

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Escola de Engenharia

Flávia Aparecida Ferreira de Oliveira

**METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ÓPTICAS
DIRECIONAIS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO UTILIZANDO
TERMOGRAFIA.**

Belo Horizonte
2024

Flávia Aparecida Ferreira de Oliveira

**METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ÓPTICAS
DIRECIONAIS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO UTILIZANDO
TERMOGRAFIA.**

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

Orientador: Rafael Augusto Magalhães Ferreira

Coorientador: Matheus Pereira Porto

Belo Horizonte

2024

O48m

Oliveira, Flávia Aparecida Ferreira de.

Metodologia de determinação de propriedades ópticas direcionais em módulos fotovoltaicos de silício utilizando termografia [recurso eletrônico] / Flávia Aparecida Ferreira de Oliveira - 2024.
1 recurso online (114 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rafael Augusto Magalhães Ferreira.

Coorientador: Matheus Pereira Porto.

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

Apêndices: f. 104-114.

Bibliografia: f. 94-102.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Manutenção - Teses. 3. Termografia - Teses. 4. Incerteza de medição - Teses. 5. Propriedades ópticas - Teses. I. Ferreira, Rafael Augusto Magalhães. II. Porto, Matheus Pereira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

“METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ÓPTICAS DIRECIONAIS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO UTILIZANDO TERMOGRAFIA”

FLÁVIA APARECIDA FERREIRA DE OLIVEIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Rafael Augusto Magalhães Ferreira (Orientador - Departamento de Engenharia de Mecânica/UFMG), Dr. Matheus Pereira Porto (Coorientador - Departamento de Engenharia Engenharia de Mecânica/UFMG), Dr. Igor Amariz Pires (Departamento de Engenharia Eletrônica/UFMG) e Dra. Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz (Departamento de Engenharia Mecânica/PUCMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 20 de setembro de 2024.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Augusto Magalhães Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 18/10/2024, às 12:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Pereira Porto, Subcoordenador(a)**, em 18/10/2024, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz, Usuária Externa**, em 18/10/2024, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Amariz Pires, Professor do Magistério Superior**, em 21/10/2024, às 17:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3655103** e o código CRC **AAD49BB8**.

Referência: Processo nº 23072.250781/2024-19

SEI nº 3655103

Dedico esta dissertação a Jesus, pois sem Ele nada seria possível. Esta é uma verdade irrefutável que permeia toda minha trajetória de vida.

Agradecimentos

À minha família em geral, especialmente à minha mãe Neide, in memoriam, que demonstrou uma coragem excepcional diante da vida, honrando cada escolha feita, e à minha avó materna, Dona Brasilina, uma verdadeira guerreira que enfrentou inúmeras adversidades sem nunca desistir. Devo a ela minha coragem diante dos desafios da vida.

Aos meus filhos, Sara, Daniel e Ester de Oliveira, que são a parte mais valiosa da minha vida. Tenho orgulho da integridade e do compromisso que demonstram constantemente para com nossa família. Agradeço por todos os sacrifícios que fizeram por nós. Amo vocês infinitamente.

Aos amigos e irmãos em Cristo, cujas orações incessantes foram um suporte vital. Suas preces foram atendidas e aqui celebro mais essa vitória. Este é apenas o começo, e sou grata por cada intercessão. Agradeço a todos que caminharam ao meu lado nesta jornada. Minha profunda gratidão e um sincero abraço. Aleluia!

Aos meus alunos da Faculdade Anhanguera, unidade Antônio Carlos, por me darem a oportunidade de começar minha carreira como docente e por me fazerem apaixonar cada dia mais pela profissão. E aos colegas, aprendi muito com cada um de vocês.

Ao Paulo Henrique Caires, por reconhecer meu potencial acadêmico quando eu mesma ainda não o via. Que sua perspicácia continue a abrir caminhos para o sucesso. À Marina Cândida, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, cujo coração generoso fez toda a diferença. Ao grupo do Laboratório de Termometria (Labterm), com quem tive o prazer de conviver por quase três anos, agradeço especialmente a Matheus Philippe, Vitor Paes, Robert Gustavo e todos os demais que contribuíram para enriquecer minha jornada como discente.

Ao meu orientador, Rafael Augusto Magalhães Ferreira, por sua fiel condução e encorajamento. Sua paciência e dedicação foram fundamentais nesta jornada. Você é um dos pilares desta etapa e conquistou meu eterno respeito.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da UFMG por criar um ambiente propício ao desenvolvimento da pesquisa. À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e ao CEMTEC (Centro Multiusuário de Termografia Científica) pelo apoio à pesquisa.

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

Eclesiastes 11:1 - "Lança o teu pão sobre as águas, porque depois de muitos dias o acharás."

1 Coríntios 1:27 - "Mas Deus escolheu o que para o mundo é loucura para envergonhar os sábios e escolheu o que para o mundo é fraqueza para envergonhar o que é forte."

Resumo

O aumento da dependência de fontes renováveis de energia sublinha a necessidade de manutenção eficiente e não invasiva das usinas fotovoltaicas. Neste contexto, a termografia infravermelha é uma técnica de manutenção preditiva, que possibilita diagnósticos de anomalias térmicas em módulos fotovoltaicos de silício sem interromper sua operação. Contudo, a aplicabilidade da termografia como ferramenta quantitativa tem sido limitada pela variabilidade das condições de medição, que afetam diretamente a precisão das propriedades ópticas, como emissividade e refletividade dos módulos. Este estudo desenvolve uma metodologia para quantificar a incerteza de medição termográfica, aplicando o método GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) e modelagem através do *software* EES[®]. A investigação foi realizada no Laboratório de Termometria da UFMG, em um ambiente controlado, simulando condições reais de campo, incluindo variações no ângulo de visada e na sujidade dos módulos. Além disso, foram conduzidas inspeções termográficas para determinar as propriedades ópticas dos módulos em condições limpas e sujas, previamente caracterizadas utilizando as técnicas de Difração de Raios X (DRX) e Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX). A metodologia validada permite determinar faixas de ângulos de visada e condições operacionais específicas sob as quais a termografia pode fornecer diagnósticos adequados, essenciais para a manutenção preditiva de instalações fotovoltaicas. O estudo revelou que o ângulo de visada e a sujidade afetam significativamente a emissividade e refletividade dos módulos fotovoltaicos, destacando-se a necessidade de manter o ângulo de inspeção termográfica abaixo de 60° para minimizar incertezas e garantir precisão na detecção de anomalias térmicas.

Palavras-chave: Manutenção; termografia infravermelha; módulos fotovoltaicos; incerteza de medição; propriedades ópticas; sujidade.

Abstract

The increasing reliance on renewable energy sources highlights the need for efficient and non-invasive maintenance of photovoltaic plants. In this context, infrared thermography emerges as a predictive maintenance technique that enables thermal anomaly diagnostics in silicon photovoltaic modules without interrupting their operation. However, the applicability of thermography as a quantitative tool has been limited by the variability in measurement conditions, which directly affects the accuracy of optical properties such as emissivity and reflectivity of the modules. This study develops a methodology to quantify thermographic measurement uncertainty, applying the GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) method and modeling through EES[®] software. The investigation was conducted at the UFMG Thermometry Laboratory in a controlled environment, simulating real field conditions, including variations in viewing angle and module soiling. Additionally, thermographic inspections were carried out to determine the optical properties of clean and soiled modules, previously characterized using X-ray Diffraction (XRD) and X-ray Fluorescence (XRF) techniques. The validated methodology defines viewing angle ranges and specific operational conditions under which thermography can provide accurate diagnostics, essential for the predictive maintenance of photovoltaic installations. The study revealed that the viewing angle and soiling significantly affect the emissivity and reflectivity of photovoltaic modules, emphasizing the need to maintain a thermographic inspection angle below 60° to minimize uncertainties and ensure accuracy in detecting thermal anomalies.

Keywords: Maintenance; infrared thermography; PV modules; measurement uncertainty; optical properties; soiling.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 –Geração e consumo de energia no Brasil (2022).	25
Figura 2.2 –Comparação entre células de p-Si e m-Si.	28
Figura 2.3 –Comparação entre diferentes tecnologias de células solares.	29
Figura 2.4 –Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	30
Figura 2.5 –Curva IxV do módulo fotovoltaico Zhejiang Wanxiang Solar WXS225P.	31
Figura 2.6 –Variantes no acúmulo de poeira na superfície dos módulos.	34
Figura 2.7 –Lei de difração de raios-X proposta por Bragg.	36
Figura 2.8 –(a) Diagrama esquemático de um difratômetro; (b) Difratograma gerado pelo <i>software</i> de gerenciamento do dispositivo.	36
Figura 2.9 –Modelo representativo do funcionamento da Fluorescência de Raios-X.	37
Figura 2.10 –Diversos tipos de sujidade acumulada na superfície fotovoltaica.	38
Figura 2.11 –Modificação da radiação solar ao passar pela atmosfera da Terra.	40
Figura 2.12 –Técnica de inspeção termográfica nos modos passivo e ativo.	41
Figura 2.13 –Faixas espectrais típicas dos termovisores comerciais.	42
Figura 2.14 –Diagrama simplificado de uma câmera infravermelha genérica.	43
Figura 2.15 –Parcelas que compõem o sinal de radiação na medição termográfica.	44
Figura 2.16 –Manutenção de projeto de sistemas fotovoltaicos.	46
Figura 2.17 –Módulo fotovoltaico limpo em contraste com módulo fotovoltaico sobre efeito de sujidade urbana.	47
Figura 2.18 –Inspeção termográfica utilizando Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) sob diferentes ângulos de visada: (a) Vista de perfil, (b) Vista superior.	48
Figura 2.19 –Exemplos de distribuições de probabilidade.	51
Figura 3.1 –Fluxograma da metodologia.	53
Figura 3.2 –Comparação entre as aproximações integral e polinomial.	55
Figura 3.3 –Aparato experimental utilizado para determinar as propriedades ópticas superficiais do módulo fotovoltaico.	59
Figura 3.4 –Equipamentos utilizados na bancada experimental construída.	60
Figura 3.5 –Vista superior do aparato experimental, em uso do Durepoxi.	60
Figura 3.6 –Esquema de montagem da bancada experimental.	61
Figura 3.7 –Representação esquemática da montagem do experimento.	62
Figura 3.8 –Determinação experimental da temperatura média refletida: (a) imagem no espectro do visível; e (b) imagem infravermelha.	63
Figura 3.9 –Espectrômetro Thermo Scientific™ ARL™ QUANT’X EDXRF.	65

