A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância (INCROPERA, 2008). Em um meio físico, as temperaturas mais altas estão associadas a vibrações moleculares mais altas. Os choques entre moléculas vizinhas transfere energia ao longo do meio no sentido da diminuição da temperatura.

Logo, é inerente à condução a existência de um meio material, não ocorrendo condução através do vácuo. A quantificação das taxas de calor transferidas na condução é determinada pela Equação 2.1.

$$q_{\text{condução}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Onde  $q_{\text{condução}}$  (W) é a taxa de calor trocado por condução,  $k$  (W/(mK)) é um parâmetro de transporte conhecido como condutividade térmica,  $A$  (m<sup>2</sup>) é a área da seção transversal ao fluxo de calor,  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura  $T$  na direção  $x$ . O sinal negativo existe devido de a temperatura diminuir no sentido do fluxo de calor.

### 2.3.2 Convecção

O modo de transferência de calor por convecção consiste de dois mecanismos operando simultaneamente, o primeiro é a transferência de energia atribuída ao movimento molecular. Aliado a ele está à transferência de energia através do movimento macroscópico de parcelas do fluido (KREITH e BOHN, 2003). Esse movimento do fluido está associado ao fato de que, em um instante qualquer, um grande número de moléculas está se movendo coletivamente, tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. Como as moléculas nos agregados mantêm seus movimentos aleatórios, a transferência total de calor é, então, devida à superposição do transporte de energia pelo movimento aleatório das moléculas com o transporte devido ao movimento global do fluido (INCROPERA, 2008).

Quanto às formas de transferência de calor por convecção, elas podem ser classificadas como convecção forçada, quando o escoamento do fluido é causado por meios externos (bombas, ventiladores, etc), ou como convecção natural, quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, originadas a partir da diferença de densidades dos

fluidos com diferentes temperaturas. Os processos de transferência de calor, independentemente da natureza específica do processo, são quantificados pela Equação 2.2.

$$q_{convecção} = hA(T_s - T_{\infty 1}) \quad (2.2)$$

Onde  $q_{convecção}$  (W) é a taxa de calor trocado por conversão,  $h$  (W/(m<sup>2</sup>K)) é um parâmetro conhecido como coeficiente de transferência de calor por convecção,  $T_s$  (°C) é a temperatura da superfície,  $T_{\infty 1}$  (°C) é a temperatura do ar.

### 2.3.3 Radiação

Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula. Ainda que a atenção seja voltada para os sólidos, a emissão também ocorre a partir de gases e líquidos. Independente do estado de agregação da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons) (INCROPERA, 2008).

A taxa calor radiante emitido por uma superfície tem sua origem na energia térmica da matéria delimitada pela superfície e a taxa na qual a energia é liberada é conhecida como poder emissivo,  $E$ . Há um limite superior para o poder emissivo, que é determinado pela *lei de Stefan – Boltzmann*, dada na Equação 2.3 (INCROPERA, 2008).

$$E_n = \sigma AT_s^4 \quad (2.3)$$

Em que  $E_n$  (W) é o poder emissivo máximo para uma superfície e  $\sigma$  é a *constante de Stefan – Boltzmann* ( $\sigma = 5,67 * 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ ). A superfície que emite o limite superior do poder emissivo é denominada radiador ideal ou *corpo negro*. A taxa de calor radiante emitida por uma superfície real é melhor que o emitido pelo *corpo negro* à mesma temperatura e é dado pela Equação 2.4 (INCROPERA, 2008).

$$E = \varepsilon \sigma AT_s^4 \quad (2.4)$$

Onde  $\varepsilon$  é chamada de emissividade, um parâmetro adimensional, com  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , é uma propriedade da superfície.

A radiação também pode incidir sobre uma superfície a partir da sua vizinhança. Por

exemplo, a radiação que é recebida pelo módulo FV é oriunda do sol e das outras superfícies às quais a superfície do módulo FV esteja exposta. Uma porção, ou toda a irradiação, pode ser absorvida pela superfície do módulo FV, aumentando dessa forma sua energia térmica. A taxa de calor radiante absorvido por uma superfície pode ser calculada com o conhecimento de uma propriedade radiante conhecida por absortividade  $\alpha$ . Assim o calor absorvido por uma superfície é dado pela Equação 2.5 (INCROPERA, 2008).

$$G_{abs} = \alpha AG \quad (2.5)$$

Onde  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é a radiação incidente sobre a superfície,  $G_{abs}$  ( $\text{W}$ ) é a porção da radiação incidente à superfície absorvido por ela e  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Se  $\alpha < 1$  a superfície é dita opaca, porções da irradiação são refletidas. Se a superfície for semitransparente, parte da irradiação é transmitida para o interior do volume, abaixo da superfície irradiada. O valor de  $\alpha$  depende da natureza da irradiação como também da natureza da superfície irradiada (INCROPERA, 2008).

Um caso particular ocorre quando uma pequena superfície, como um módulo FV, troca calor radiante com uma superfície isotérmica, muito maior, que envolve completamente a menor. Sendo a temperatura isotérmica da vizinhança definida como sendo  $T_{viz}$ . Assim, a Equação 2.5 pode ser escrita como sendo:

$$G_{abs} = \alpha AT_{viz}^4 \quad (2.6)$$

Como já mencionado, a transferência de calor na forma de radiação não necessita de um meio físico para ocorrer, sendo até mais efetiva no vácuo. A superfície, pelo fato de ter uma temperatura não nula emite radiação, segundo a Equação 2.4. Em conjunto com a emissão a superfície recebe calor radiante de outras superfícies adjacentes, segundo a Equação 2.6. Assim, sendo definindo a superfície como uma *superfície cinza*,  $\alpha = \varepsilon$ , a troca de calor radiante líquida entre uma superfície e sua vizinhança é definida pela Equação 2.7.

$$q_{radiação} = F_{s-céu} \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.7)$$

Onde  $q_{radiação}$  ( $\text{W}$ ) é o calor radiante líquido trocado e  $T_{viz}$  ( $\text{K}$ ) é a temperatura da vizinhança. O fator  $F_{s-céu}$  é definido como a fração da radiação que deixa a superfície e é absorvida pelo céu, chamado *fator de forma*. O *fator de forma* é um fator geométrico dependente da geometria das superfícies analisadas (INCROPERA, 2008).

### 2.3.4 Resistência Térmica

Existe uma analogia entre os sistemas de fluxo de calor e os circuitos elétricos CC. Em circuitos elétricos CC, a corrente que atravessa uma resistência elétrica é dada pela divisão entre a diferença de potencial elétrico entre a entrada e a saída da resistência elétrica pelo valor da resistência. Para a transferência de calor tem-se que o calor líquido transferido é igual à diferença das temperaturas dividida pela resistência térmica. O calor assume o papel da corrente elétrica e a diferença de temperaturas assume o papel das diferenças de potencial da resistência elétrica. Logo, sendo  $R_t$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) a resistência térmica,  $q$  (W) o calor líquido trocado,  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a temperatura mais alta,  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a temperatura mais baixa, assim tem-se a definição dada na Equação 2.8 (KREITH e BOHN, 2003).

$$R_t \equiv \frac{T_1 - T_2}{q} \quad (2.8)$$

Assim, para a condução, convecção e radiação em uma parede plana, são definidas as resistências dadas nas Equações 2.9, 2.10 e 2.11.

$$R_{\text{condução}} = \frac{L}{kA} \quad (2.9)$$

$$R_{\text{convecção}} = \frac{1}{hA} \quad (2.10)$$

$$R_{\text{radiação}} = \frac{1}{\varepsilon\sigma A(T_s + T_{\text{viz}})(T_s^2 + T_{\text{viz}}^2)} \quad (2.11)$$

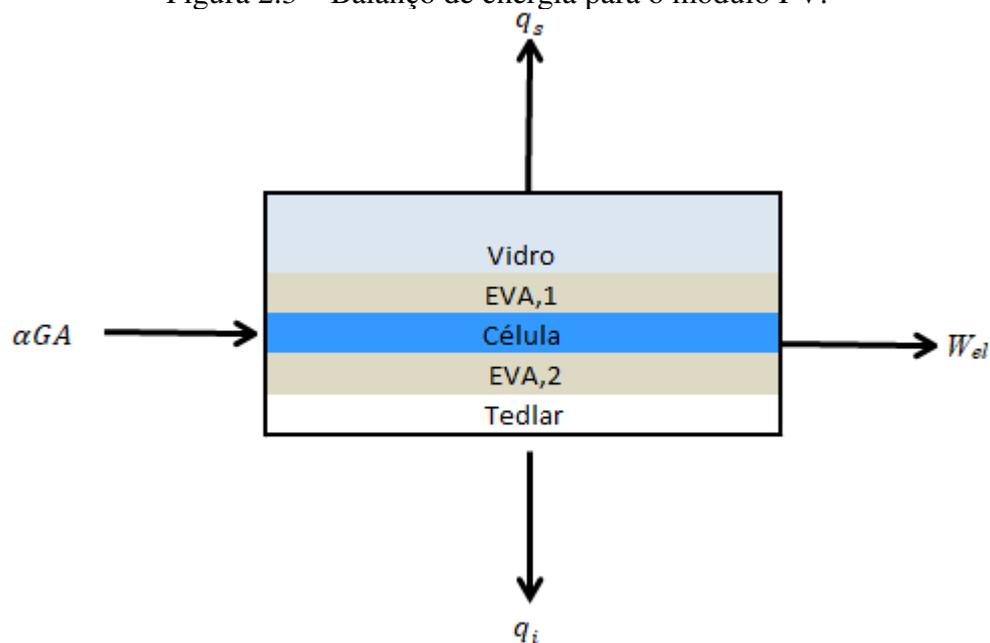
Onde  $R_{\text{condução}}$ ,  $R_{\text{convecção}}$  e  $R_{\text{radiação}}$  são, respectivamente, as resistências térmicas na condução, convecção e radiação.  $L$  é a espessura da parede plana na direção  $x$ . Representações na forma de circuitos fornecem uma ferramenta útil tanto para a conceituação quanto para a quantificação de problemas da transferência de calor. Circuitos térmicos seguem a analogia dos circuitos elétricos CC também nas associações em série e em paralelo, daí a utilidade da comparação (INCROPERA, 2008).

## 2.4 Balanço de Energia para o Módulo FV

O módulo FV foi posto sobre um telhado, instalado de forma convencional, com ângulo de inclinação nulo em relação a horizontal. Da irradiância incidente sobre as células

FV, uma porção produz potência elétrica, uma parte é refletida para o ambiente e o restante é transformado em calor, responsável pela elevação da temperatura de operação. Esse calor é dissipado tanto pela superfície superior como pela inferior do módulo FV. Nas superfícies superior e inferior, as perdas ocorrem por radiação e convecção. A radiação deve-se à emissividade para o céu, no caso da superfície superior, e emissividade para as telhas, no caso da superfície inferior. A convecção deve-se ao contato das superfícies superior e inferior com o ar.

Figura 2.3 – Balanço de energia para o módulo FV.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O balanço de energia do módulo FV inclui o termo  $q_s$  que é a taxa total de calor dissipado (W) na superfície superior do módulo, o termo  $q_i$  que é a taxa total de calor dissipado (W) na superfície inferior e o termo  $W_{el}$  que potência elétrica (W) gerada pelo módulo FV, conforme mostrado na Figura 2.3. Assim o balanço de energia em regime permanente do módulo é dado pela Equação 2.12 :

$$\alpha GA - q_s - q_i - W_{el} = 0 \quad (2.12)$$

Onde  $q_s$  representa a taxa de calor perdida (W) pela superfície superior do módulo FV,  $q_i$  representa a taxa de calor perdida (W) pela superfície inferior do módulo e  $W_{el}$  é a potência elétrica produzida (W). As superfícies do vidro e do EVA anterior à célula FV são modelados como transparentes, permitindo a passagem de toda irradiação incidente para as células FV.

A expressão que representa  $q_s$ , segundo termo na Equação 2.12, é uma combinação das perdas por convecção para o ar e por radiação para o céu da superfície superior:

$$q_s = h_v A (T_v - T_{\infty 1}) + F_{s-c\u00e9u} \varepsilon_v \sigma A (T_v^4 - T_{c\u00e9u}^4) \quad (2.13)$$

Onde  $h_v$  (W/m<sup>2</sup>K) é o coeficiente convectivo entre o vidro e o ar,  $F_{s-c\u00e9u}$  é o fator de forma entre a superfície superior e o céu,  $\varepsilon_v$  é a emissividade do vidro,  $T_v$  é a temperatura da superfície superior do vidro (K),  $T_{\infty 1}$  é a temperatura do ar (K) e  $T_{c\u00e9u}$  é a temperatura do céu (K).