Figura 4.1 –Resultados para emissividade direcional no módulo fotovoltaico limpo, em função do ângulo de visada da câmera termográfica.	67
Figura 4.2 –Resultados para refletividade no modulo fotovoltaico limpo, em função ângulo de visada da câmera termográfica.	68
Figura 4.3 –Análise semiquantitativa das amostras de sujidade.	70
Figura 4.4 –Observações das partículas de sujidade de origem urbana.	71
Figura 4.5 –Observações das partículas de sujidade de origem minerária.	73
Figura 4.6 –Resultados para emissividade direcional no módulo fotovoltaico com sujidade urbana, em função do ângulo de visada da câmera termográfica.	77
Figura 4.7 –Resultados para emissividade direcional no módulo fotovoltaico com sujidade minerária, em função do ângulo de visada da câmera termográfica.	78
Figura 4.8 –Resultados para refletividade no modulo fotovoltaico com sujidade urbana, em função ângulo de visada da câmera termográfica.	79
Figura 4.9 –Resultados para refletividade no modulo fotovoltaico com sujidade minerária, em função ângulo de visada da câmera termográfica.	79
Figura 4.10 –Soma dos valores médios de emissividade e refletividade direcionais obtidos.	80
Figura 4.11 –Valores médios de emissividade e refletividade direcional do módulo fotovoltaico.	81
Figura 4.12 –Variação do ângulo de visada em diferentes condições de inspeção.	82
Figura 4.13 –Razão de valores de emissividade normal nas diferentes temperaturas ensaiadas.	83
Figura 4.14 –Valores de emissividade direcional em função de temperatura e ângulo de visada.	85
Figura 4.15 –Valores de refletividade direcional em função de temperatura e ângulo de visada.	85
Figura 4.16 (a) Distribuição direcional representativa da emissividade em diferentes materiais; (b) Resultados para emissividade direcional normalizada no modulo fotovoltaico limpo.	86
Figura 4.17 –Comparação entre norma IEC 62466-3 (2016a) e resultados experimentais de emissividade direcional obtidos para o módulo fotovoltaico limpo.	87
Figura 4.18 –Comparação entre resultados de literatura e resultados experimentais de refletividade direcional obtidos para o módulo fotovoltaico limpo.	88
Figura 4.19 –Incremento das incertezas de medição de temperatura por termografia em função do ângulo de visada para o módulo limpo.	89
Figura 4.20 –Incremento das incertezas de medição considerando valores médios na avaliação das propriedades ópticas do módulo fotovoltaico.	90
Figura A.1 –Calibrador infravermelho de precisão FLUKE 4181.	104

Figura A.2 –Câmera termográfica FLIR SC 660.	105
Figura A.3 –Espectrômetro ARL QUANT’X EDXRF.	106
Figura A.4 –Termohigrômetro TESTO 622.	107
Figura A.5 –Unidade de aquisição de dados Agilent 34970A.	108
Figura A.6 –Varivolt RS PRO 1 Phase 3.6kVA.	109
Figura A.7 –Módulo Fotovoltaico SinoSola SA10-36P.	110

Lista de tabelas

Tabela 3.1 –Incertezas assumidas para as variáveis de entrada do modelo matemático.	57
Tabela 3.2 –Valores de temperatura média refletida em cada um dos ângulos analisados.	64
Tabela 4.1 –Valores das pesagens das amostras de sujidade.	70
Tabela 4.2 –Compilado dos resultados dos ensaios DRX para as amostras de sujidade.	73
Tabela 4.3 –Compostos e quantitativo por amostra – Sujidade Urbana.	74
Tabela 4.4 –Compostos e quantitativo por amostra – Sujidade Minerária.	75
Tabela 4.5 –Compilado dos resultados dos ensaios FRX para as amostras de sujidade.	76
Tabela 4.6 –Contribuições percentuais das fontes de incerteza consideradas na estimativa das propriedades ópticas do módulo fotovoltaico.	83
Tabela 4.7 –Propriedades ópticas médias e incertezas de medição de temperatura superficial do módulo fotovoltaico (limpo) para diferentes ângulos de visada.	90
Tabela B.1 –Valores de emissividade para o módulo limpo.	111
Tabela B.2 –Incertezas dos valores de emissividade para o módulo limpo.	111
Tabela B.3 –Valores de refletividade para o módulo limpo.	111
Tabela B.4 –Incertezas dos valores de refletividade para o módulo limpo.	112
Tabela B.5 –Valores de emissividade para o módulo com sujidade urbana.	112
Tabela B.6 –Incertezas dos valores de emissividade para o módulo com sujidade urbana.	112
Tabela B.7 –Valores de refletividade para o módulo com sujidade urbana.	112
Tabela B.8 –Incertezas dos valores de refletividade para o módulo com sujidade urbana.	113
Tabela B.9 –Valores de emissividade para o módulo com sujidade minerária.	113
Tabela B.10 Incertezas dos valores de emissividade para o módulo com sujidade minerária.	113
Tabela B.11 Valores de refletividade para o módulo com sujidade minerária.	113
Tabela B.12 Incertezas dos valores de refletividade para o módulo com sujidade minerária.	114

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
BIPV	<i>Building Integrated PhotoVoltaics</i>
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Cobre, Índio, Gálio e Selênio
DC	<i>Direct Current</i>
DRX	Difração de Raios X
DSSC	<i>Dye-Sensitized Solar Cells</i>
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FF	Fator de forma
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
FRX	Fluorescência de Raios X
GEE	Gases de Efeito Estufa
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
H2V	Hidrogênio Verde
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEA	Agência Internacional de Energia
IFCC	<i>International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine</i>
IR	<i>Infrared</i>
IRT	<i>Infrared Thermography</i>

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
IUPAP	<i>International Union of Pure and Applied Physics</i>
I-V	Corrente versus Tensão
LabTerm	Laboratório de Termometria
LCMM	Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais
LWIR	<i>Long-Wave Infrared</i>
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MWIR	<i>Mid-Wave Infrared</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIML	<i>Organisation Internationale de Métrologie Légale</i>
O&M	Operação e Manutenção
OPV	Células Orgânicas
PR	<i>Performance Ratio</i>
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
UAS	<i>Unmanned Aerial Systems</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

Lista de símbolos

A	Área
b	Constante de deslocamento de Wien
C	Fator de conversão entre sinal radiométrico e sinal eletrônico
d	Distância entre o termovisor e a superfície alvo
d	Espaçamento interplanar
$D(\lambda)$	Detectividade normalizada do detector
E	Energia do fóton
$E(T)$	Energia radiada total como função da temperatura
E_{atm}	Radiação emitida pela atmosfera em direção ao sensor
E_b	Poder emissivo de corpo-negro
E_{obj}	Radiação emitida pelo próprio objeto
E_{refl}	Radiação média refletida pelo objeto
E_{tot}	Radiação total medida pelo sensor
E_g	Energia do gap
G	Fluxo de radiação incidente
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
L	Deslocamento
n	Número de ordem da reflexão
P	Potência radiada
P_{max}	Potência máxima
S_{atm}	Sinal referente às influências da atmosfera ao nível do solo
$S_k(\lambda)$	Sensibilidade espectral relativa
S_{ob}	Sinal de emissão do objeto alvo

S_{ref}	Sinal de reflexão a partir do objeto
T	Temperatura
T_{atm}	Temperatura atmosférica
T_{CN}	Temperatura corpo negro
T_{full}	Temperatura aparente estimada pelo termovisor
T_{full1}	Temperatura aparente da superfície
T_{full2}	Temperatura aparente do reflexo de emissão do corpo negro
T_{ob}	Temperatura do objeto
T_{ref}	Temperatura média refletida
$u_c(y)$	Incerteza combinada
$\Delta u_{T_{ob}}$	Incremento de incerteza do objeto
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
x_i	Variáveis de entrada
θ	Ângulo de incidência

Letras Gregas

α	Coefficiente Seebeck
ε	Emissividade total-hemisférica
ε_θ	Emissividade direcional
ε_n	Emissividade normal
λ	Comprimento de onda
ν	Graus de liberdade
ρ	Refletividade
τ	Transmissividade

Subscritos

atm	Referente à atmosfera
-------	-----------------------

<i>bb</i>	Referente ao corpo negro
<i>cn</i>	Referente ao corpo negro
<i>obj</i>	Referente ao objeto
<i>refl</i>	Referente à parcela de reflexão
<i>tot</i>	Referente ao total

Constantes

C_1	Primeira constante da radiação, $3,74 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$
C_2	Segunda constante da radiação, $1,44 \times 10^{-2} \text{ mK}$

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Objetivos	22
2	Revisão Bibliográfica	23
2.1	Energia e Eletricidade	23
2.1.1	Fontes Renováveis, Limpas e Alternativas de Energia	23
2.1.2	Geração, Uso e Distribuição de Energia no Mundo	24
2.1.3	Geração, Uso e Distribuição de Energia no Brasil	25
2.2	Energia Solar Fotovoltaica	26
2.2.1	Fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica	26
2.2.2	Aproveitamento da Energia Solar	27
2.2.3	Tipos de Células e Módulos Fotovoltaicos	28
2.2.4	Caracterização de Módulos Fotovoltaicos	30
2.2.5	Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	31
2.3	Sujidade	32
2.3.1	Conceito de Sujidade	32
2.3.2	Tipos de Sujidade	33
2.3.3	Caracterização Química de Amostras de Sujidade	35
2.3.4	Impacto da Sujidade sobre o Desempenho de Módulos Fotovoltaicos	38
2.4	Termografia	39
2.4.1	Fundamentos da Termografia	39
2.4.2	Métodos e Equipamentos Utilizados em Inspeções Termográficas	41
2.4.3	Termografia em Usinas Solares Fotovoltaicas	45
2.4.4	Estudos de Caso Envolvendo Impacto de Sujidade	46
2.4.5	Desafios e Perspectivas Futuras	48
2.5	Incertezas de Medição	49
3	Metodologia	52
3.1	Modelagem Matemática	54
3.1.1	Modelo Matemático da Câmera	54
3.1.2	Análise de Incertezas	57
3.2	Materiais e Métodos	58
3.2.1	Descrição do Aparato Experimental Utilizado	59
3.3	Procedimento Experimental para os Ensaios Termográficos	61
3.4	Determinação da Temperatura Média Refletida	63
3.5	Caracterização Química das Amostras de Sujidade	64

4	Resultados	66
4.1	Caracterização das propriedades ópticas do módulo em estado limpo	66
4.1.1	Emissividade Direcional	66
4.1.2	Refletividade Direcional	68
4.2	Caracterização das amostras de sujidade urbana e minerária	69
4.2.1	Análise Semiquantitativa das Amostras	69
4.2.2	Ensaio de Difração de Raios X (DRX)	71
4.2.3	Ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX)	73
4.3	Caracterização das Propriedades Ópticas do Módulo com Presença de Sujidade	76
4.3.1	Emissividade Direcional	77
4.3.2	Refletividade Direcional	79
4.4	Comparativo de Resultados	80
4.4.1	Comparativo entre os Resultados dos Ensaio Realizados	81
4.4.2	Comparativo com Referências Externas ao Trabalho	85
4.5	Recomendações práticas para as inspeções termográficas	88
5	Conclusão	91
	Referências	94

Apêndices **103**

APÊNDICE A	Lista de equipamentos	104
A.1	Calibrador infravermelho de precisão FLUKE 4181	104
A.2	Câmara termográfica FLIR SC 660	105
A.3	Espectrômetro ARL QUANT'X EDXRF	106
A.4	Termohigrômetro TESTO 622	107
A.5	Unidade de aquisição de dados Agilent 34970A	108
A.6	Varivolt RS PRO 1 Phase 3.6kVA Variac	109
A.7	Módulo Fotovoltaico SinoSola SA10-36P	110
APÊNDICE B	Propriedades ópticas do módulo fotovoltaico	111

1 Introdução

As emissões de CO₂ provocadas por atividades humanas resultam diretamente da nossa dependência de combustíveis fósseis e, em 2018, corresponderam a 68% (ou 37,5 GtCO₂) do total de 55,3 GtCO₂ e de emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), assim afirma Gür (2022). Diante desse cenário, é essencial adotar alternativas para reduzir esses impactos a longo prazo. A energia solar surge como uma solução viável, sendo abundante e com grande capacidade de enfrentar as mudanças climáticas, ganhando espaço rapidamente.