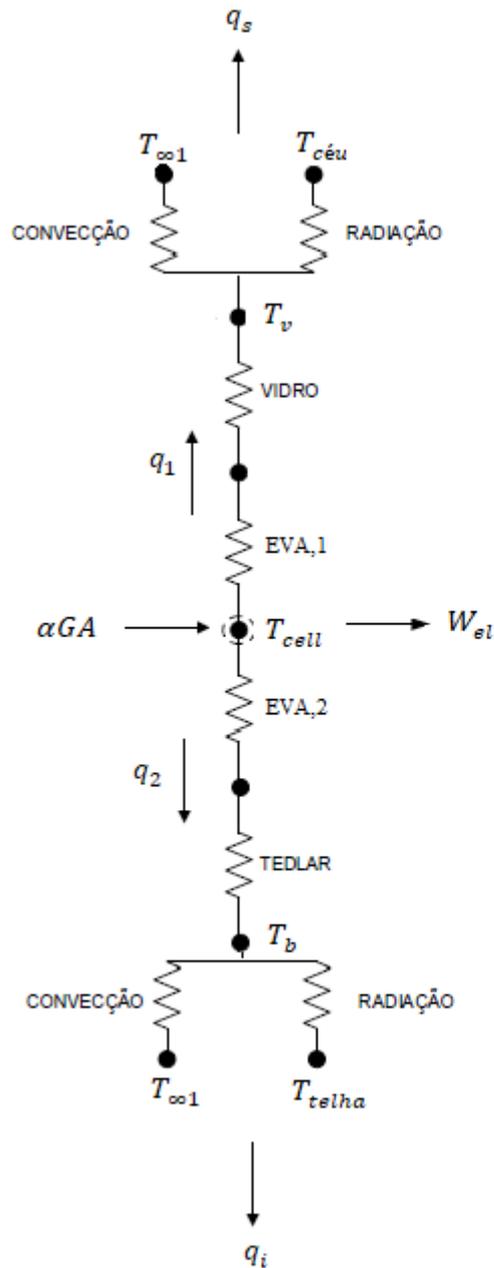
De forma an\u00e1loga tem-se para  $q_i$ , segundo termo na Equação 2.12, uma combina\u00e7\u00e3o das perdas por convec\u00e7\u00e3o para o ar e por radia\u00e7\u00e3o para as telhas,  $F_{i-telha}$  \u00e9 o fator de forma entre a superf\u00edcie inferior e as telhas, sendo  $\varepsilon_{ted}$  a emissividade do *Tedlar*\u2122,  $h_b$  (W/m<sup>2</sup>K) \u00e9 o coeficiente convectivo entre o ar e a superf\u00edcie inferior,  $T_b$  \u00e9 a temperatura da superf\u00edcie inferior do *Tedlar*\u2122 (K) e  $T_{telha}$  a temperatura das telhas (K) abaixo do m\u00f3dulo FV.

$$q_i = h_b A (T_b - T_{\infty 1}) + F_{i-telha} \varepsilon_{ted} \sigma A (T_b^4 - T_{telha}^4) \quad (2.14)$$

Baseados nos elementos construtivos do m\u00f3dulo FV vistos na Se\u00e7\u00e3o 2.1, pode-se montar um circuito t\u00e9rmico (Figura 2.4) para an\u00e1lise do balan\u00e7o de energia no m\u00f3dulo. Para o balan\u00e7o de energia foi considerado que as superf\u00edcies do vidro e do *EVA*, entre o vidro e a c\u00e9lula FV, s\u00e3o transparentes. Assim, a irradia\u00e7\u00e3o chega \u00e0 c\u00e9lula FV onde uma por\u00e7\u00e3o \u00e9 absorvida e outra por\u00e7\u00e3o \u00e9 refletida ao ambiente externo ao m\u00f3dulo FV. Os componentes foram modelados como sendo paredes planas. Ap\u00f3s isso,  $q_1$  \u00e9 o calor l\u00edquido que sai da c\u00e9lula FV e vai em dire\u00e7\u00e3o ao vidro por condu\u00e7\u00e3o. Da c\u00e9lula FV sai  $q_2$ , que \u00e9 o calor que vai para a superf\u00edcie inferior do painel por condu\u00e7\u00e3o.

Definindo  $L_v$  a espessura do vidro e  $k_v$  \u00e9 a condutividade do vidro. *EVA,1* \u00e9 a camada de *EVA* entre a camada de vidro e a c\u00e9lula FV.  $L_{eva,1}$  \u00e9 a espessura do *EVA,1*,  $k_{eva}$  \u00e9 a condutividade t\u00e9rmica do *EVA*. *EVA,2* \u00e9 a camada de *EVA* sob a c\u00e9lula FV,  $L_{eva,2}$  \u00e9 a espessura do *EVA,2*. A camada de *Tedlar*\u2122 vem abaixo do *EVA,2*, sendo  $L_{ted}$  a espessura da camada de *Tedlar*\u2122 e  $k_{ted}$  sua condutividade t\u00e9rmica.

Figura 2.4 – Circuito térmico que representa o balanço de energia para o módulo FV convencional.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Logo, partindo da Equação 2.9, pode-se encontrar as resistências térmicas de cada uma das camadas componentes do módulo FV, entre a superfície do vidro e a célula FV e entre a célula FV e a superfície inferior do *Tedlar*®. O regime de transferência de calor é permanente, a troca de calor ocorre de forma unidimensional, ou seja, não há trocas consideráveis nas laterais do módulo FV. A camada de silício, devido a sua pequena espessura, está à mesma temperatura,  $T_{cell}$ .

$$R_v = \frac{L_v}{k_v A} \quad (2.15)$$

$$R_{eva,1} = \frac{L_{eva,1}}{k_{eva} A} \quad (2.16)$$

$$R_{eva,2} = \frac{L_{eva,2}}{k_{eva} A} \quad (2.17)$$

$$R_{ted} = \frac{L_{ted}}{k_{ted} A} \quad (2.18)$$

Onde  $R_v$ ,  $R_{eva,1}$ ,  $R_{eva,2}$  e  $R_{ted}$  são, respectivamente, as resistências térmicas do vidro, EVA,1, EVA,2 e do Tedlar®. Entre a célula FV e a superfície superior, como na Figura 2.5, tem-se:

$$q_1 = q_s \quad (2.19)$$

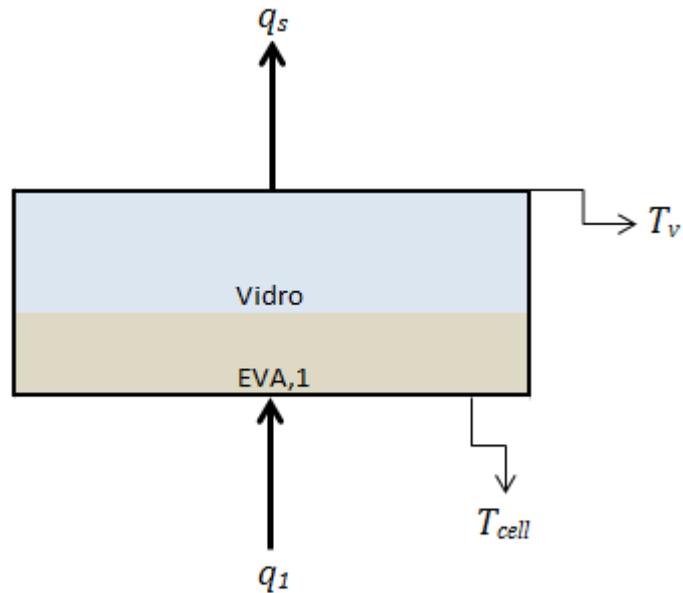
Entre as temperaturas  $T_{cell}$  e  $T_v$  tem-se as resistências  $R_v$  e  $R_{eva,1}$  em série. Assim, da Equação 2.8 tem-se a condição para encontrar-se  $T_v$  em função de  $T_{cell}$  como dado na Equação 2.20.

$$q_1 = \frac{T_{cell} - T_v}{R_v + R_{eva,1}} \quad (2.20)$$

Por substituição da Equação 2.13 e 3.20 na Equação 2.19, tem-se que  $T_v$  é função da temperatura da célula,  $T_{cell}$ .

$$h_v A (T_v - T_{\infty 1}) + F_{s-c\u00e9u} \varepsilon_v \sigma A (T_v^4 - T_{c\u00e9u}^4) = \frac{T_{cell} - T_v}{R_v + R_{eva,1}} \quad (2.21)$$

Figura 2.5 – Volume de controle da parte superior do módulo FV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga pode-se analisar o trecho entre a célula FV e a superfície inferior, conforme a Figura 2.6, tem-se:

$$q_2 = q_i \quad (2.22)$$

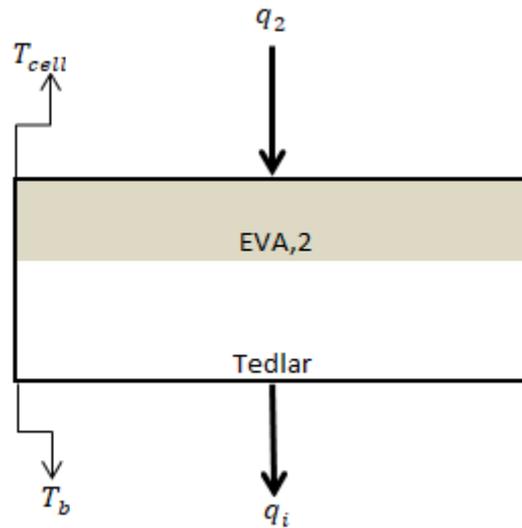
Entre as temperaturas  $T_{cell}$  e  $T_b$  tem-se as resistências  $R_{ted}$  e  $R_{eva,2}$  em série. Assim, da Equação 2.8 tem-se a condição para encontrar-se  $T_b$  em função de  $T_{cell}$ , conforme a Equação 2.24.

$$q_2 = \frac{T_{cell} - T_b}{R_{ted} + R_{eva,2}} \quad (2.23)$$

Substituindo a Equação 2.14 e 2.23 na Equação 2.22 tem-se a Equação 2.24, que tem  $T_b$  como função de  $T_{cell}$ .

$$h_b A (T_b - T_{\infty 1}) + F_{i-telha} \varepsilon_{ted} \sigma A (T_b^4 - T_{telha}^4) = \frac{T_{cell} - T_b}{R_{ted} + R_{eva,2}} \quad (2.24)$$

Figura 2.6 – Volume de controle considerando a parte inferior do módulo FV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência gerada, último termo da Equação 2.12 depende da relação entre a irradiância incidente útil capaz de produzir eletricidade e a eficiência do módulo FV ( $\eta_{el}$ ), dado na Equação 2.25. A eficiência de conversão FV varia com a temperatura da célula FV conforme a Equação 2.26, proposta por Mohring *et al* (2004).

$$W_{el} = \eta_{el}GA \quad (2.25)$$

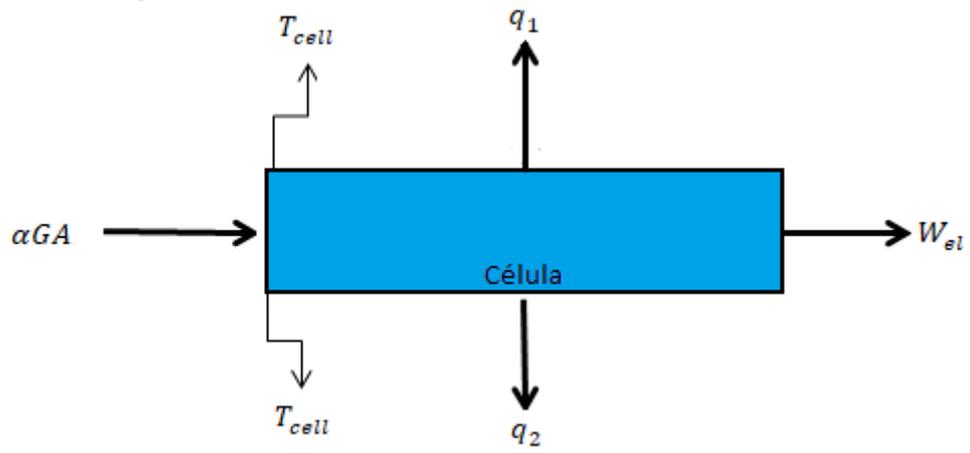
$$\eta_{el} = \eta_{NOCT}[1 + C(T_{cell} - 25)] \quad (2.26)$$

Onde  $\eta_{NOCT}$  é a eficiência do módulo FV à temperatura de 25°C, sob as condições de teste *NOCT*,  $C$  é a constante de redução da eficiência que, no caso de células de silício policristalino, vale -0,5%/°C (Mohring *et al*, 2004). Logo se tem o balanço energético para o módulo, conforme Figura 2.7.

$$(\alpha - \eta_{el})GA - h_v A(T_v - T_{\infty 1}) - F_{s-c\acute{e}u} \epsilon_v \sigma A(T_v^4 - T_{c\acute{e}u}^4) - h_b A(T_b - T_{\infty 1}) - F_{i-telha} \epsilon_{ted} \sigma A(T_b^4 - T_{telha}^4) = 0 \quad (2.27)$$

Com Equação 2.27, as Equações de 2.12 a 2.27 têm como única variável  $T_{cell}$ . Na seção de Material e Métodos planilhas de *Excel*® e *LibreOffice*® serão propostas para resolução das Equações de 2.12 a 2.27 com o objetivo de encontrar a temperatura da célula FV.