O custo dessas tecnologias tem diminuído significativamente nos últimos anos, e os avanços técnicos, juntamente com políticas públicas de apoio, continuam a oferecer potencial para novas reduções de custos. Dispositivos solares convertem a radiação do Sol em calor ou eletricidade. Embora a energia solar concentrada tenha suas vantagens técnicas e econômicas, a energia solar fotovoltaica (FV) é a mais amplamente utilizada. Os sistemas fotovoltaicos exigem investimentos iniciais significativos, tornando crucial a implementação de métodos avançados e eficientes para assegurar a operação e manutenção (*O&M*) e a confiabilidade desses sistemas, estendendo sua vida útil e otimizando a produtividade CRESESB (2014).

Conforme Ramírez, Das e Márquez (2021), existe a necessidade de uma melhor instrumentação para inspeções em usinas de energia solar fotovoltaica, concluindo que câmeras termográficas e sistemas de imagem são as tecnologias mais amplamente aplicadas no monitoramento. A termografia infravermelha (*IR*) é uma técnica não destrutiva que mede a energia emitida por uma superfície.

No entanto, a literatura pesquisada não apresenta metodologias procedimentais específicas para a realização de termografia quantitativa que incluam a avaliação de incertezas associadas aos resultados de modelos ópticos de emissividade e refletividade, considerando diferentes ângulos de visada da câmera termográfica. A proposta deste estudo é investigar o comportamento óptico dos módulos fotovoltaicos, combinando fundamentos teóricos com a interpretação de resultados obtidos em laboratório. A metodologia desenvolvida visa fornecer uma avaliação mais precisa das propriedades ópticas dos módulos, permitindo sua aplicação em inspeções termográficas regulares com maior confiabilidade.

O estudo foi conduzido em ambiente controlado, utilizando módulos fotovoltaicos de silício. As propriedades ópticas, como emissividade e refletividade, foram caracterizadas sob diferentes condições de sujidade e ângulos de visada. As amostras de sujidade urbana e minerária foram analisadas por meio de técnicas de Difração de Raios X (DRX) e Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX). Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo

matemático, implementado no software *Engineering Equation Solver* (EES), para prever o comportamento térmico dos módulos em diferentes condições operacionais. A metodologia foi validada utilizando o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) para o cálculo de incertezas.

Assim, este estudo pretende contribuir para o avanço da prática de inspeção termográfica em usinas fotovoltaicas, proporcionando uma base metodológica robusta para a realização de medições precisas das propriedades ópticas dos módulos, viabilizando inspeções termográficas mais confiáveis e otimizadas para a manutenção preditiva de usinas solares.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para determinar a viabilidade de realização de inspeções termográficas em usinas solares, focando na caracterização das propriedades ópticas da superfície frontal dos módulos fotovoltaicos de silício sob variações das condições reais de medição. Os objetivos específicos são:

- i. Caracterizar as propriedades ópticas (emissividade e refletividade) dos módulos fotovoltaicos de silício em diferentes condições de sujidade e limpeza, em ambiente controlado, para estabelecer uma base de dados de referência;
- ii. Avaliar a influência da temperatura da superfície do módulo e do ângulo de visada do termovisor nos valores dessas propriedades;
- iii. Correlacionar os resultados experimentais obtidos com padrões estabelecidos na literatura, visando aprimorar a compreensão e a análise dos dados do estudo.
- iv. Propor recomendações práticas para a realização de inspeções termográficas em módulos fotovoltaicos, considerando as influências que a presença de sujidades e o ângulo de visada tem sobre os registros radiométricos.

2 Revisão Bibliográfica

O Capítulo 2 desta dissertação faz uma contextualização do tema em que o trabalho se insere e também apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do estudo. Primeiramente, na Seção 2.1, são discutidas as fontes renováveis, limpas e alternativas de energia, seguidas pela análise da geração, uso e distribuição de energia no mundo e no Brasil. Em seguida, na Seção 2.2, são explorados os fundamentos da energia solar fotovoltaica, abordando desde os princípios básicos até o aproveitamento da energia solar, os tipos de células e módulos fotovoltaicos disponíveis. O impacto da sujidade sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos é detalhado na Seção 2.3, que inclui o conceito de sujidade, os tipos identificados e a caracterização química das amostras de sujidade. A termografia como método de inspeção em usinas solares fotovoltaicas é abordada na Seção 2.4, começando pelos seus fundamentos, além dos métodos e equipamentos utilizados, seguido por estudos de caso que destacam o impacto da sujidade sobre o desempenho operacional das usinas. Por fim, na Seção 2.5, são discutidas as incertezas de medição associadas ao uso da termografia como ferramenta de diagnóstico em sistemas fotovoltaicos, fornecendo uma visão crítica das limitações atuais e das perspectivas futuras para pesquisa e desenvolvimento na área.

2.1 Energia e Eletricidade

2.1.1 Fontes Renováveis, Limpas e Alternativas de Energia

A produção global de energia é composta por eletricidade, transporte e aquecimento, com a eletricidade destacando-se como um componente fundamental. A matriz energética mundial inclui uma variedade de fontes, predominantemente carvão e gás, enquanto energias renováveis como hidrelétrica, nuclear, solar e eólica estão em crescimento significativo (RITCHIE; ROSADO, 2020). A transição energética consiste em substituir combustíveis fósseis (CORTESE; SOTTO; AUMOND, 2023) como petróleo e carvão por alternativas que emitem menos gases de efeito estufa (GEE). Conforme Li e Xu (2024), reduzir as emissões de carbono (CO_2) e alcançar um desenvolvimento verde e de baixo carbono tornou-se um ponto focal de preocupação para a sociedade e o governo. Para alcançar esse objetivo, é necessário o aumento da produção e uso ampliado de energias renováveis. As fontes de energia renováveis, como a solar, são aquelas que podem se regenerar com o tempo e, por isso, não se esgotam (DWIPUTRA; SAPUTRI, 2024). Além disso, elas emitem muito menos carbono do que os combustíveis fósseis. Exemplos incluem a energia

eólica *offshore* (SHAO *et al.*, 2024) e o hidrogênio verde (H2V), que já estão sendo avaliados para os próximos anos (SILVA *et al.*, 2023). A diversificação de fontes de energia também é fundamental para aumentar nossa segurança energética, ou seja, para garantir que no futuro não falte energia. No Brasil, o uso crescente de energias renováveis fez com que a capacidade instalada aumentasse de 4.874 MW em 2020 para 8.771 MW em 2021, representando um crescimento de aproximadamente 80%. Conforme relatado pela EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) (2022), esse crescimento marca um avanço em direção a uma matriz energética mais limpa.

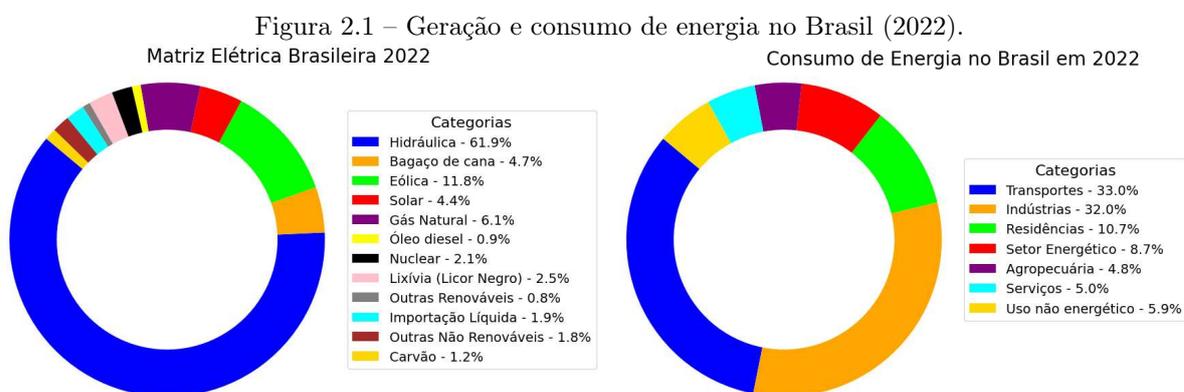
2.1.2 Geração, Uso e Distribuição de Energia no Mundo

Uma oferta confiável e acessível de energia é essencial para a eficiência operacional de indústrias, serviços e infraestrutura, impactando diretamente o desenvolvimento nacional. Amri (2019) afirma que o consumo energético influencia significativamente os volumes de importação e exportação, de tal forma que qualquer flutuação no consumo de energia tem repercussões diretas no setor comercial. Há uma relação linear mutuamente reforçadora entre o consumo de energia, tanto renovável quanto não-renovável, sendo que, para o comércio internacional, é comum pensar que países que apresentam uma maior quantidade de produção industrial irão consumir mais energia. Logo, para esses países, é importante considerar a energia renovável como uma alternativa sustentável. Os dez principais países consumidores de energia renovável incluem China, Estados Unidos, Alemanha, Brasil, Índia, Reino Unido, Japão, Espanha, França e Itália. Todos estes países desempenham um papel crucial na dinâmica entre consumo de energia e crescimento econômico. Em 2020, esses países foram responsáveis por 75,8% do consumo global de energia renovável (FAREED; PATA, 2022). A expansão da capacidade de energia renovável é um dos aspectos mais marcantes da transição energética global. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a capacidade global de energia renovável cresceu quase 50% em 2023, com a energia solar fotovoltaica desempenhando um papel significativo nesse aumento. O relatório principal prevê que cerca de 3.700 GW de nova capacidade renovável serão adicionados entre 2023 e 2028, impulsionados por políticas de apoio em mais de 130 países. A energia solar fotovoltaica e eólica representarão 95% dessa expansão, devido aos custos de geração mais baixos em comparação com combustíveis fósseis e outras alternativas. Durante o período de previsão, o crescimento da geração de eletricidade renovável superará o aumento da demanda global, resultando em um declínio gradual da geração a carvão, enquanto o gás natural permanecerá estável. Em 2028, espera-se que as fontes renováveis correspondam a 42% da geração global de eletricidade, com a energia eólica e solar fotovoltaica compondo 25% desse total. A demanda por eletricidade está projetada para ter um aumento significativo, de aproximadamente 52.000 TWh para 71.000 TWh até 2050, impulsionada principalmente pelo transporte, hidrogênio verde e combustíveis sintéticos,

indústria e edifícios. Na indústria, a demanda por energia está projetada para dobrar de 2019 a 2050, impulsionada pela eletrificação de processos de calor de baixa a média intensidade. Nos edifícios, a eletrificação deve dobrar a demanda por energia, com alta adoção de bombas de calor e aumento da demanda por resfriamento em países da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), promovendo um rápido crescimento antes de 2035 (McKinsey & Company, 2023). Essas projeções destacam a importância da transição para fontes de energia renovável e a necessidade de adaptação contínua das infraestruturas energéticas globais. O crescimento significativo na capacidade de geração de energia renovável, aliado ao aumento da demanda por eletricidade, exige um planejamento a longo prazo.

2.1.3 Geração, Uso e Distribuição de Energia no Brasil

O Brasil é amplamente reconhecido por sua significativa produção de energia hidrelétrica (LOPES; BRITO, 2021). Além disso, o país possui recursos abundantes para diversificar e expandir o uso de energias limpas e sustentáveis, como a energia solar, eólica, biomassa e outras fontes. Segundo Reis (2015), a segurança e a independência energética dependerão cada vez mais da inovação e da pesquisa tecnológica. Conforme AZEVEDO, FONSECA e MISSIO (2022), novos setores como o de energia limpa e renovável, assim como os serviços modernos ligados à indústria e à agricultura, apresentam oportunidades significativas. Aproveitar essas oportunidades pode impulsionar o dinamismo econômico. Quando se trata de uso da energia, deve-se levar em conta suas especificidades setoriais e regionais. A Figura 2.1 apresenta o setor industrial sendo um dos maiores responsáveis pelo maior consumo de eletricidade no Brasil, seguido pelo setor residencial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2022). No ano de 2022, foram emitidas 412 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, contra 434 milhões em 2021. A queda se deve principalmente às chuvas abundantes, que reduziram a geração termelétrica, e à contínua entrada de renováveis em grande quantidade na matriz (TSAI *et al.*, 2023).



Fonte: Adaptado de EPE 2023.

No Brasil, a diversidade e a abundância de recursos naturais possibilitam a exploração de diversas fontes renováveis (PAMPLONA; CACCIAMALI, 2017). Esse potencial, entretanto, contrasta com o desafio de modernizar o setor de transportes, que ainda depende fortemente de combustíveis fósseis. Investir na eletrificação dos veículos e na implementação de tecnologias limpas é imperativo. Iniciativas regionais, como o avanço da energia eólica no Nordeste e biomassa na Amazônia (SILVA; ALVES; RAMALHO, 2018), exemplificam a capacidade do Brasil de liderar a transição para um futuro energético mais sustentável.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

2.2.1 Fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica

A energia de um sistema fotovoltaico é composta por dois componentes principais: energia elétrica e energia térmica. A eletricidade é gerada pelo efeito fotovoltaico, enquanto as células fotovoltaicas também aquecem devido à energia térmica da radiação solar. A eletricidade gerada, também chamada de exergia elétrica, representa a energia disponível que pode ser utilizada eficientemente. Por outro lado, a energia térmica absorvida pelas células que não é convertida em eletricidade é dissipada como calor para o ambiente (JOSHI; DINCER; REDDY, 2009).

A energia solar fotovoltaica começou a ser explorada no século XIX, quando Alexandre Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico em 1839, observando que certos materiais produziam pequenas correntes elétricas ao serem expostos à luz solar (LAMEIRINHAS; TORRES; CUNHA, 2020). Em 1873, Willoughby Smith descobriu a fotocondutividade do selênio, e em 1883, Charles Fritts desenvolveu as primeiras células solares práticas utilizando selênio recoberto com ouro, embora com eficiência muito baixa (AMERICAN PHYSICAL SOCIETY (APS), 2009).

O progresso significativo veio em 1954, quando pesquisadores da Bell Laboratories criaram a primeira célula solar de silício com eficiência prática, conseguindo converter aproximadamente 6% da luz solar em eletricidade (KUMAR, 2020). Esse desenvolvimento foi possibilitado pelas melhorias na fabricação de materiais semicondutores, especialmente o silício cristalino, que aumentaram a eficiência e viabilidade econômica da tecnologia fotovoltaica.

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico no qual a luz solar é convertida diretamente em eletricidade por meio de um material semicondutor, sendo esse o processo de conversão de radiação solar em energia elétrica. A luz é uma forma de energia eletromagnética que se propaga por meio de ondas, sendo também apresentada como composta

por partículas chamadas fótons, que não têm massa e se movem em linha reta a uma velocidade constante (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Ainda segundo os autores, a energia de um fóton é função da frequência da radiação e, portanto, também do comprimento de onda, conforme apresentado na Equação 2.1:

$$E = h \cdot v \quad (2.1)$$

Em que:

- E = Energia do fóton, em Joules (J);
- h = Constante de Planck, $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J·s;
- v = Frequência da radiação eletromagnética, em Hertz (Hz).

Essa equação mostra que os fótons mais energéticos são aqueles com uma alta frequência e curto comprimento de onda. A conversão da luz solar em eletricidade ocorre em células solares, que são dispositivos compostos por materiais semicondutores, como o silício. Essas células são agrupadas em módulos solares que, por sua vez, são instalados em sistemas fotovoltaicos para gerar eletricidade. Lima *et al.* (2020) destacam que, para a análise de células solares sob o aspecto fotovoltaico, é essencial considerar a taxa de absorção de fótons, visto que idealmente cada fóton absorvido deve resultar na formação de um par elétron-lacuna, otimizando assim o processo de conversão de energia.

2.2.2 Aproveitamento da Energia Solar

A captação da energia solar, uma fonte perene e amplamente disponível na dimensão temporal terrestre, se destaca como uma das opções energéticas mais promissoras para sustentar o avanço humano, tanto em termos térmicos quanto luminosos. No âmbito da energia fotovoltaica, uma variedade de arranjos, desde sistemas autônomos até híbridos, é empregada para a geração de energia. Assim, a acurada compreensão dos recursos solares emerge como o elemento mais significativo para a elaboração de projetos dedicados à maximização do uso dessa fonte energética. Conforme Zahedi (2011), variações na radiação solar também impactam diretamente a tensão e a corrente operacionais da célula solar, alterando seu ponto operacional.

Fatores internos (como a energia do gap, E_g) quanto externos (como irradiância, temperatura, espectro solar, ângulo de incidência e acúmulo de sujeira) podem impactar o desempenho de módulos fotovoltaicos idênticos, alterando suas características elétricas e eficiência. A energia do gap (E_g), que é a energia necessária para mover um elétron da banda de valência para a banda de condução, é crucial, pois somente fótons com energia

acima desse valor podem gerar pares elétron-lacuna. Essa condição influencia diretamente a eficiência das células fotovoltaicas e define como o dispositivo responde ao espectro solar incidente (SILVA, 2019).

O desenvolvimento e a implementação de sistemas fotovoltaicos têm sido impulsionados por avanços tecnológicos significativos. Estudos como o de Makrides *et al.* (2012) focam em aprimorar a eficiência e otimizar o desempenho desses sistemas. A pesquisa abordou os efeitos da temperatura e do recozimento térmico em diversas tecnologias fotovoltaicas, revelando que as perdas de desempenho decorrentes do aumento da temperatura representam um obstáculo considerável para a eficácia dos sistemas fotovoltaicos em climas quentes.

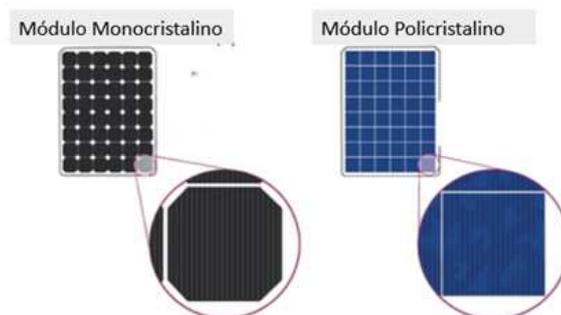
Além das pesquisas focadas em elevar a eficiência dos módulos fotovoltaicos, estudos também abordam aprimoramentos nos sistemas de armazenamento em baterias (STREJOIU; LAZAROIO, 2023) de energia solar, buscando otimizar a capacidade de retenção e a eficiência energética durante períodos de baixa irradiação. Avanços estão sendo realizados em sistemas conectados à rede (*on-grid*) (BAHOU, 2023), sistemas isolados (*off-grid*) (BISAGA *et al.*, 2021) e sistemas híbridos, que integram múltiplas fontes de energia e tecnologias de armazenamento para aumentar a eficiência do fornecimento energético.

2.2.3 Tipos de Células e Módulos Fotovoltaicos

Os avanços tecnológicos têm permitido uma ampla variedade de tipos de células e módulos solares disponíveis no mercado. Cada tipo de célula e módulo fotovoltaico possui características únicas, vantagens e desvantagens, que determinam sua adequação para diferentes aplicações.

As células de silício monocristalino, conforme ilustrado na Figura 2.2, apresentam uma eficiência máxima de até 24%. Por outro lado, as células de silício policristalino, também mostradas na Figura 2.2, podem alcançar uma eficiência máxima de 17,8%. Enquanto as células de silício amorfo possuem uma eficiência máxima de 13%, de acordo com (RAJPUT, 2017).

Figura 2.2 – Comparação entre células de p-Si e m-Si.



Fonte: Adaptado de (BüHLER; SANTOS; GABE, 2018)

As células fotovoltaicas são essenciais para a conversão de energia luminosa (radiação solar) em eletricidade. Diversas tecnologias foram desenvolvidas, cada uma com suas vantagens e desvantagens (Figura 2.3). As células de silício amorfo (a-Si) têm eficiências entre 8% e 13,2%, são flexíveis e adequadas para pequenas aplicações eletrônicas devido ao baixo custo e facilidade de produção, apesar da baixa estabilidade. As células de telureto de cádmio (CdTe) têm eficiências entre 11% e 13%, destacando-se pela relação custo-eficiência e desempenho em condições adversas, mas enfrentam problemas com materiais tóxicos e limitados. As células de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) têm alta eficiência (até 20%) e são flexíveis, ideais para diversas aplicações, apesar dos desafios na produção.

Figura 2.3 – Comparação entre diferentes tecnologias de células solares.

Classificação	Eficiência	Vantagem	Desvantagem
Células solares de silício			
Monocristalino	15–24%	Alta eficiência de conversão, tecnologia mais madura e alta confiabilidade	Alto custo, grande consumo de silício e processo de produção complexo
Policristalino	14–20.4%	Sem recessão de eficiência, pode ser fabricado em substratos baratos, e custo muito menor que o monocristalino	Relativamente alto consumo de silício e custo, processo de produção complexo
a-Si	8–13.2%	Baixo custo, facilidade de produção em massa, coeficiente de absorção óptica relativamente alto, muito baixa condutividade escura e boa resposta à luz fraca	Recessão induzida pela luz, baixa eficiência de conversão e baixa estabilidade
Células solares de multicompósito			
CdS	Até 16%	Baixo custo, facilidade de produção em massa	Cádmio tóxico
CdTe	Teoricamente: 28%	Band gap ideal, alta taxa de absorção de luz, alta eficiência de conversão, desempenho estável, estrutura simples e baixo custo	Reservas limitadas de telúrio, alto custo de módulo e material de base, e cádmio tóxico
GaAs	Até 30%	Alto coeficiente de absorção de luz e alta eficiência de conversão, forte resistência à temperatura	Custo muito alto
CIGS	Até 20%	Baixo custo, não recessão, bom desempenho sob luz fraca, ampla aplicabilidade de substrato, banda de gap óptica ajustável e forte habilidade anti-irradiação	Materiais raros, dificuldade de controlar elementos com precisão
Células solares PPVC			
PPVC	Abaixo de 5%	Excelentes propriedades mecânicas e capacidade de processamento de filme fino, baixo custo, flexibilidade e fabricação simples	Baixa eficiência de conversão, desempenho instável
Células solares de TiO₂ nanocristalinas			
TiO ₂ nanocristalinas	Mais de 10%	Fabricação simples, baixo custo, boa estabilidade, não toxicidade e curto ciclo de recuperação de energia	Baixa eficiência de conversão, pesquisa e desenvolvimento intensivos

Fonte: adaptado de Zhou et al. (2014).