Figura 2.7 – Volume de controle considerando a célula FV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido em duas partes. Na Primeira parte, ocorre a montagem da bancada de testes, montagem do módulo no telhado, calibração dos sensores de medição, sensoriamento dos módulos e do ambiente onde os módulos estão instalados.

Na Segunda parte, ocorre a coleta de dados, a elaboração das planilhas com balanço térmico do módulo FV e a comparação dos resultados calculados com os dados de medição para validação da planilha e posterior uso futuro em novas pesquisas. Os dados meteorológicos como irradiância e temperatura ambiente são colhidos ao longo das duas etapas do trabalho para avaliação das condições ambientais que influenciam no comportamento térmico e, conseqüentemente, no desempenho do módulo FV. Além das informações climatológicas também são monitorados os valores de temperatura de operação do módulo FV.

#### 3.1 Primeira Parte

A pesquisa deste trabalho foi realizada no LEA/UFC e no Laboratório de Eficiência Energética no Condicionamento de Ar da UFC (LEECA/UFC), ambos localizados no Campus do Pici, UFC. A pesquisa buscou analisar a distribuição de temperatura do módulo FV ao longo do dia para um módulo FV instalado de forma convencional sobre telhado com ângulo nulo em relação a horizontal.

O módulo FV utilizado é de silício policristalino sem moldura, com potência elétrica nominal de 20 Wp, modelo KS20T, conforme a Figura 3.1. As demais especificações são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1– Especificações do módulo FV modelo KS20T.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Potência nominal	20 Wp
Tensão de circuito aberto	21,7 V
Corrente de curto-circuito	1,26 A
Irradiância NOCT	1000 W/m <sup>2</sup>
Temperatura NOCT	25°C
Comprimento do módulo sem moldura	0,512 m
Largura do módulo sem moldura	0,344 m

Fonte: Adaptado de KYOCERA SOLAR (2018).

Figura 3.1 – Módulo FV sobre o telhado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, foi dada ênfase aos transdutores de medição utilizados nos experimentos, calibração e instalação dos sensores para medição dos dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

### ***3.1.1 Transdutores de Medição***

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia 2012 (VIM, 2012) transdutores de medição são dispositivos utilizados em medição que fornecem uma grandeza de saída a qual tem uma relação especificada com uma grandeza de entrada. Sendo assim, transdutores são os dispositivos ou elementos que detectam alterações nas variáveis físicas de processo e fornecem uma grandeza de saída em geral elétrica. O elemento do transdutor, ou elemento primário, que entra em contato direto com a variável física a ser medida (mensurando) é denominado sensor. Quando o elemento é responsável pela “detecção” de determinada condição no processo pode ser também denominado detector.

Transdutores são utilizados para realizar medições da temperatura de operação do módulo FV, temperatura ambiente, irradiância, cujos dados podem ser exportados para planilhas do *Excel*® e *LibreOffice*® onde são feitas as análises e as curvas do comportamento térmico.

#### ***3.1.1.1 Sensores de Temperatura PT100***

Ao se aproximar dois corpos distintos com temperaturas diferentes tais corpos estarão em equilíbrio térmico quando as temperaturas entre eles permanecerem iguais, ou seja, quando não houver mais passagem de calor entre um e outro. Esse é o princípio básico da maioria dos medidores de temperatura. Em geral o elemento de medição deverá estar em

contato com o meio cuja temperatura se quer determinar. Medindo-se alguma característica física do elemento de medição que seja relacionada com temperatura, ter-se-á, indiretamente, o valor de sua temperatura, e, por extensão, a do meio no qual ele se encontra imerso.

PT100 são sensores de temperatura resistivos (RTD do inglês, *Resistance Temperature Detector*) feitos em fios ou chapas finas de platina (JOHNSON, 2014). PT100 existem na forma não encapsulada ou encapsulada (com isolantes à base de MgO; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou outros compostos similares), conforme mostrado na Figura 3.2.

. Figura 3.2 – Sensor de temperatura PT100.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A medição é feita baseada na mudança da resistência da platina com as variações de temperatura. A relação entre a resistência do PT100 e a temperatura é dada pela Equação 3.1:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots) \quad (3.1)$$

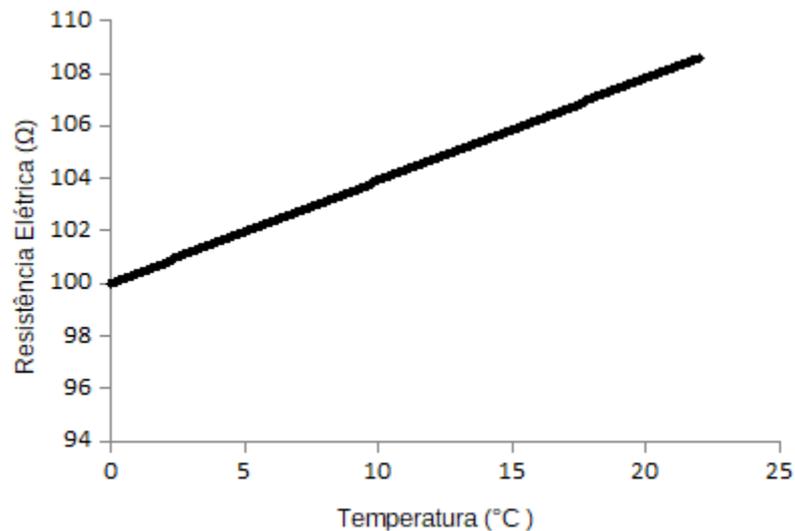
Onde R é a resistência do condutor ( $\Omega$ ) à temperatura T ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R_0$  é a resistência do condutor a  $0^{\circ}\text{C}$ . Os coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , são constantes. Para temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $850^{\circ}\text{C}$  os coeficientes de grau maior que três na Equação 2.61 são desprezados. Os coeficientes dados pela Norma DIN IEC 751 para a platina são  $\alpha_1 = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  e  $\alpha_2 = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$ . Para a platina a  $0^{\circ}\text{C}$ , tem-se  $R_0 = 100 \text{ } \Omega$ . O Gráfico 3.1 representa a curva resistência x temperatura para o PT100 dentro da norma, onde eixo x é a temperatura, em  $^{\circ}\text{C}$ , o eixo y representa a resistência elétrica do PT100, em  $\Omega$ .

A sensibilidade dos PT100 é dada pela Equação 3.2 (BANNISTER *et al*, 1991).

$$\frac{dR}{dT} = R_0(\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 \cdot T) \quad (3.2)$$

A incerteza de medida com PT100 é da ordem dos  $\pm 0,1$  °C (SINCLAIR, 2001). Para medição da temperatura de operação do módulo FV, posiciona-se um PT100 no centro da parte traseira do módulo FV.

Gráfico 3.1 – Curva do PT100 segundo a Norma DIN IEC 751.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as vantagens de utilizar um PT100 estão:

- a) Aceita expansão do comprimento do cabo para leituras a longas distâncias contanto que sejam feitos ajustes no software de coleta de dados, subtraindo a resistência elétrica do cabo adicionado;
- b) Dispensa o uso de cabos de extensão e compensação para ligação;
- c) Aplicável em diversos ambientes incluindo a água;
- d) Pouco influenciável por ruídos elétricos;
- e) Boa permutabilidade;
- f) Estável em longo prazo (ALENCAR FILHO, 2018; TERMOPARES, 2019).

Mas o emprego do termorresistor PT100 também possui desvantagens como:

- a) É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura estabilizada para a correta medição;
- b) Risco de autoaquecimento (TERMOPARES, 2019).

### **3.1.1.2 Termômetro de Mercúrio**

É o termômetro mais familiar e usado para medição. Consiste num tubo capilar de vidro fechado e evacuado, com um bulbo numa extremidade, contendo mercúrio, que é a substância termométrica. O volume do mercúrio é medido numa escala de comprimento da coluna líquida. Este comprimento medido não corresponde exatamente à dilatação ou contração do mercúrio, mas à diferença entre ela e a dilatação do vidro (NUSSENZVEIG, 2002). Entretanto, a dilatação ou contração do mercúrio é geralmente muito maior que a do vidro, pouco alterando o resultado da medição de temperatura, fazendo assim com que o termômetro tenha uma excelente leitura. O alcance de operação do termômetro de mercúrio é de -35 a 450 °C (DUNN, 2005).

Para medição de temperatura também se usou neste trabalho um termômetro de mercúrio da marca *Incoterm*®, modelo 34805, que mede entre -10°C e 40°C, com valor de divisão de escala de 0,2°C.

### **3.1.1.3 Piranômetro**

A irradiação solar sofre influencia do ar atmosférico, das nuvens e da poluição antes de chegar ao módulo FV. A radiação global que chega ao módulo é composta por raios solares de todas as direções, grande parte vinda diretamente do sol e a outra parte vinda da reflexão dos raios na atmosfera. A radiação global é medida por um instrumento chamado piranômetro, ilustrado na Figura 3.3, que consiste em uma redoma de vidro que recebe a luz de todas as direções e a concentra em um sensor de radiação solar instalado em seu interior. O piranômetro mede a radiação global no plano horizontal ao solo, as medições da irradiância solar global horizontal incidente dada em W/m<sup>2</sup>.

O sensor de radiação global do LEA/UFC é o piranômetro de segunda classe modelo LP02 (Figura 3.3). Este modelo cumpre com as especificações para piranômetros de segunda classe conforme padrão ISO 9060. O LP02 é largamente utilizado em monitoramento de desempenho de sistemas FV. As especificações do piranômetro instalado no LEA são fornecidas na Tabela 3.2. Como os módulos FV estão instalados na posição horizontal apenas interessa as informações de irradiância solar global horizontal, não sendo coletados dados por piranômetros inclinados.

Figura 3.3 – Piranômetro modelo LP02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.2 – Especificação do piranômetro LP02.

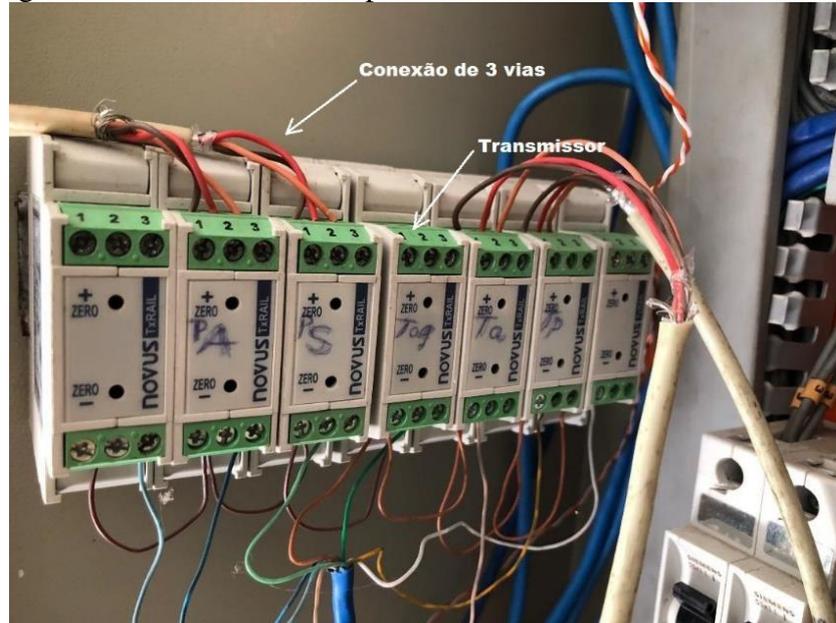
Propriedade	Valor
Classe	C (segunda classe)
Saída	V
Incerteza de calibração	< 1,8%
Sensibilidade nominal	$15 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Tempo de resposta (95%)	18 s
Faixa de medição	0 a 2.000 $\text{W}/\text{m}^2$

Fonte: Adaptado de Hukseflux (2019).