As células sensibilizadas por corante (DSSC) e as células orgânicas (OPV) têm eficiências de 6% a 11%, são flexíveis e de baixo custo, ideais para janelas solares e dispositivos portáteis, mas enfrentam problemas de eficiência e estabilidade. As células

de perovskita, com eficiência acima de 25% em laboratórios, oferecem baixo custo de produção, mas ainda enfrentam questões de durabilidade. Módulos de filme fino, como CdTe, CIGS e a-Si, são leves e flexíveis, ideais para superfícies curvas e telhados.

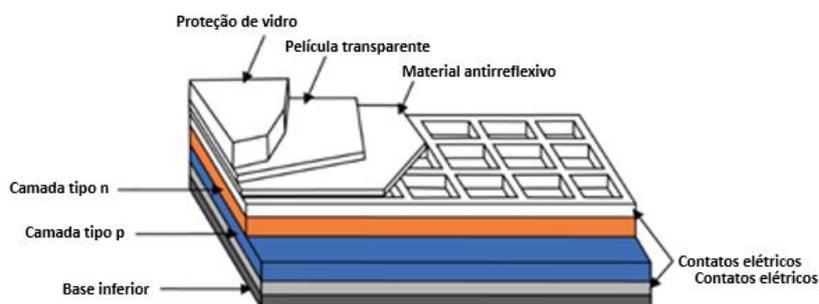
Módulos híbridos combinam diferentes células solares para maximizar a eficiência, superando as limitações individuais. Células multijunção, com eficiências acima de 40%, são usadas em aplicações espaciais devido ao alto custo. Módulos fotovoltaicos integrados em edificações (BIPV) geram energia e servem como material de construção, economizando espaço e custos. Módulos transparentes, com eficiências de 5% a 7%, são usados em janelas e fachadas, contribuindo para a estética e eficiência energética dos edifícios. Módulos flexíveis são ideais para superfícies curvas e móveis, sendo leves e fáceis de instalar, embora com menor eficiência que os rígidos, adequados para ambientes onde a conformidade é essencial.

Essa comparação entre diferentes tipos de células para módulos fotovoltaicos destaca a diversidade de opções disponíveis, cada uma com suas aplicações ideais, vantagens e desafios. A Figura 2.3 de comparação oferece uma visão detalhada das eficiências e características de cada tecnologia, permitindo uma compreensão das possibilidades e limitações na escolha de sistemas fotovoltaicos.

2.2.4 Caracterização de Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células que possuem uma fina camada de silício tipo N sobre uma camada mais espessa de silício tipo P, criando um campo elétrico devido à interação entre elétrons livres e lacunas, conforme ilustrado na Figura 2.4. O silício monocristalino é amplamente utilizado devido à sua alta pureza e estrutura homogênea, sendo produzido por fusão e cristalização em alta temperatura, resultando em alta eficiência de conversão e durabilidade.

Figura 2.4 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

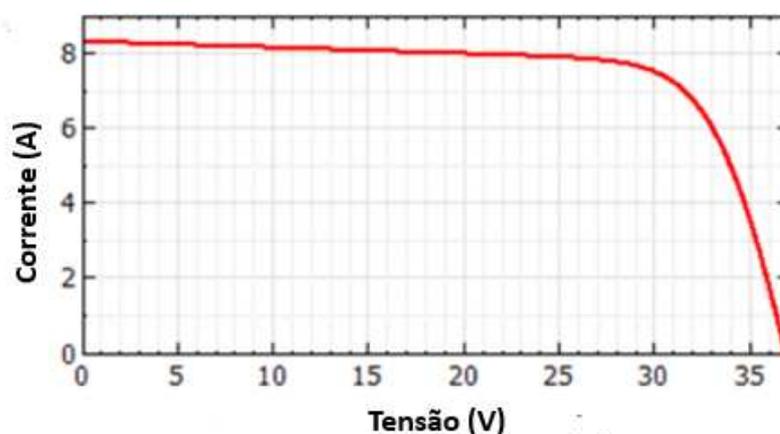


Fonte: Adaptado de Coelho (2008).

Para um entendimento completo dos módulos fotovoltaicos é essencial compreender o processo de fotogeração nas células solares e a capacidade do silício de formar junções PN. O silício intrínseco possui iguais quantidades de elétrons e lacunas, mas ao ser dopado com elementos trivalentes (Boro) ou pentavalentes (Fósforo), torna-se extrínseco, criando substratos tipo P (com falta de elétrons) e tipo N (com excesso de elétrons). Na junção PN forma-se uma camada de depleção onde elétrons do lado N e lacunas do lado P se recombinam, gerando um campo elétrico e uma diferença de potencial (COELHO, 2008).

O desempenho elétrico dos sistemas fotovoltaicos é avaliado pela análise da curva I-V (corrente versus tensão). Na Figura 2.5 a curva I-V é demonstrada para o modelo de módulo fotovoltaico Zhejiang Wanxiang Solar WXS225P, que determina parâmetros importantes como corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e ponto de máxima potência (P_{max}). O fator de forma (FF), derivado da curva I-V, indica a qualidade do módulo fotovoltaico.

Figura 2.5 – Curva IxV do módulo fotovoltaico Zhejiang Wanxiang Solar WXS225P.



Fonte: adaptado de Ronçani, Zanchetta e Rampinelli (2014).

Em suma, a caracterização de sistemas fotovoltaicos envolve uma análise detalhada dos diversos componentes e condições operacionais, visando otimizar o desempenho e assegurar a viabilidade econômica das instalações solares.

2.2.5 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

A energia solar fotovoltaica no Brasil tem se destacado como uma alternativa promissora para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de fontes fósseis. Com uma irradiação média anual variando entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano, o Brasil possui um potencial significativo para a geração de energia solar, superando, em muito, a média da Europa, conforme destacado por Pinheiro *et al.* (2020). Essa alta disponibilidade de radiação solar, combinada com o aumento dos custos de energia e a necessidade de sustentabilidade, torna o país um cenário ideal para o desenvolvimento dessa tecnologia.

O crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil tem sido impulsionado por diversos fatores, incluindo incentivos governamentais, redução nos custos de instalação e avanços tecnológicos. Programas de incentivo, como a criação da Resolução Normativa 482/2012, implantada pela ANEEL, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), têm sido fundamentais para fomentar a adoção de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas e rurais. Além disso, políticas estaduais destacam que, atualmente, os estados que apresentam o maior número de conexões à rede elétrica são Minas Gerais e São Paulo (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

Ao final de 2022, o Brasil alcançou uma capacidade total instalada de geração solar fotovoltaica de 25,4 GW, dividida entre 7,4 GW em projetos centralizados e 17,9 GW em geração distribuída, o que representa 13,3% da capacidade total do país. A região Nordeste abriga 61,9% dos projetos de geração solar fotovoltaica centralizada e 18,9% da geração distribuída, com destaque para os estados da Bahia, Piauí e Ceará. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2031, elaborado pelo MME e pela EPE, espera-se um crescimento significativo da energia solar no Brasil nos próximos anos (BEZERRA, 2023).

Em suma, a energia solar fotovoltaica no Brasil representa uma oportunidade única para diversificar a matriz energética, promover a sustentabilidade e reduzir a dependência de fontes fósseis. O alto potencial de irradiação solar, aliado aos avanços tecnológicos e aos incentivos governamentais, cria um ambiente favorável para o crescimento contínuo desse setor.

2.3 Sujidade

2.3.1 Conceito de Sujidade

A sujeira é um fator ambiental significativo que impacta negativamente a produção de energia dos módulos fotovoltaicos. Quando partículas de sujeira se acumulam na superfície do módulo, a intensidade da luz que atinge é diminuída, resultando em uma redução na geração de energia elétrica. Em termos gerais, o monitoramento e a limpeza dos módulos fotovoltaicos podem melhorar significativamente sua eficiência e potência de saída.

Devido à diversidade de elementos que podem influenciar essa condição, a análise detalhada de sua presença se torna um processo complexo e altamente específico ao local em estudo. A presença de partículas de sujeira em superfícies é um fenômeno que ocorre em diversos contextos, desde ambientes urbanos, rurais (PASSER; KREINER, 2021), ambientes minerários, e áreas industriais. A sujidade é composta por uma mistura de

poeira, poluentes atmosféricos, detritos orgânicos e inorgânicos, e outros contaminantes que se depositam sobre superfícies expostas.

Com base nos achados de Kayri e Bayar (2024), após 1 mês de exposição a poeira de argila, calcária e urbana, os módulos solares perderam eficiência de 18%, 26% e 28% respectivamente, comparados a módulos limpos. Após 3 meses, as perdas foram de 46%, 61% e 63%, e após 6 meses, alcançaram 67%, 77% e 78%. Todos os tipos de poeira, especialmente a urbana e calcária, causaram perdas significativas. A limpeza regular dos módulos é recomendada para evitar essas perdas.

De acordo com Gholami *et al.* (2018), a redução na produção de energia dos módulos, causada pelo acúmulo de poeira, resultou em perdas na energia diária entregue. Observou-se que a produção de energia dos módulos sujos divergia progressivamente dos limpos ao longo do tempo. Após um período de 70 dias sem chuvas, a diferença nas produções totais de energia entre os módulos limpos e sujos foi de 16,88%. Mustafa *et al.* (2020) destacam que a limpeza periódica das células solares é crucial para alcançar a eficiência desejada em um sistema de módulo fotovoltaico, sublinhando a importância de não negligenciar essas manutenções.

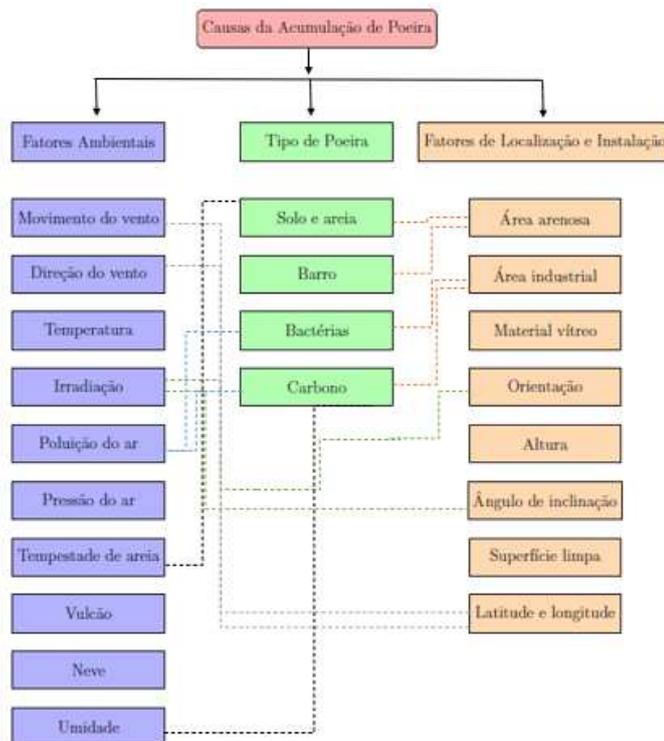
Conforme Araujo, Carvalho e Dumont (2019), a sujeira, depois da irradiação e da temperatura ambiente, é o fator que mais impacta o desempenho dos módulos fotovoltaicos. A eficácia das estratégias de manutenção nas instalações, especialmente no que se refere à remoção regular e sistemática de sujeira acumulada, é importante para aumentar a transmissão de luz e maximizar a eficiência fotovoltaica. Tais práticas, alinhadas às análises específicas da composição química dos poluentes e às condições ambientais locais, são essenciais para mitigar as perdas de produção.