#### **3.1.1.4 Sistema de Aquisição de Dados**

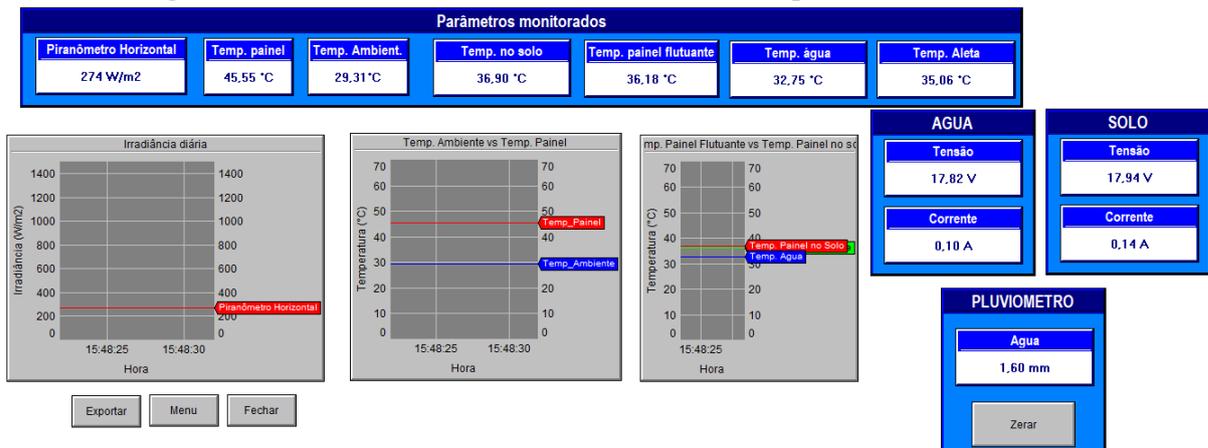
Nos testes realizados no LEA/UFC, os sensores PT100 foram conectados a transmissores de temperatura modelo TxRail com saída programável de 4 – 20 mA (Figura 3.4). Os transmissores de temperatura estão conectados ao sistema supervisorio composto por controladores lógicos programáveis (CLP) que envia os dados para o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) *TeamViewer* presente no computador do LEA/UFC (ALECAR FILHO, 2018). Na Figura 3.5 está representada a tela de interação com o usuário do SAD.

Figura 3.4 – Sensores de temperatura conectados aos transmissores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.5 – Sistema de monitoramento de dados apresentado ao usuário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Calibração

A calibração de temperatura pode ser realizada na maioria dos dispositivos sensores de temperatura imergindo-os em padrões de temperatura conhecidos que são os pontos de equilíbrio de misturas bifásicas sólido-líquido ou líquido-vapor de substâncias puras. A maioria dos dispositivos sensores de temperatura são confiáveis e resistentes, pouco alterando o resultado de suas medições ao longo do tempo de uso. Entretanto, podem ficar sem calibragem devido a vazamentos durante o uso ou contaminação durante a fabricação e devem, portanto, serem verificados para atestarem a confiança nas medições (DUNN, 2005).

A calibração consiste em comparar a saída de um sistema de medição e seus subsistemas contra padrões de precisão conhecidos. Os padrões podem ser outro instrumento que são mantidos especialmente para tarefas de calibração ou alguns meios definidos por normas (BOLTON, 2015).

Sistemas de medição de temperatura podem ser calibrados por imersão em um metal puro ou água. Quando a substância muda de estado de líquido para sólido, a temperatura permanece constante. Seu valor pode ser pesquisado de tabelas e, portanto, uma temperatura de referência precisa pode ser usada para calibração dos sensores. Alternativamente, a temperatura na qual um líquido ferve pode ser usada. No entanto, o ponto de ebulição depende da pressão atmosférica e correções devem ser aplicadas se diferirem do padrão atmosférico de pressão. A calibração também pode ser feita por uso de um termômetro padrão, onde o termômetro padrão e o sensor a ser calibrado são postos em banhos com temperaturas fixas e a medida do sensor é comparada com a medida do termômetro padrão (BOLTON, 2015).

Para uma calibração um conjunto de pontos pode ser usado e, para cada um, a energia térmica média por molécula é bem definida através de condições de equilíbrio existentes entre estados sólidos, líquidos ou gasosos de vários materiais puros. Assim, por exemplo, existe um estado de equilíbrio entre a fase sólida e líquida de uma substância pura quando a taxa de mudança de fase é a mesma em qualquer direção: líquido para sólido e sólido para líquido. Alguns dos pontos de calibração padrão são (JOHNSON, 2014):

- a) Oxigênio: equilíbrio líquido / gasoso;
- b) Água: equilíbrio sólido / líquido;
- c) Água: equilíbrio líquido / gasoso;
- d) Ouro: equilíbrio sólido / líquido.

Uma calibração pode ser expressa por meio duma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração. Em alguns casos, pode consistir duma correção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma incerteza de medição associada (VIM, 2012). Para este trabalho foi feita uma função de calibração para os sensores PT100 testados utilizando os pontos conhecidos de temperatura da água.

Os sensores PT100 foram calibrados considerando o termômetro de mercúrio como padrão. Um multímetro, da marca *Minipa*, modelo ET-2042C, foi também usado para se obter as curvas de resistência  $x$  temperatura dos PT100. Três sensores PT100 foram testados nesse experimento e, para cada sensor testado, repetiu-se o procedimento duas vezes. Os sensores utilizados nesse experimento não foram usados para medições nos módulos FV. Primeiramente cada sensor foi colocado em um copo contendo uma mistura bifásica de gelo e água. Nesse sistema colocou-se o termômetro de mercúrio e a resistência do PT100 foi tomada de 0°C até 25°C, com variações de 0,2°C, acompanhando o lento aquecimento da solução contida no copo até o equilíbrio com o ambiente, conforme a Figura 3.6.

Figura 3.6 – Coleta de dados do PT100 para traçar as curvas de Resistência Elétrica x Temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada PT100 do sistema foi tomado, com o termômetro de mercúrio, dois pontos de temperatura, um em um banho com gelo fundente e outro em uma solução aquecida com temperatura dada pelo termômetro de mercúrio.

Seja  $r_0$  a resistência de um PT100 não normatizado a 0°,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  respectivamente os coeficientes do primeiro e do segundo grau para a Equação 4.1. Considerando  $T_{real}$  a temperatura real do volume de controle que se interessa medir a temperatura,  $T_{sis}$  a temperatura fornecida pelo SAD TeamViewer para a medição de  $T_{real}$ . O SAD toma o

resultado da medição da resistência elétrica considerando um PT100 que atende a norma DIN IEC 751. Assim, sendo  $R$  a resistência elétrica medida pelo sistema, da Equação 3.1 tem-se a Equação 3.3.

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T_{sis} + \alpha_2 T_{sis}^2) = r_0(1 + \beta_1 T_{real} + \beta_2 T_{real}^2) \quad (3.3)$$

Ou seja, o PT100, ao entrar em equilíbrio com um volume de controle a temperatura  $T_{real}$ , fornece um valor de resistência,  $R$ , ao SAD. Logo, usando os valores da norma, o SAD resolve a Equação 3.3 e fornece o valor da temperatura como sendo  $T_{sis}$ .

Conhecendo-se os valores de  $r_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  os coeficientes do PT100 não normatizado, e a temperatura do sistema,  $T_{sis}$ , pode-se determinar a temperatura real,  $T_{real}$ . A Equação 3.3 do segundo grau em  $T_{real}$  em função de  $T_{sis}$  é reescrita na forma da Equação 3.4. Com a Equação 3.4 é possível calibrar os PT100.

$$T_{real} = \frac{-r_0\beta_1 \pm \sqrt{(r_0\beta_1)^2 - 4r_0\beta_2[r_0 - R_0(1 + \alpha_1 T_{sis} + \alpha_2 T_{sis}^2)]}}{2r_0\beta_2} \quad (3.4)$$

## 3.2 Segunda Parte

### 3.2.1 Planilhas de Cálculo

Para a segunda parte foi feita a modelagem do balanço de energia para o módulo FV. O balanço de energia apresentado no Capítulo 2 implementado em planilhas eletrônicas de cálculo do software *Excel*® juntamente com o uso da biblioteca de propriedades termodinâmicas *CoolProp*®. O componente *Solver* do *Excel*® permite resolver problemas de otimização no qual o valor ideal de uma célula da planilha específica deve ser calculado com base nas restrições previstas em outras células. Um problema de otimização é aquele onde se procura determinar os valores extremos de uma função, isto é, o maior ou o menor valor que uma função pode assumir em um dado intervalo. Um problema de otimização pode ser também aquele onde se quer determinar as raízes de uma função dentro de um intervalo. Os Gráficos de resultados foram feitos utilizando-se planilhas do *LibreOffice*®.

O *Solver* do Excel usa o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) para resolver problemas de otimização. O algoritmo GRG proposto por Ladson (1978) trata da solução de problemas de otimização não lineares nos quais a função objetivo pode ter

qualquer forma de não linearidades, contanto que essa função seja diferenciável. O algoritmo trata de problemas gerais de otimização restrita da forma:

Minimizar  $Z(X)$ , sujeito a:

$$\begin{cases} 0 \leq g_i(X) \leq ub(i), \text{ onde } i = 1, m \\ lb(i) < X_i < ub(i), i = m + 1, m + n \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde  $X$  é um vetor de  $n$  variáveis. Assume-se que as funções  $Z$  e  $g_i$  são diferenciáveis. De acordo com Ladson (1978), o problema é resolvido minimizando uma sequência de problemas reduzidos, nos quais a função objetiva reduzida  $F(x)$  possui um vetor  $x$  (um subconjunto de  $X$ ) de variáveis não básicas. O sistema itera utilizando uma pesquisa unidimensional por meio de uma variação do método de Newton.

As equações representativas do modelo do balanço de energia são não lineares e as incógnitas presentes nas equações da Seção 2.4 são implícitas e, portanto, a solução das equações requer o procedimento numérico iterativo realizado pelo *Solver* para encontrar o zero da função. Para o procedimento iterativo alcançar uma solução razoável definiu-se um valor de tolerância para o resíduo da ordem de  $10^{-6}$ .

A função objetivo do *Solver* é a Equação 2.27. Para simular a temperatura do módulo FV através das planilhas apenas a temperatura da célula,  $T_{cell}$ , a temperatura da superfície superior,  $T_v$ , e a temperatura da superfície inferior,  $T_b$ , são as incógnitas que variam durante o processo de iteração, essas incógnitas e suas respectivas equações são mostradas na Tabela 3.3. As restrições feitas para resolução das equações do balanço de energia estão sintetizadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.3– Incógnitas do processo iterativo das planilhas de cálculo do balanço energético.

<b>Incógnita</b>	<b>Equação</b>
$T_v$	Equação 2.21
$T_b$	Equação 2.24
$T_{cell}$	Equação 2.27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.4– Restrições do processo iterativo das planilhas de cálculo do balanço energético.

Restrição	Equação
$T_v$ em função de $T_{cell}$	Equação 2.21
$T_b$ em função de $T_{cell}$	Equação 2.27

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Propriedades Termofísicas e Geométricas do Balanço de Energia

Para o cálculo dos coeficientes convectivos, foi considerado que a velocidade do vento no local é nula. Assim, segundo Incropera (2008), para convecção natural entre a placa superior aquecida e o ar vale a Equação 3.6 ou 3.7.

$$h_v = 0,54 \frac{k}{L_p} Ra_L^{\frac{1}{4}}, \text{ quando } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (3.6)$$

$$h_v = 0,15 \frac{k}{L_p} Ra_L^{\frac{1}{3}}, \text{ quando } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \quad (3.7)$$

Em que  $L_p$  (m) é um comprimento característico do módulo FV, definido pela Equação 3.8, onde  $P$  (m) é o perímetro do módulo FV.

$$L_p = \frac{A}{P} \quad (3.8)$$

$Ra_L$  é um parâmetro adimensional conhecido como *número de Rayleigh*, dado pela Equação 3.9.

$$Ra_L = \frac{g\gamma\rho c_p(T_v - T_{\infty 1})L_p^3}{\nu k} \quad (3.9)$$

Em que,  $g$  (m/s<sup>2</sup>) é a gravidade local,  $\gamma$  (1/K) é o coeficiente de expansão volumétrica térmica,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) é a densidade do ar,  $c_p$  (J/kg.K) é o calor específico a pressão constante e  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) é a viscosidade cinemática.

Segundo Andrade (2008), a temperatura do céu,  $T_{céu}$ , e o coeficiente convectivo entre o ar,  $h_b$ , a superfície inferior, são dados, respectivamente, pelas Equações 3.10 e 3.11.

$$T_{céu} = T_{\infty 1} \left[ 0,8 + \frac{T_{orv} - 273}{250} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.10)$$

$$h_b = 0,75h_v \quad (3.11)$$

Onde  $T_{orv}$  é a temperatura de orvalho para as condições ambientais do local. Durante o período da pesquisa, segundo dado Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a umidade média para a cidade de Fortaleza, no período da pesquisa, foi de 84,43%, valor que é usado para o cálculo da temperatura de orvalho utilizando a biblioteca para cálculos térmicos *CoolProp*®.

A temperatura das telhas,  $T_{telha}$ , foi definida como sendo a temperatura do ar, dada pela Equação 3.12.

$$T_{telha} = T_{\infty 1} \quad (3.12)$$

Os parâmetros geométricos de espessuras das camadas estruturais do módulo FV e os respectivos valores das condutividades térmicas, referentes às Equações da Seção 3.4 estão definidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5–Valores de espessuras e condutividades térmicas para Equações da Seção 2.4.

<b>Material</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Condutividade Térmica (W/mK)</b>
Vidro	$L_v = 3,2$	$k_v = 1,80$
<i>EVA,1</i>	$L_{EVA,1} = 1,0$	$k_{EVA,1} = 0,35$
<i>EVA,2</i>	$L_{EVA,2} = 0,5$	$k_{EVA,2} = 0,35$
<i>Tedlar</i> ®	$L_{ted} = 0,2$	$k_{ted} = 0,24$

Fonte: Adaptado de Ruschel *et al* (2015) e Guarracino *et al* (2016).

Os valores de emissividade e os fatores de forma para as Equações da Seção 3.4 são definidos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6– Valores de emissividade e fatores de forma para as Equações da Seção 2.4.

<b>Incógnita</b>	<b>Valor</b>
$\varepsilon_v$	0,95
$\varepsilon_{ted}$	0,90
$F_{s-céu}$	1,0
$F_{i-telha}$	1,0

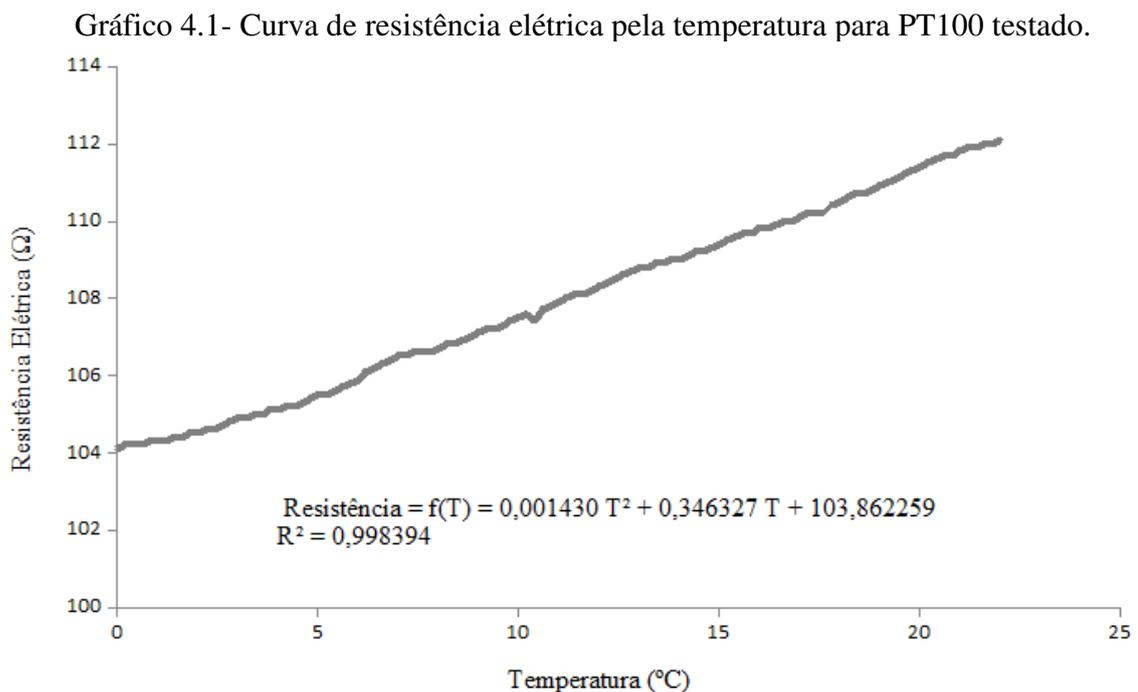
Fonte: Incropera (2008) e Lee e Tay (2011).

Após as simulações feitas os resultados fornecidos pelas planilhas foram então comparados com as medições obtidas para validação do balanço de energia e das planilhas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Calibração dos Sensores PT100

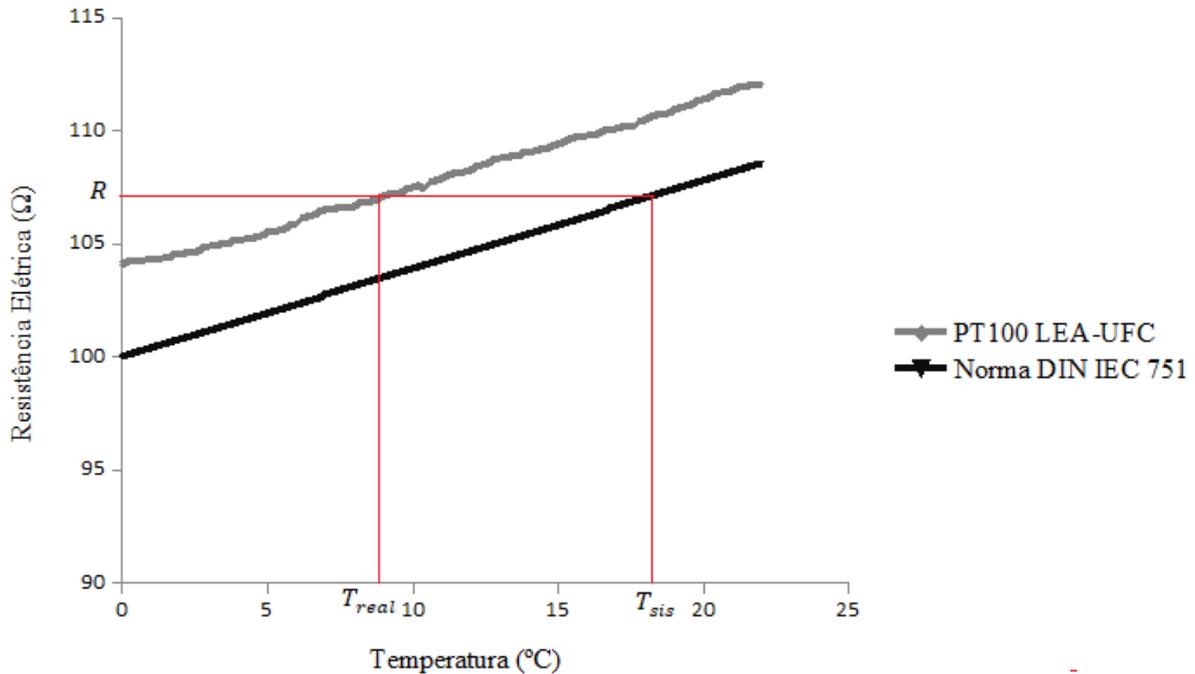
Primeiramente, calibraram-se os sensores PT100 utilizados neste trabalho. O primeiro teste feito para se encontrar as curvas do PT100 de resistência  $\times$  temperatura, conforme mencionado na *Seção 3.1.2*. Usou-se o multímetro e o termômetro de mercúrio, mostrados na Figura 3.6. As curvas mostram que os PT100 utilizados não seguem a norma DIN IEC 751. Entretanto, os sensores são lineares, têm tendência e podem ser calibrados para o uso na pesquisa. O Gráfico 4.1 mostra a curva de um dos PT100 testados e a equação correspondente à regressão quadrática, feitos no *LibreOffice®*. O eixo  $x$  é a temperatura, em  $^{\circ}\text{C}$ , o eixo  $y$  representa a resistência elétrica do PT100, em  $\Omega$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 4.1 mostra que diferentemente da norma, a resistência elétrica para o PT100 a  $0,0^{\circ}\text{C}$  é próxima de  $103,9\Omega$ , contra os  $100,0\Omega$  definidos na norma. Entretanto, a linearidade e a tendência da curva, característica dos sensores PT100, citada na *Seção 3.1.1.1*, é comprovada. Do Gráfico 4.1 tem-se os valores de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $r_0$ , para a Equação 3.3, que foram obtidos por regressão quadrática. Os valores são, para  $\beta_1 = 3,3345 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $\beta_2 = 1,37682 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$  e  $r_0 = 103,86\Omega$ . Em comparação com a norma DIN IEC 751, para o PT100 testado, tem-se o Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 – Curva de resistência pela temperatura para PT100 testado em comparação com a norma DIN IEC 751.



Para este trabalho as temperaturas de operação do módulo FV estão entre 0°C e 60°C. Sendo assim, para o sensor PT100 que atende a norma DIN IEC 751 tem-se que a sensibilidade, dada pela Equação 3.2, está entre os valores 0,38384 Ω/°C e 0,39080 Ω/°C. Para o PT100 testado a sensibilidade está entre os valores 0,34633 Ω/°C e 0,51792 Ω/°C. Sendo que para o PT100 que segue a norma a sensibilidade diminui com o aumento da temperatura, enquanto no PT100 testado a sensibilidade aumenta com o aumento da temperatura.

O SAD toma o resultado da medição da resistência elétrica considerando um PT100 que atende a norma DIN IEC 751, como já mencionado na *Seção 3.1.2*. Ao se traçar uma curva paralela ao eixo das ordenadas (Temperatura), conforme o Gráfico 4.2, percebe-se que, como a curva do PT100 real está acima da curva do PT100 normatizado, a temperatura fornecida pelo SAD está acima da temperatura real do volume de controle.

Como a Equação 3.4 têm duas raízes, a escolha da raiz foi feita observando-se as curvas do Gráfico 4.2, onde se percebe que  $T_{real}$  é menor que  $T_{sis}$  e maior que zero. Assim, a raiz negativa foi desprezada. Logo, usando-se a Equação 3.4 para valores de temperatura do SAD ( $T_{sis}$ ) tem-se a Tabela 4.1 com os respectivos valores da temperatura real ( $T_{real}$ ).

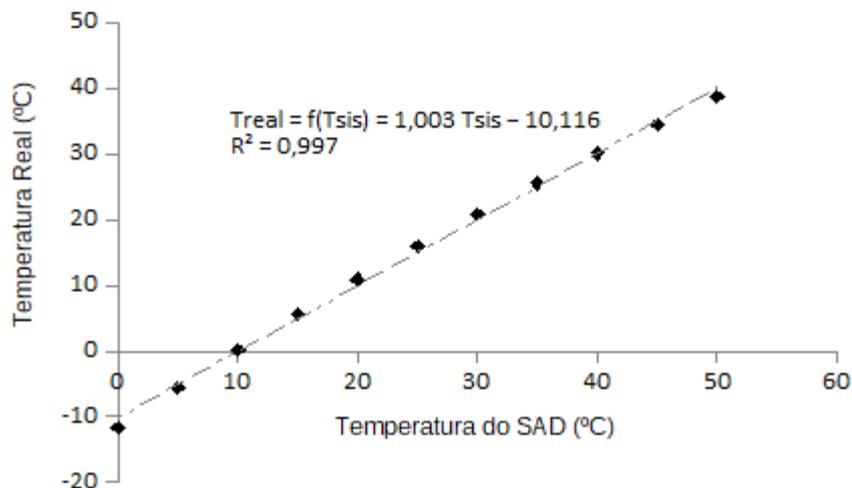
Tabela 4.1 – Cálculo de  $T_{real}(^{\circ}C)$  a partir dos valores de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $r_0$  e  $T_{sis}(^{\circ}C)$ .

$T_{sis}(^{\circ}C)$	$T_{real}(^{\circ}C)$
0	-11,72
5	-5,65
10	0,12
15	5,61
20	10,86
25	15,91
30	20,77
35	25,46
40	30,00
45	34,40
50	38,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da Tabela 4.1 tem-se o Gráfico 4.3, que mostra a linearidade entre a temperatura real e a temperatura medida pelo SAD. O Gráfico 4.3 contém a equação de regressão linear, onde  $T_{real}$  é determinado a partir de  $T_{sis}$ . Percebe-se que a regressão linear representa de forma satisfatória a relação entre as temperaturas do SAD e a real ( $R^2 = 0,997$ ). Este resultado foi aplicado aos PT100 utilizados no sistema de medição, onde apenas dois pontos de temperatura foram tomados, e as curvas de calibração para cada PT100 foram obtidas, possibilitando a correção da temperatura do SAD. Foi considerando que entre as temperaturas do SAD e as temperaturas reais existe uma relação linear, daí a necessidade de apenas dois pontos para a calibração. Do Gráfico 4.3 tem-se a relação linear que correlaciona  $T_{real}$  e  $T_{sis}$ , dada na Equação 4.1.

Gráfico 4.3 – Relação entre a temperatura fornecida pelo SAD e a temperatura real.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$T_{real} = 1,003T_{sis} - 10,126 \quad (4.1)$$

Para o PT100 colocado na superfície inferior do módulo FV, o termômetro de mercúrio apontou as temperaturas das soluções de teste de 0°C para o gelo fundente e de 40,0°C para a solução aquecida. Para as respectivas soluções de gelo fundente e solução aquecida o SAD marcou para o PT100 os valores de 5,7°C e de 43,1°C. Definindo a temperatura corrigida para o módulo FV como  $T_{b,real}$ , e a temperatura do SAD para o módulo FV como sendo  $T_{b,sis}$ , tem-se a Equação 4.2a.

$$T_{b,real} = \frac{40,0}{37,4}(T_{b,sis} - 5,7) \quad (4.2a)$$

Após alguns ajustes a Equação 4.2a pode também ser escrita na forma da Equação 4.2b.