2.3.2 Tipos de Sujidade

O impacto da composição química da sujidade nos módulos fotovoltaicos é significativo, pois diferentes tipos de partículas podem ter efeitos variados na eficiência dos módulos. A sujidade pode ser categorizada em diversos tipos, dependendo de sua origem e composição. Estes tipos de sujidade variam conforme o ambiente (localização da instalação) e as fontes de poluição predominantes, podendo impactar de maneira diferente as superfícies expostas. A dificuldade em estabelecer modelos e parâmetros para o impacto da sujidade no desempenho dos módulos muitas vezes reside na interdependência dos fatores, como esquematizado na Figura 2.6 (MAGHAMI *et al.*, 2016).

Diversos estudos ao redor do mundo demonstram os diferentes elementos encontrados nas amostras de sujeira. No estudo conduzido por Rashid *et al.* (2023) em Islamabad e Bahawalpur (Paquistão), são descritas as condições climáticas distintas dessas regiões. Islamabad apresenta um clima mais limpo e temperado, enquanto Bahawalpur possui

Figura 2.6 – Variantes no acúmulo de poeira na superfície dos módulos.



Fonte: Adaptado de (MAGHAMI et al., 2016).

condições mais secas e poeirentas. As amostras de poeira coletadas em Islamabad mostram uma composição predominante de carbono, seguido por oxigênio, silício e cálcio, além de menores quantidades de alumínio, ferro, potássio, magnésio e sódio. Em Bahawalpur, as amostras revelam oxigênio como o principal componente, seguido por carbono, silício e alumínio, com pequenos conteúdos de cálcio, ferro, magnésio e potássio.

Em áreas urbanas, a sujeira pode conter altos níveis de material orgânico e partículas de carbono. Estudos sobre a composição química da sujeira em módulos solares, realizados por Fraga (2018) em Belo Horizonte (Brasil), revelam que os principais componentes incluem quartzo, hematita, caulinita, calcita e moscovita. Além disso, foi identificado que a poeira coletada na superfície dos módulos fotovoltaicos contém uma significativa presença de material particulado proveniente de emissões industriais e da poluição urbana.

As técnicas de limpeza, segundo Olorunfemi, Ogboulamni e Nwulu (2022), abrangem uma série de estudos que comparam diversas abordagens. Estas incluem: Limpeza Natural (sem custos de investimento), Limpeza Manual (envolve design simples, pano e água), Limpeza Robótica (eficaz e sustentável em todos os climas), Limpeza Heliotex (eficaz para sujeira não pegajosa), Limpeza Eletrostática (eficaz para poeira seca e não requer partes móveis), Revestimento Hidrofóbico e Hidrofílico (não requer água nem mão de obra), Sistema de Limpeza Vibratório (aplicável para sujeira seca em clima seco) e Sistema de Limpeza com Ar Forçado (aplicável para sujeira seca em clima seco).

A limpeza dos módulos solares é essencial e requer monitoramento e avaliação constantes para otimização dos processos. Diversas estratégias de limpeza e manutenção são empregadas para mitigar os efeitos da sujeira nos módulos fotovoltaicos. A limpeza manual, embora eficaz, pode ser onerosa e impraticável para grandes instalações. Tecnologias automatizadas, como robôs de limpeza, oferecem uma solução eficiente e menos dispendiosa. Além disso, o uso de revestimentos hidrofóbicos e fotocatalíticos nas superfícies dos módulos pode reduzir a adesão de partículas e facilitar a autolimpeza (BOUZGUENDA *et al.*, 2023). Sistemas inteligentes também são utilizados para detectar condições de sujeira e realizar a limpeza dos módulos, comparando-se favoravelmente com tecnologias autônomas e manuais.

2.3.3 Caracterização Química de Amostras de Sujidade

Ao abordar nas seções anteriores o conceito e os tipos de sujeira, é necessário discutir como caracterizar a sujeira. Este estudo será focado em duas técnicas: a Difração de Raios X (XRD) e a Fluorescência de Raios X (XRF). Essa análise fornece informações sobre a composição elementar da poeira, incluindo a presença de metais pesados, os quais podem impactar negativamente o funcionamento dos módulos fotovoltaicos.

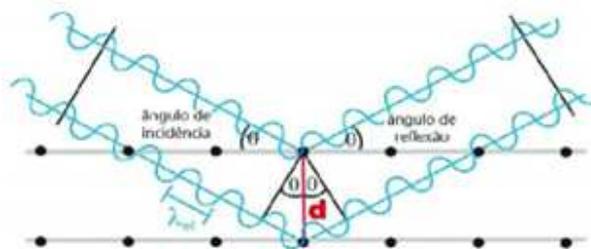
A difração de raios X (XRD) é uma técnica essencial na análise estrutural de materiais cristalinos que se baseia na interação de raios X com os planos atômicos de um cristal. Descobertos por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895, os raios X são ondas eletromagnéticas invisíveis que podem atravessar materiais opacos e revelar detalhes internos de estruturas cristalinas (BRUM *et al.*, 2018). A Lei de Bragg, fundamental para XRD, é expressa por

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (2.2)$$

onde:

- n é o número de ordem da reflexão, um número inteiro (1, 2, 3, ...) que representa o número de comprimentos de onda que cabem no caminho extra percorrido pela onda refletida;
- λ é o comprimento de onda da radiação incidente, como raios X ou luz visível;
- d é a distância entre planos atômicos consecutivos no cristal, chamada de espaçamento interplanar;
- θ é o ângulo de incidência da radiação em relação ao plano cristalino, conhecido como ângulo de Bragg, conforme Figura 2.7.

Figura 2.7 – Lei de difração de raios-X proposta por Bragg.

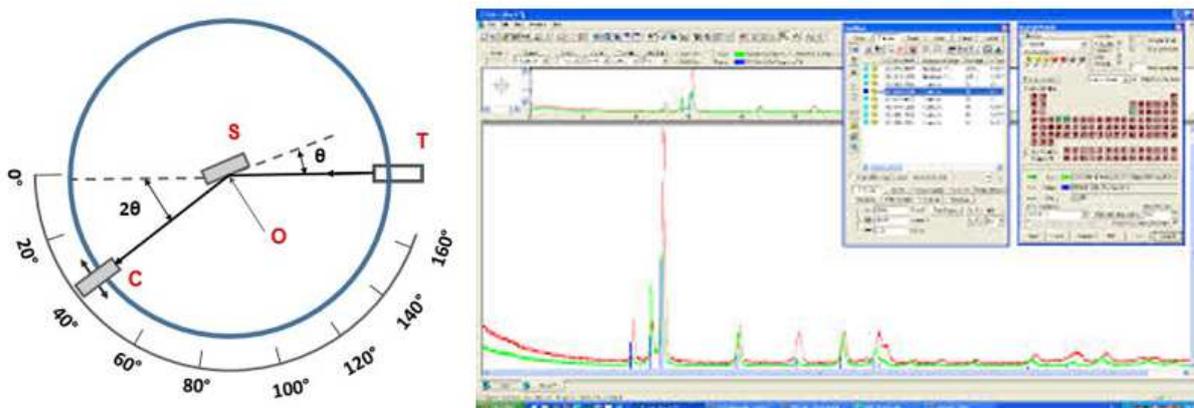


Fonte: (JúNIOR, 2002).

A produção de raios X para difração envolve a colisão de elétrons de alta energia com um alvo metálico, tipicamente um ânodo. Essa colisão resulta na liberação de elétrons das camadas internas dos átomos do alvo, criando vacâncias que são preenchidas por elétrons de camadas superiores, emitindo raios X no processo (BLEICHER; SASAKI, 2000). Esse fenômeno é crucial para a geração de raios X que serão utilizados na análise estrutural dos materiais.

Filho e Lopes (2013) afirmam que o principal equipamento utilizado para a realização de XRD é o difratômetro de raios X, que direciona os raios X gerados para a amostra e mede a difração resultante com um detector. A escolha da radiação depende do comprimento de onda, da potência adequada ao material, de fatores econômicos e disponibilidade. Nos primeiros difratômetros, a geração de raios X ocorria através de um tubo de Crookes, composto por dois eletrodos em uma ampola de vidro evacuada, submetidos a uma diferença de potencial para gerar as cintilações de raios X. A Figura 2.8 demonstra o diagrama esquemático de um difratômetro de raios X, onde T = fonte de raios X, S = amostra, C = detector e O = eixo de giro da amostra e detector.

Figura 2.8 – (a) Diagrama esquemático de um difratômetro; (b) Difratograma gerado pelo *software* de gerenciamento do dispositivo.



Fonte: Adaptado de (BRUM et al., 2018).

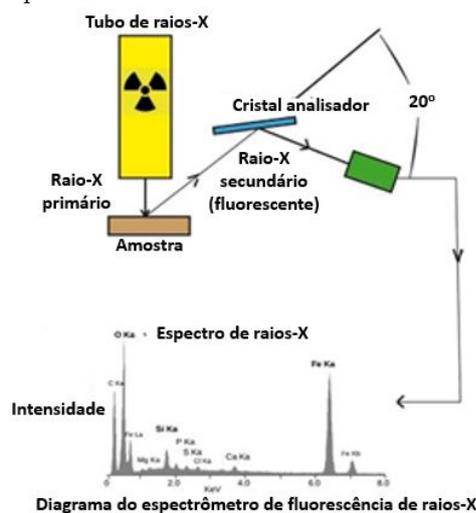
A segunda parte da abordagem é a espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), que, segundo Ferretti (2008), é uma técnica chave no estudo de materiais culturais, oferecendo identificação de componentes e estudo de proveniência sem destruir os objetos.

Adequada para análise de itens frágeis e grandes, a FRX utiliza instrumentos portáteis, facilitando o trabalho em museus e laboratórios. Destaca-se a eficácia do espectrômetro FRX na seleção preliminar de materiais para análises posteriores mais sofisticadas.

Em um espectrômetro de fluorescência de raios-X, raios-X de alta energia são emitidos em direção à amostra, interagindo com seus átomos. Essa interação produz a fluorescência de raios-X, que é separada em níveis de energia por um detector especial que realiza a dispersão por energia. O espectro resultante é analisado para identificar os elementos químicos presentes na amostra e suas concentrações.

O equipamento de XRF consiste em uma fonte de raios X, colimadores, cristais, detectores e um sistema de análise de dados. A Figura 2.9 demonstra o modelo representativo do funcionamento da Fluorescência de Raios-X, onde a fonte de raios X, frequentemente um tubo de raios X do tipo *End-window*, gera elétrons por emissão termiônica. Esses elétrons são acelerados em direção a um ânodo, onde colidem e produzem raios X primários. Uma pequena fração da energia cinética dos elétrons é convertida em raios X úteis, enquanto a maior parte é transformada em calor.