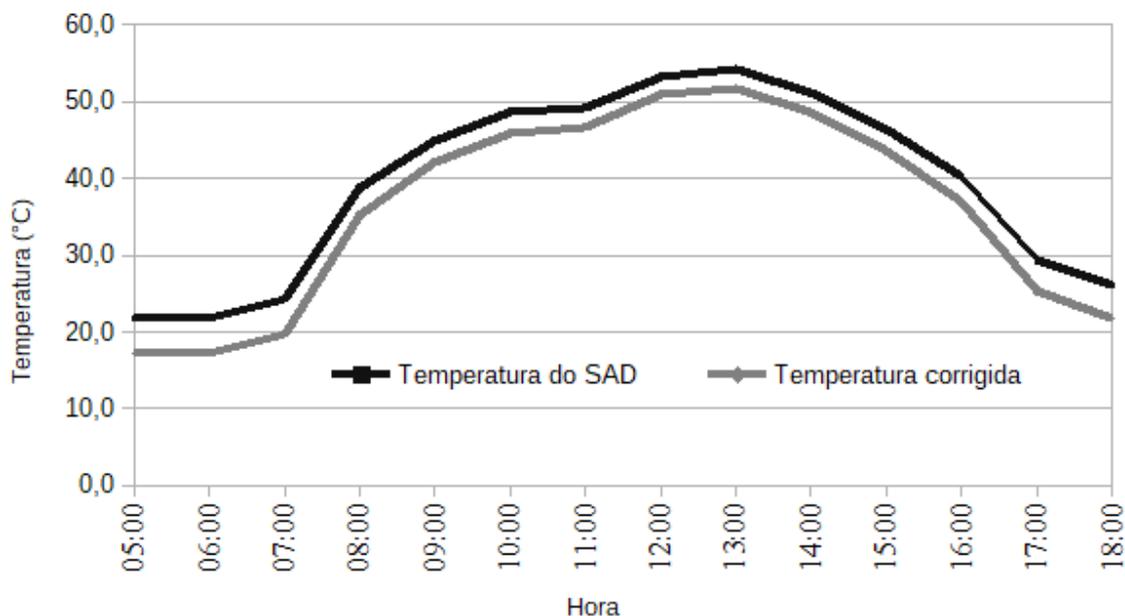
$$T_{b,real} = 1,070T_{b,sis} - 6,096 \quad (4.2b)$$

Para observar o resultado da Equação de calibração 4.2a foi escolhido o dia 17/03/2019, dia com maior irradiação média no período da pesquisa, 7148,82 Wh/m<sup>2</sup>. O Gráfico 4.4 mostra a comparação entre a temperatura medida pelo sistema e a temperatura corrigida, para o PT100 colocado no módulo FV, para o dia escolhido.

É possível perceber no Gráfico 4.4 que a temperatura medida pelo sistema está acima da temperatura real, o que comprova a tese do Gráfico 4.2. A partir do Gráfico 4.4, elabora-se a Tabela 4.2, que mostra as medições de temperatura ao longo do dia, a temperatura corrigida, a diferença entre as temperaturas medida e corrigida e o erro da temperatura medida pelo sistema em relação à temperatura corrigida.

As curvas do PT100 testado e do PT100 da norma tendem a se aproximar com o aumento da temperatura, como mostrado no Gráfico 4.2. A Tabela 4.2 evidencia esse fato. Com o aumento da temperatura o erro relativo da temperatura medida em relação à temperatura corrigida diminui, sendo o menor erro relativo de 4,5% quando a temperatura corrigida foi a maior, dada por 51,8°C, as 13h:00min.

Gráfico 4.4 – Comparação entre a temperatura medida pelo SAD e a temperatura corrigida para o módulo FV no telhado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.2 – Resultado da correção das temperaturas medidas no módulo FV para o dia 17/03/2019.

Hora	Temperatura do SAD(°C)	Temperatura Corrigida (°C)	Diferença entre Temperatura do SADe a Corrigida	Erro Relativo à Temperatura Corrigida (°C/°C)
05h00min	21,7	17,1	4,6	26,7%
06h00min	21,9	17,3	4,6	26,5%
07h00min	24,2	19,8	4,4	22,3%
08h00min	38,6	35,2	3,4	9,7%
09h00min	44,9	42,0	3,0	7,1%
10h00min	48,6	45,9	2,7	5,9%
11h00min	49,2	46,5	2,7	5,7%
12h00min	53,3	50,9	2,4	4,7%
13h00min	54,1	51,8	2,3	4,5%
14h00min	51,2	48,7	2,5	5,2%
15h00min	46,5	43,6	2,9	6,6%
16h00min	40,3	37,0	3,3	8,9%
17h00min	29,3	25,3	4,1	16,0%
18h00min	26,1	21,8	4,3	19,6%

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Comportamento Térmico do Módulo FV Instalado no Telhado

Os dados de temperatura e irradiação solar diária utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de aferições contínuas a cada minuto no período de 09/02/2019 a 16/06/2019,

com exceção de alguns dias em que foi realizado desconexão de componentes para ajustes e manutenção. A faixa horária de análise utilizada nos Gráficos a serem apresentados está entre 05h:00min e 18h:00min, antes das 05h:00min e após 18h:00min as irradiações são nulas.

As medições de irradiância, feitas pelo piranômetro no mesmo plano horizontal do módulo FV para o período em estudo foram distribuídos em três níveis de irradiação diária, conforme representados na Tabela 4.3.

O Gráfico 4.5 apresenta as curvas da média de irradiação solar diária para cada faixa de irradiação da Tabela 4.3..

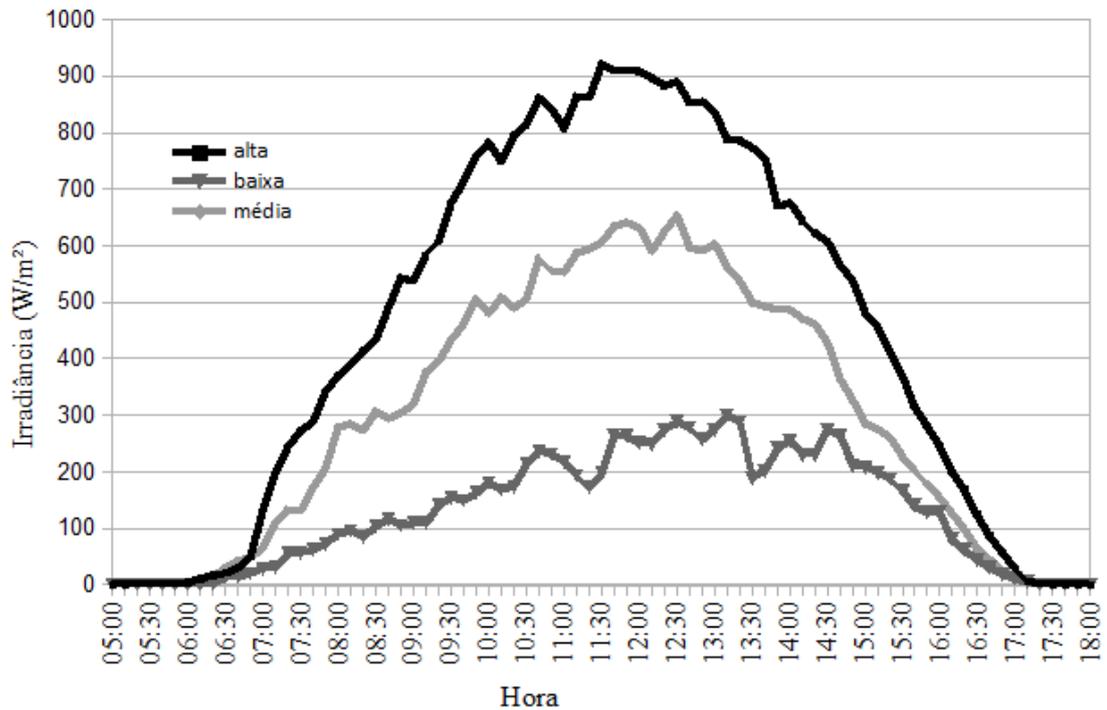
Tabela 4.3 – Número de dias por Faixa de Irradiação.

Nível de Irradiação	Irradiação diária	Número de Dias
Baixo	0 a 2500 Wh/m <sup>2</sup>	18
Médio	2501 a 5000 Wh/m <sup>2</sup>	55
Alto	5001 Wh/m <sup>2</sup> ou mais	36

Fonte: Elaborado pelo autor.

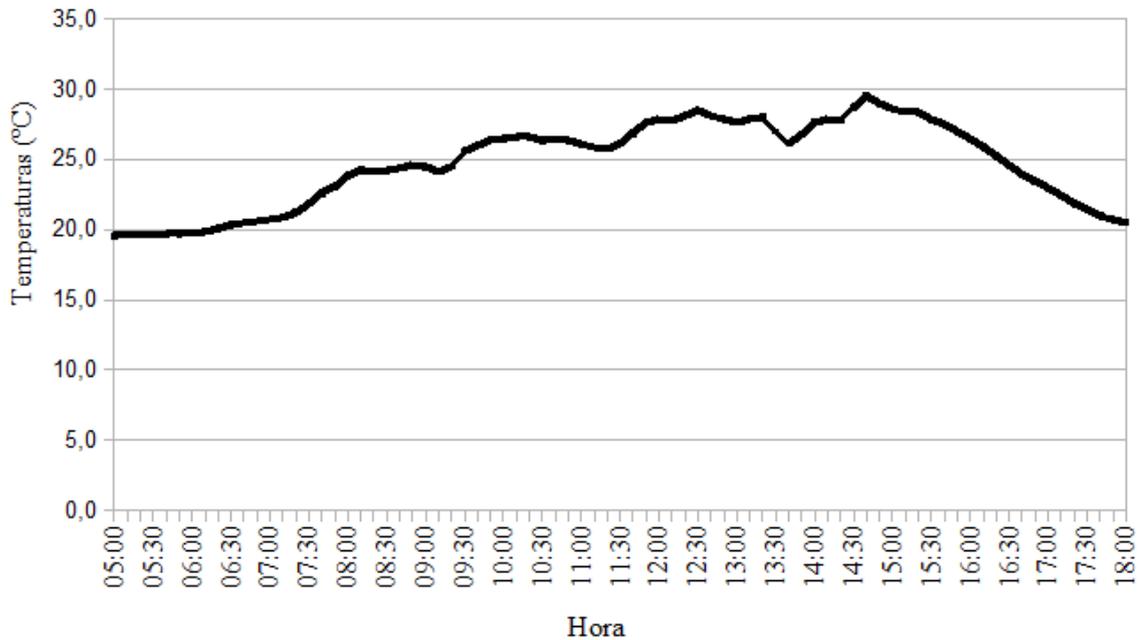
Os dados de temperaturas do módulo FV foram importados para planilhas de cálculo e em seguida aplicou-se a Equação 4.2a para correção das temperaturas. O Gráfico 4.6 mostra as medições de temperatura para os dias de baixa irradiância.

Gráfico 4.5 – Curvas de Irradiância para os níveis definidos na Tabela 4.3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

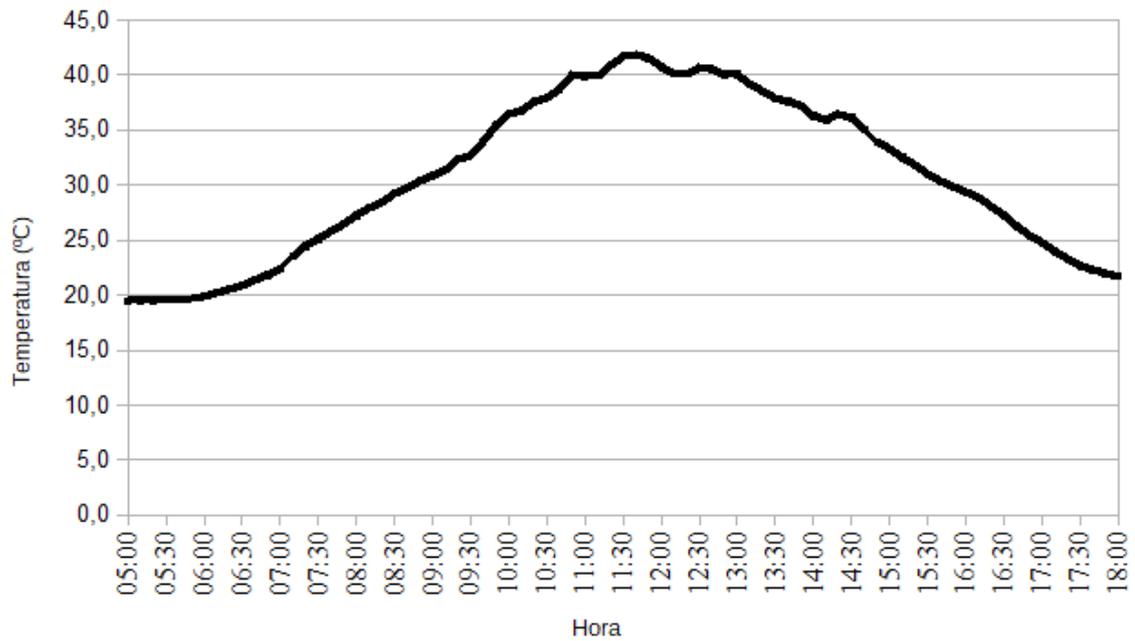
Gráfico 4.6 – Medições de temperatura para o módulo FV para os dias de baixa irradiação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga, para os dias de média irradiação, as temperaturas do módulo FV foram plotadas no Gráfico 4.7.