Figura 2.9 – Modelo representativo do funcionamento da Fluorescência de Raios-X.



Fonte: Adaptado de (ANZOLIN; DANI, 2014).

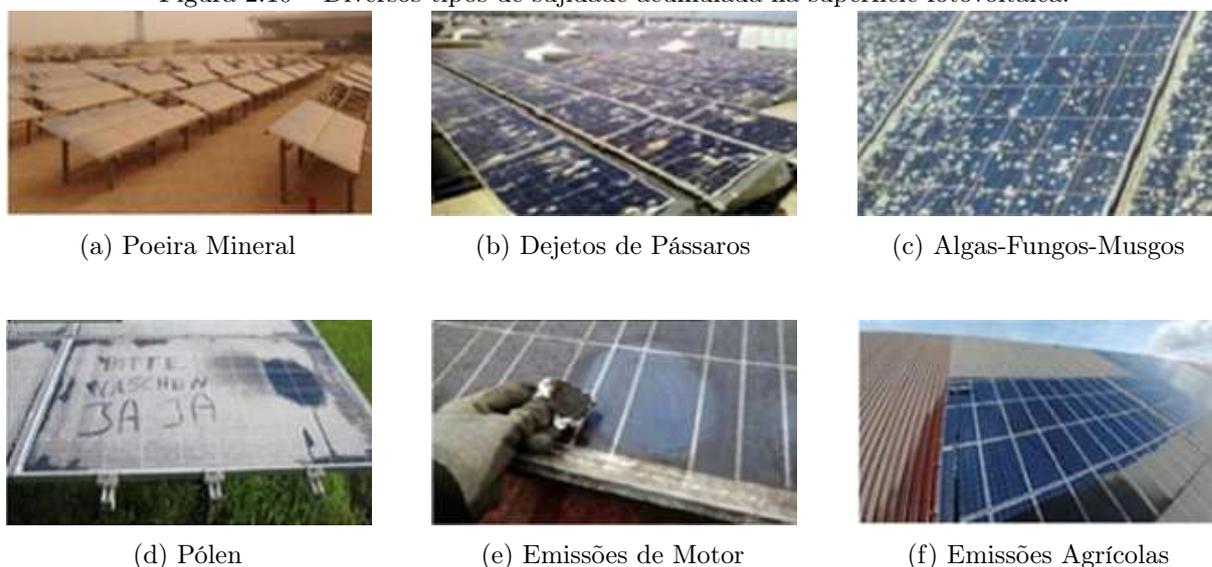
A caracterização química de amostras de sujidade em módulos fotovoltaicos é essencial para compreender os impactos das partículas depositadas na eficiência dos sistemas fotovoltaicos. A difração de raios X (XRD) e a fluorescência de raios X (XRF) são técnicas analíticas amplamente utilizadas para essa finalidade devido a sua capacidade de fornecer informações detalhadas sobre a composição dos materiais.

2.3.4 Impacto da Sujidade sobre o Desempenho de Módulos Fotovoltaicos

A pesquisa de Salamah *et al.* (2022) indica que a configuração de orientação e ângulo dos módulos fotovoltaicos influencia diretamente a quantidade de poeira acumulada. Ajustes específicos na inclinação podem diminuir significativamente a deposição de poeira, com variações no efeito devido às características do vento. Além disso, o aumento da umidade relativa do ar intensifica a condensação de vapor d'água nas superfícies dos módulos, o que resulta em maior aderência de poeira devido à ação das forças capilares.

Contudo, tais dispositivos apresentam vulnerabilidade à acumulação de poeira, o que pode impactar significativamente seu desempenho. Conforme ilustrado na Figura 2.10, observa-se diferentes tipos de sujidade que podem se acumular nos módulos fotovoltaicos, todos os casos com potencial de promover alterações significativas em seu desempenho.

Figura 2.10 – Diversos tipos de sujidade acumulada na superfície fotovoltaica.



Fonte: Kazem (2023).

Essas partículas não só reduzem a irradiação solar que chega aos módulos, comprometendo a eficiência, como também podem causar abrasão na superfície dos módulos fotovoltaicos, degradando ainda mais sua eficiência (KAZEM, 2023). As Equações 2.2 e 2.3 são aplicadas para analisar a eficiência e a perda de desempenho dos módulos fotovoltaicos em diferentes condições de sujeira (RASHID *et al.*, 2023).

$$\eta_{mdulo} = \frac{P_{max}}{G \times A} \quad (2.3)$$

Onde P_{max} é a potência máxima (Watt), G é o fluxo de radiação incidente (W/m^2) e A é a área do módulo (m^2).

$$\%redução = \frac{\eta_{limpo} - \eta_{sujo}}{\eta_{limpo}} \times 100 \quad (2.4)$$

Sendo esta equação utilizada para calcular a redução percentual na eficiência de um módulo limpo (η_{limpo}) em comparação com um módulo sujo (η_{sujo}).

No setor de energia solar, é fundamental entender a sujidade e seus efeitos para assegurar a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos. Pesquisas contínuas e o desenvolvimento de tecnologias específicas são necessários para combater os impactos da sujidade, que é um problema global e afeta a eficiência dos sistemas em diversas regiões. Uma análise minuciosa das condições locais é essencial para criar soluções adaptadas às diferentes situações ambientais.

2.4 Termografia

2.4.1 Fundamentos da Termografia

Segundo Usamentiaga *et al.* (2014), a termografia infravermelha (IRT) é uma técnica que envolve a obtenção e análise de informações térmicas utilizando dispositivos de medição que não requerem contato físico. Fundamenta-se na emissão de radiação infravermelha, um tipo de radiação eletromagnética com comprimentos de onda superiores aos da luz visível. Todo objeto com temperatura acima do zero absoluto ($T > 0$ K) emite essa radiação.

De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021): “O método da termografia infravermelha consiste na captação da radiação infravermelha naturalmente emitida pelos corpos, por meio de sistemas de infravermelho que convertem essa radiação em imagens térmicas visíveis, com a possibilidade de medições de temperatura”.

A termografia encontra uma vasta gama de aplicações em diversas áreas. Pode ser usada amplamente na saúde, como nos esportes (NOBRE; CAPERUTO, 2024), medicina (VITORINO *et al.*, 2023), medicina veterinária (OLIVEIRA *et al.*, 2023), fisioterapia (LYRA *et al.*, 2020). Nos diversos setores das indústrias, como automotiva (SCHMITZ; OLIVEIRA; HENNING, 2022), aeronáutica (FARMAKI *et al.*, 2020), siderúrgica (MORALES-CERVANTES *et al.*, 2024), petroquímica (SOUZA; LÓPEZ; MALDAGUE, 2024), metalúrgica (SPECHT; FRIEDRICH, 2023), elétrica (GLOWACZ, 2023), eletrônica (KAIŪŽA; HATZOPOULOS, 2024). A termografia é amplamente utilizada em diversas áreas, como na avaliação de desempenho de equipamentos e componentes de máquinas, no controle de qualidade de produtos e na validação de processos.

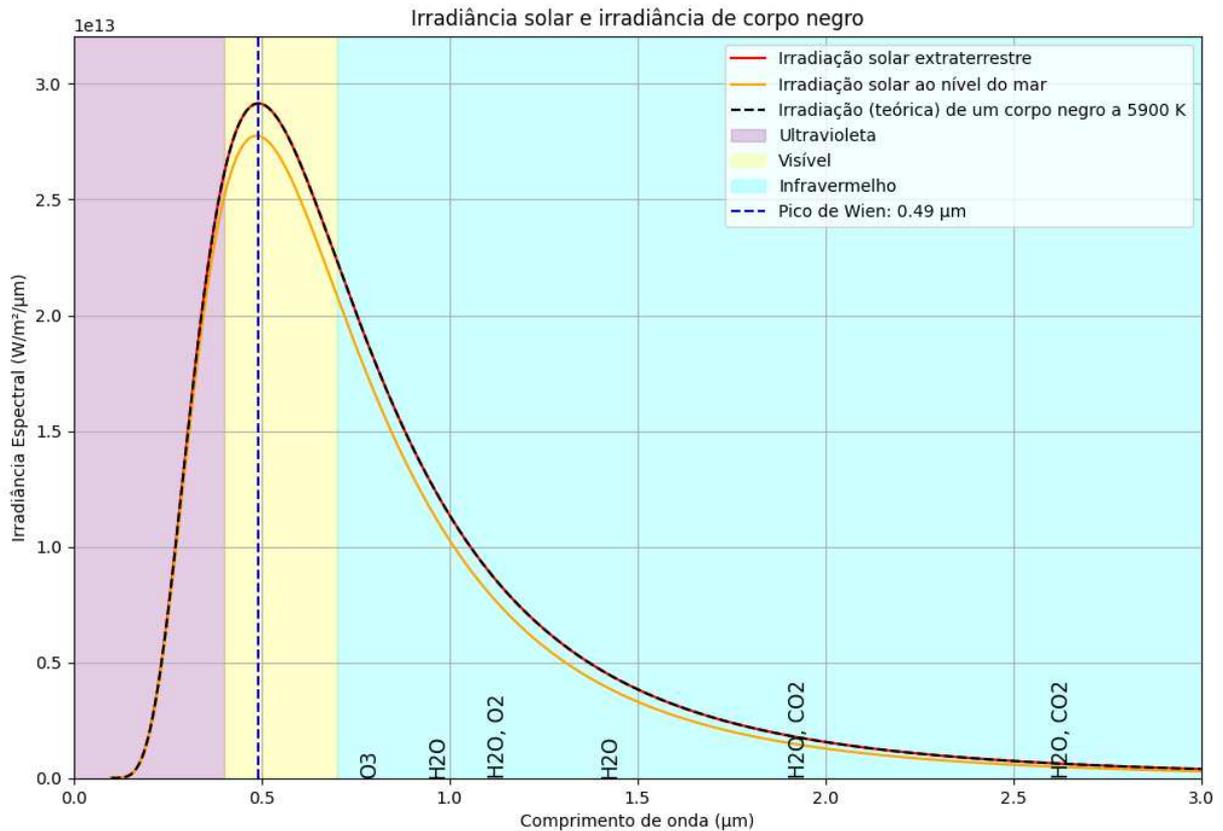
Na termografia, a estimulação do componente ocorre termicamente sem contato direto, pela absorção da radiação. A radiação térmica refletida também é registrada por um detector infravermelho sem contato. As leis que norteiam a radiação térmica são fundamentais para entender a emissão de energia pelos corpos em função de sua temperatura.

A Lei de Stefan-Boltzmann afirma que a potência radiada por um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, expressa pela equação $P = \sigma T^4$, onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A Lei de Planck (Equação 2.5) descreve a radiancia espectral de uma superfície ideal em função da temperatura, e a Lei de Wien relaciona a temperatura de um corpo com o comprimento de onda no qual a emissão de radiação é máxima, dada por $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$. Nesta última, b é a constante de deslocamento de Wien, indicando que a radiação máxima desloca-se para menores comprimentos de onda à medida que a temperatura aumenta.