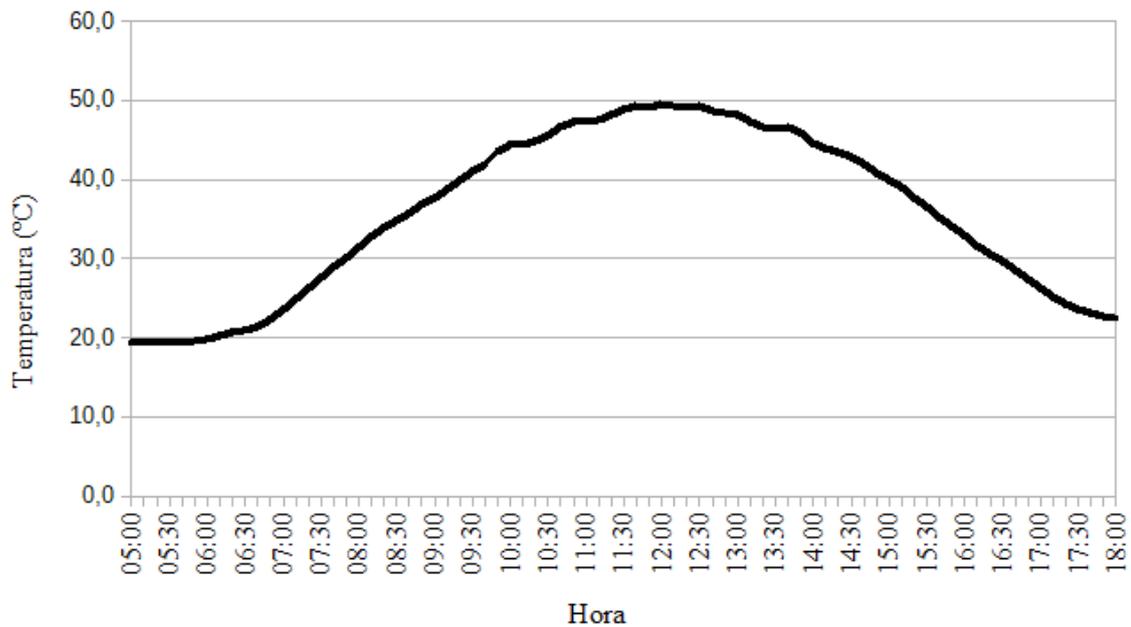
Gráfico 4.7- Medições de temperatura para o módulo FV para os dias de média irradiação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os dias de alta irradiância o Gráfico 4.8 mostra as curvas de temperatura do módulo FV.

Gráfico 4.8- Medições de temperatura do módulo FV para os dias de alta irradiação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, os Gráficos 4.7 e 4.8, respectivamente para os dias de média e alta irradiância, apresentam a uma maior temperatura de operação próximo de 12h:00min, onde a

irradiação é maior, como pode ser confrontado com o Gráfico 4.5 de irradiação diária.

A partir do Gráfico 4.6 observa-se que em dias de baixa irradiação, as maiores temperaturas ocorriam após as 14h:00min. Isso se deve ao fato que os dias de baixa irradiação foram em dias chuvosos durante o período entre 06h:00min e 12h:00min, comuns na quadra invernal do NE.

### 4.3 Simulações do Balanço Energético para o Módulo FV.

Para as simulações foram considerados apenas os dias de média e de alta irradiação, conforme definidos na Tabela 4.3. Os dias de baixa irradiação foram excluídos na simulação por serem dias de baixa geração de energia elétrica e por operarem em temperaturas próximas das STC. As temperaturas no módulo são tomadas no centro da superfície inferior, logo se simulou a temperatura  $T_b$ , dada pela Equação 2.24. A Tabela 4.4 mostra os valores das resistências térmicas para os componentes estruturais do módulo FV.

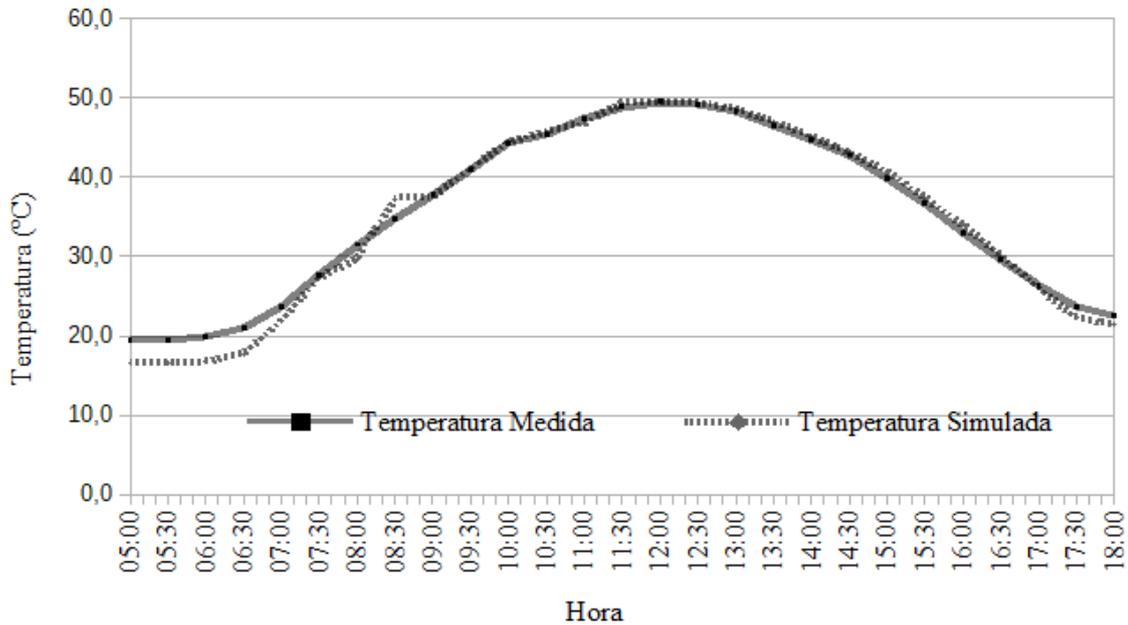
Os resultados das simulações foram então comparados com as temperaturas medidas e corrigidas do módulo FV. Para o módulo FV o Gráfico 4.9 mostra as curvas das medições de temperatura e a curva da simulação para os dias de alta irradiação. O Gráfico 4.10, de modo análogo, mostra as curvas das medições de temperatura e a curva da simulação para os dias de média irradiação.

Tabela 4.4–Valores das resistências térmicas para os componentes do módulo FV.

<b>Material</b>	<b>Resistência Térmica (K/W)</b>
Vidro	$R_v = 0,010$
<i>EVA,1</i>	$R_{EVA,1} = 0,016$
<i>EVA,2</i>	$R_{EVA,2} = 0,08$
<i>Tedlar®</i>	$R_{ted} = 0,05$

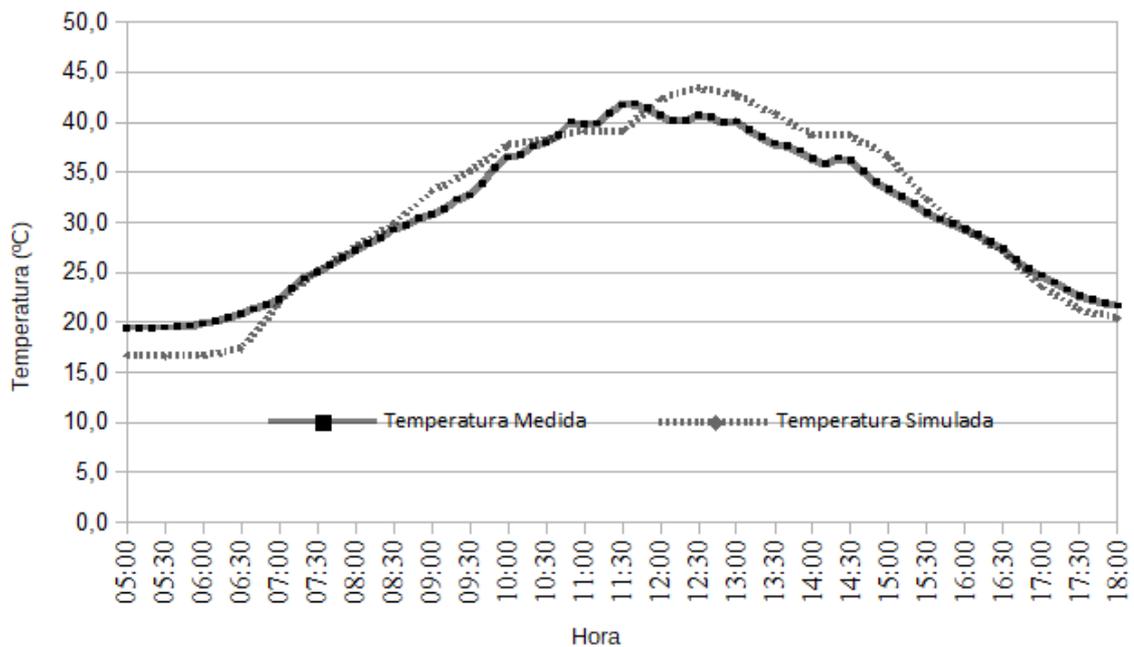
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4.9 - Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas para o módulo FV nos dias de alta irradiação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4.12 - Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas para o módulo FV nos dias de média irradiação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se dos Gráficos 4.9 e 4.10 que a simulação conseguiu prever o comportamento das curvas de medições de temperatura, tanto para os dias de média irradiação quanto para os de alta irradiação, sendo mais precisa para os dias de alta irradiação. As

temperaturas mais altas, tanto nas temperaturas medidas quanto nas simuladas está próximo do meio-dia, horário de maior irradiância, conforme o Gráfico 4.6.

A partir dos Gráficos 4.9 e 4.10 elaboram-se as Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente, para os dias de alta irradiância e para os de média irradiância. As tabelas mostram o valor da medição da temperatura do módulo de hora em hora, o resultado do valor simulado para a temperatura, a diferença entre a temperatura medida e simulada e o erro relativo em relação à temperatura medida.

Tabela 4.5 – Resultados das simulações para os dias de alta irradiância

<b>Hora</b>	<b>Temperatura Medida do Módulo (°C)</b>	<b>Temperatura do Módulo Simulada (°C)</b>	<b>Diferença Entre a Temperatura Medida e a Simulada (°C)</b>	<b>Erro Relativo em Relação à Temperatura Medida (°C/°C)</b>
05:00	19,4	16,6	2,8	14,6%
06:00	19,8	16,7	3,1	15,8%
07:00	23,7	21,8	1,8	7,8%
08:00	31,5	29,7	1,8	5,9%
09:00	37,8	37,5	0,2	0,7%
10:00	44,3	44,4	-0,1	0,3%
11:00	47,3	46,7	0,6	1,3%
12:00	49,5	49,4	0,1	0,1%
13:00	48,2	48,6	-0,4	0,8%
14:00	44,7	45,2	-0,5	1,1%
15:00	39,9	40,8	-0,9	2,3%
16:00	32,9	34,1	-1,2	3,7%
17:00	26,3	26,1	0,2	0,8%
18:00	22,6	21,4	1,2	5,2%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.6 – Resultados das simulações para os dias de média irradiação.

Hora	Temperatura Medida do Módulo (°C)	Temperatura do Módulo Simulada (°C)	Diferença Entre a Temperatura Medida e a Simulada (°C)	Erro Relativo em Relação à Temperatura Medida (°C/°C)
05:00	19,5	16,6	2,9	14,7%
06:00	19,9	16,7	3,3	16,3%
07:00	22,4	21,8	0,5	2,5%
08:00	27,2	27,5	-0,3	1,2%
09:00	30,8	33,0	-2,2	7,3%
10:00	36,5	37,7	-1,2	3,2%
11:00	39,9	39,1	0,8	2,0%
12:00	40,8	42,3	-1,5	3,7%
13:00	40,1	42,7	-2,6	6,5%
14:00	36,4	38,7	-2,4	6,5%
15:00	33,3	36,5	-3,2	9,6%
16:00	29,3	29,3	0,0	0,1%
17:00	24,7	23,6	1,2	4,8%
18:00	21,7	20,4	1,3	6,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os maiores erros relativos à temperatura medida ocorreram no começo e no fim do dia, conforme se pode constatar nas Tabelas 4.5 e 4.6, com erros maiores que 10%. Isso ocorre devido ao fato de que há baixa irradiância nesses períodos. Assim, a Equação 2.27, para esses períodos, tem seu termo de entrada de energia minimizado e a solução encontrada pelo *Solver* torna-se um valor bem menor do que a temperatura medida. Entretanto, o comportamento da solução segue o comportamento da curva medida, onde para esses mesmos períodos, a temperatura tem quedas acentuadas em comparação com as temperaturas de pico alcançadas próximas do meio dia.

Entre 07h:00min e 18h:00min ambas as tabelas mostram que os erros relativos à temperatura medida foram menores que 10%, sendo que, para os dias de alta irradiação, o menor erro relativo foi obtido 12h:00min com valor de 0,1%. Para os dias de média irradiação o menor erro relativo à temperatura medida foi de 0,1%, as 16h:00min.

As Equações 2.21, 2.24 e 2.27 calculam, respectivamente, a temperatura na superfície superior,  $T_p$ , a temperatura na superfície inferior,  $T_b$ , e a temperatura da célula FV,  $T_{cell}$ . A Tabela 4.7 mostra as temperaturas simuladas para os dias de alta irradiação e a Tabela 4.8 mostra as temperaturas para um dia de média irradiação.

Tabela 4.7 - Temperaturas das superfícies para os dias de alta irradiação.

Hora	Temperatura do Vidro (°C)	Diferença Relativa da Temperatura do Vidro em Relação à Temperatura da Célula FV (°C/°C)	Temperatura da Base (°C)	Diferença Relativa da Temperatura da Base em Relação à Temperatura da Célula FV (°C/°C)	Temperatura da Célula FV (°C)
05:00	16,4	0,7%	16,6	0,3%	16,5
06:00	16,5	0,7%	16,7	0,3%	16,6
07:00	21,6	0,9%	21,8	0,0%	21,8
08:00	29,4	1,1%	29,7	0,2%	29,7
09:00	37,2	1,1%	37,5	0,3%	37,6
10:00	44,0	1,5%	44,4	0,5%	44,6
11:00	46,3	1,5%	46,7	0,5%	47,0
12:00	49,0	1,5%	49,4	0,5%	49,7
13:00	48,2	1,5%	48,6	0,5%	48,9
14:00	44,8	1,3%	45,2	0,4%	45,4
15:00	40,4	1,2%	40,8	0,3%	40,9
16:00	33,8	0,9%	34,1	0,2%	34,2
17:00	25,9	0,6%	26,1	0,1%	26,0
18:00	21,3	0,5%	21,4	0,2%	21,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.8 - Temperaturas das superfícies para os dias de média irradiação.

Hora	Temperatura do Vidro (°C)	Diferença Relativa da Temperatura do Vidro em Relação à Temperatura da Célula FV (°C/°C)	Temperatura da Base (°C)	Diferença Relativa da Temperatura da Base em Relação à Temperatura da Célula FV (°C/°C)	Temperatura da Célula FV (°C)
05:00	16,5	0,7%	16,6	0,3%	16,6
06:00	16,5	0,7%	16,7	0,4%	16,6
07:00	21,6	1,0%	21,8	0,0%	21,8
08:00	27,3	1,2%	27,5	0,2%	27,6
09:00	32,7	1,3%	33,0	0,3%	33,1
10:00	37,3	1,4%	37,7	0,4%	37,8
11:00	38,7	1,4%	39,1	0,4%	39,2
12:00	41,9	1,4%	42,3	0,4%	42,5
13:00	42,3	1,4%	42,7	0,5%	42,9
14:00	38,4	1,3%	38,7	0,4%	38,9
15:00	36,2	1,2%	36,5	0,3%	36,7
16:00	29,1	0,9%	29,3	0,0%	29,3
17:00	23,4	0,6%	23,6	0,1%	23,5
18:00	20,2	0,5%	20,4	0,2%	20,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das Tabelas 4.6 e 4.7 mostram que o módulo FV opera praticamente isotermicamente, já que as diferenças entre as temperaturas do vidro, da célula FV e da superfície inferior se diferem pouco entre si, com diferenças entre a temperatura da célula

inferiores a 1,5% entre as superfícies e a célula FV. Assim, para uma nova pesquisa com o módulo testado, pode-se realizar um balanço térmico simplificado, considerando todo o módulo à mesma temperatura.

As temperaturas no vidro são menores devido a três fatores: o coeficiente convectivo entre o ar e o vidro é maior que o coeficiente convectivo entre o ar e a base; a emissividade do vidro é maior que a emissividade da base; a resistência térmica entre o vidro e a célula FV é maior que a resistência térmica entre a célula FV e a base, conforme se nota da Tabela 4.4.

## 5 CONCLUSÃO

Os sensores PT100 foram calibrados com uso do termômetro de mercúrio, tido como termômetro padrão. Foi desenvolvida uma metodologia para calibração dos sensores PT100, utilizando o termômetro de mercúrio e o multímetro para obtenção das curvas de resistência elétrica x temperatura do PT100 testado. Com as curvas do PT100 testado foi feita uma comparação com as curvas de um PT100 normatizado e, assim, foi obtida uma equação de correção para o PT100 testado. A resistência do PT100 testado foi, em 0°C, de 103,9Ω. Para o dia 17/03/2019, dia de maior irradiação usado para exemplificar a metodologia de correção, os erros relativos entre os dados colhidos e a medição diminuía com a temperatura, sendo o menor valor de 4,5% as 13h:00min.

Após a calibração do PT100 os dados medidos durante o período da pesquisa foram corrigidos e utilizados para a análise do comportamento térmico do módulo FV e as curvas de temperatura do módulo foram elaboradas. Os resultados mostram que as maiores temperaturas do módulo são alcançadas no período próximo ao meio-dia, horário em que há um pico de irradiação. Para os dias de máxima irradiação as temperaturas máximas são de 49,5°C, em média. Para os dias de média e baixa irradiação as temperaturas máximas alcançadas foram, respectivamente, 41,7°C e 29,5°C, em média. Foi constatado que as temperaturas se distanciam das temperaturas de teste para os módulos FV encontrados comercialmente, principalmente se tratando das condições climáticas do NE.

Após a análise do comportamento térmico do módulo FV, os resultados das medições foram comparados com os resultados simulados nas planilhas de cálculo elaboradas com a implementação do balanço de energia. Os resultados da comparação mostram que o balanço térmico implementado consegue prever o comportamento gráfico das medições de temperatura, com pico ocorrendo no período próximo do meio dia. Para os horários entre 07h:00min e 18h:00min os erros relativos entre as temperaturas simuladas e as temperaturas medidas são inferiores a 10%. As planilhas foram validadas e poderão servir para estudos posteriores no LEA/UFC para auxílio nas novas pesquisas. O modelo desenvolvido para o módulo FV mostrou-se representativo. Além disso, os resultados da simulação mostram que o módulo opera praticamente isotermicamente, já que foi constatada uma pequena diferença de temperatura entre as temperaturas da superfície superior, da célula FV e da superfície inferior.

## 6 REFERÊNCIAS

ALENCAR FILHO, Alexandre Atílio Ramos De. **Avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

ANDRADE, A. C. **Análise e Simulação de Temperaturas em Módulos Fotovoltaicos**. Tese – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC – UFRGS, 2008.

BANNISTER, B.R; WHITEHEAD, D.G. **Instrumentation: Transducers and Interfacing**. 2. Ed. Londres: Chapman and Mall. 1991. 154 p.

BOLTON, William. **Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering**. 6. Ed. Pearson, 2015.

CANTOR, Guillermo Andrés Rodríguez. **Influência dos Fatores Climáticos no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Regiões de Clima Tropical**. Dissertação. UFPB/CEAE, 2017.

DA SILVA, Jarlan Soares. **Análise da Influência da Temperatura na Geração de Energia Utilizando Painéis Fotovoltaicos Monocristalinos e Policristalinos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pampa, 2017.

DIMRI, Neha; TIWARI, Arvind; TIWARI, G N. **Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector**. Energy Conversion and Management, v. 146, p. 68–77, 2017.

DUNN, Willian C. **Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control**. 1. Ed. McGraw-Hill, 2005.

GUARRACINO, Ilaria; MELLOR, Alexander; EKINS-DAUKES, Nicholas J.; MARKIDES, Christos N. **Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors**. Applied Thermal Engineering, v. 101, p. 778–795, 2016.

HUIDE, Fu; XUXIN, Zhao; LEI, Ma; TAO, Zhang; QIXING, Wu; HONGYUAN, Sun. A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems. **Energy Conversion and Management**, v. 140, n. 2017, p. 1–13, 2017.

HUKSEFLUX. **LP02 pyranometer**. 2018. Disponível em: <<https://www.hukseflux.com/products/solar-radiation-sensors/pyranometers/lp02-pyranometer>>. Acesso em: 23 mai. 2019.

IEA. **World Energy Outlook 2018**. International Energy Agency, 2018.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, p. 657. ISBN: 9788521615842.

INMET. **Dados Históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso em 12 de jun. 2019

JOHNSON, C. **Process Control Instrumentation Technology**. 8. Ed. Harlow: Perarson. 2014. 680 p.

KREITH, Frank. BOHN, Mark S. **Princípios de Transferência de Calor**. 6. Ed. Thomson Learning, 2003.

KYOCERA SOLAR. **Solartec KS20T**. Disponível em: <<https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/Solartec-KS20.pdf>>. Acesso em: 24 mai. 2018.

LADSON, L. S. WAREN, A. D. JAIN. A. RATNER, M. **Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming**. 1978.

LEE, Yixian. TAY, Andrew. **Finite Element Thermal Analysis of a Photovoltaic Module**. International Conference on Materials for Advanced Technologies. 2011

LIBREOFFICE. **LibreOffice Calc**. 2019. Disponível em: <<https://pt-br.libreoffice.org/descubra/calc/>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

MOHRING, H.D., STELLBOGEN, D., SCHÄFFLER, R., OELTING, S.,

GEGENWART, R., KONTTINEN, P., CARLSSON, T., CENDAGORTA, M., HERMANN, W. **Outdoor performance of polycrystalline thin film PV modules in different European climates**. In: PROCEEDINGS OF 19TH EC PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 2004, Paris.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. Estudo Técnico. Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados, 2017.

NRG SYSTEMS. **Specifications NRG #40C Anemometer**. 2010. Disponível em: <<https://www.nrgsystems.com/products/met-sensors/anemometers/detail/40c-anemometer>>. Acesso em: 21 mai. 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica, vol 2**. 4. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

PEREIRA, Ênio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna De; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2a Edição. São José dos Campos - Brasil: INPE, 2017. Disponível em: <[http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas\\_solar.html](http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html)>. Acesso em: 30 mai. 2018.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL- CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 18 mai. 2019.

RUSCHEL, Cristiano Saboia. GASPARIN, Fabiano Perin. KRENZINGER, Arno. **Determinação da Capacidade Térmica de Módulos Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias**. Revista Brasileira de Energia Solar Ano 6 Volume VI Número 2, dezembro de 2015, p.112-121.

SIECKER, J.; KUSAKANA, K.; NUMBI, B. P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 192–

203, 2017.

SILVA, Bruno Philip Alves da. **Metodologia para a Determinação de Temperatura em Painéis Fotovoltaicos por Meio da Termográfica Quantitativa**. Dissertação. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2017.

SINCLAIR, I. **Sensors and transducers**. 3. Ed. Oxford: Newnes. 2001. 306 p.

SOUZA, Amaury de. ARISTONE, Flávio. **Estudo da Eficiência Energética de Células Fotovoltaicas em Função da Radiação Solar no Centro Oeste Brasileiro**. Revista InterEspaço – Revista de Geografia e Interdisciplinaridade. 2016.

TERMOPARES. **Vantagens e desvantagens da termorresistência x termopar**. Disponível em: <[http://www.termopares.com.br/teoria\\_sensores\\_temperatura\\_termoresistencia\\_pt100\\_termoresvantag/](http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termoresistencia_pt100_termoresvantag/)>. Acesso em: 22 mai. 2019.

VERLINDEN, Pierre. SARK, WilFried van. **Photovoltaic Solar Energy**. 1. Ed. John Wiley & Sons, 2017.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012.

**Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Rio de Janeiro. Inmetro, 2012.