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.5)$$

A radiação solar ao nível do mar é modificada pela absorção de gases atmosféricos como O_3 , H_2O , O_2 , CO_2 , que possuem bandas de absorção específicas no infravermelho, criando depressões na curva de irradiância. Assim, o gráfico da Figura 2.11 ilustra como a radiação solar é alterada pela atmosfera terrestre, conforme descrito pela Lei de Planck, com a Lei de Wien indicando o pico de emissão.

Figura 2.11 – Modificação da radiação solar ao passar pela atmosfera da Terra.



Fonte: o autor.

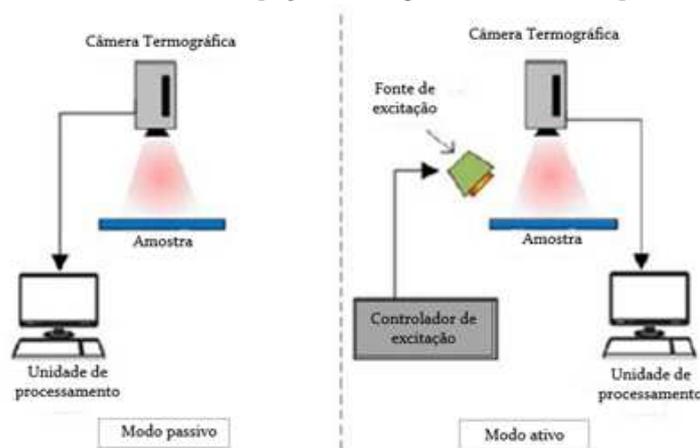
Conforme Bergman *et al.* (2017), a emitância espectral, que é a taxa de energia liberada por unidade de área, varia com a temperatura e o comprimento de onda. Conforme a Lei de Wien, temperaturas mais altas resultam em comprimentos de onda menores na emissão máxima, e essa emissão diminui à medida que se afasta desse pico. Esses princípios, embora ideais, são cruciais para explicar o comportamento radiativo dos corpos reais e na seleção de termovisores adequados.

2.4.2 Métodos e Equipamentos Utilizados em Inspeções Termográficas

No estudo da termografia, existem duas abordagens essenciais: a qualitativa e a quantitativa. A termografia qualitativa identifica visualmente anomalias térmicas, detectando problemas como pontes térmicas, vazamentos de ar e umidade. Já a termografia quantitativa determina os valores das temperaturas para calcular perdas energéticas, avaliar a eficiência de isolamento e identificar defeitos estruturais. Apesar da evolução da técnica, a termografia ainda é amplamente utilizada para avaliações qualitativas de fenômenos térmicos (FERREIRA, 2018), permitindo uma análise abrangente do desempenho térmico de estruturas ao combinar facilidade de uso com precisão e detalhamento.

Bauer *et al.* (2015) diferenciam termografia ativa de passiva, que são representadas na Figura 2.12. A termografia passiva envolve a monitorização da temperatura de componentes ou elementos para identificar anomalias através de desvios e alterações térmicas, destacando áreas com temperaturas diferentes (pontos quentes ou frios) para identificar elementos danificados. Por outro lado, a termografia ativa examina o comportamento do componente sob estimulação térmica, que pode ser aplicada em intervalos (termografia pulsada) ou de maneira contínua (aquecimento em etapas).

Figura 2.12 – Técnica de inspeção termográfica nos modos passivo e ativo.



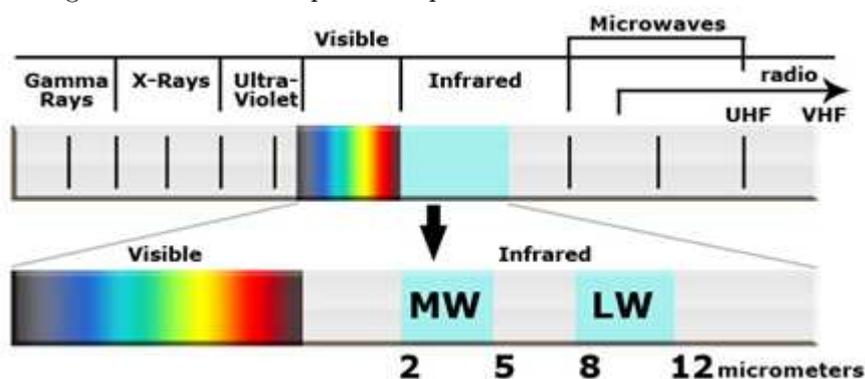
Fonte: adaptado de Yee et al. (2022).

Superfícies reais emitem quantidades menores de radiação comparadas a um corpo negro sob as mesmas condições de temperatura, devido a variações na emissividade, que é afetada tanto pelo comprimento de onda quanto pela direcionalidade da emissão e temperatura. A emissividade de uma estrutura é também influenciada por outros fatores, incluindo o tipo de material e a rugosidade da superfície (PEETERS *et al.*, 2016).

Além disso, o entendimento correto da emissividade é crucial para a termografia, exigindo análises tanto antes quanto após a aquisição dos dados termográficos. A termografia infravermelha é fundamentada em princípios físicos e regulamentada por normas. A técnica tem a capacidade de fornecer medições térmicas não invasivas, e sua aplicabilidade é vasta.

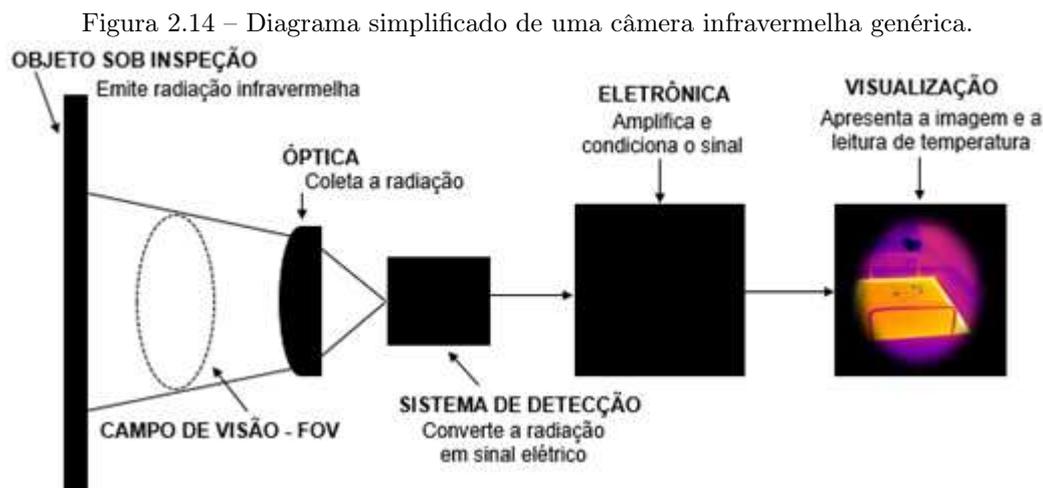
Um fator fundamental na avaliação do desempenho de um dispositivo infravermelho é a sua resposta espectral. Os fabricantes geralmente selecionam uma ou duas subfaixas específicas do espectro infravermelho para que o dispositivo opere. Equipamentos que funcionam na faixa do infravermelho médio (MWIR), com resposta espectral de $2,0 \mu\text{m}$ a $5,6 \mu\text{m}$, são principalmente utilizados para monitoramento interno, devido à sua elevada sensibilidade. Em contrapartida, dispositivos que operam na faixa do infravermelho longo, com resposta espectral de $8 \mu\text{m}$ a $14 \mu\text{m}$ (LWIR), são destinados ao monitoramento externo, facilitando a observação de objetos a grandes distâncias. Essas faixas operacionais são mostradas na Figura 2.13. A resposta espectral é uma característica inerente ao equipamento, variando de acordo com o modelo e o fabricante (ROCHA, 2006).

Figura 2.13 – Faixas espectrais típicas dos termovisores comerciais.



Fonte: INFRATHERM (2024).

A construção do termovisor é semelhante à de uma câmera, com uma lente que foca a radiação infravermelha em um elemento detector. O detector é uma matriz de plano focal (*Focal Plane Array – FPA*) de pixels de tamanho micrométrico, feitos de materiais sensíveis aos comprimentos de onda na faixa do infravermelho. A resolução do FPA pode variar o número de pixels. A maioria dos termovisores possui *software* integrado que permite ao usuário focar em áreas específicas do FPA e calcular a temperatura, enquanto outros sistemas utilizam um computador ou sistema de dados com *software* especializado para fornecer análise de temperatura (SANTOS, 2006), conforme Figura 2.14.



Fonte: Adaptada de (SANTOS, 2006).

A termografia oferece a conveniência de medir temperaturas à distância, onde a interação direta frequentemente representa riscos ou desafios operacionais. No entanto, a eficácia dessa técnica pode ser afetada por gases como vapor d'água e CO_2 , que absorvem radiação térmica, aumentando a atenuação do sinal em distâncias maiores. Essa situação é destacada por Ferreira (2015), que ressalta as implicações da atenuação causada pela composição atmosférica nos dados termográficos.

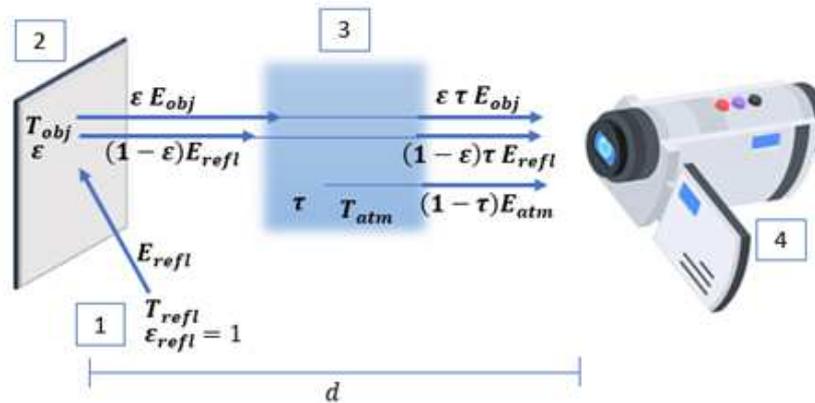
Em cenários industriais, a presença de janelas ou barreiras transparentes adiciona outra camada de complexidade, pois essas estruturas podem ter bandas de transmissão que não coincidem com as capacidades de detecção dos termovisores. Portanto, é crucial ajustar a emissividade no dispositivo de termografia para corresponder à emissão real da superfície examinada, garantindo assim uma melhora na qualidade das medições térmicas e compensando adequadamente quaisquer sinais indesejados que possam ocorrer.

A Figura 2.15 ilustra esquematicamente as três componentes do sinal de radiação que chegam ao termovisor, ajustadas pela atenuação atmosférica: a radiação emitida pelo próprio objeto ($\varepsilon\tau E_{obj}$), a radiação refletida pela superfície a partir das proximidades ($(1 - \varepsilon)\tau E_{refl}$), e a radiação emitida pela atmosfera ($(1 - \tau)E_{atm}$). O sinal de radiação que chega à matriz de detectores térmicos do termovisor é a soma dessas três parcelas (TEIXEIRA, 2012), como indicado na Equação 2.5.

$$E_{tot} = \varepsilon\tau E_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau E_{refl} + (1 - \tau)E_{atm} \quad (2.6)$$

Neste modelo, são assumidas algumas considerações prévias. Primeiro, tanto o objeto quanto a atmosfera comportam-se como corpos cinzentos, onde a emissividade (ε) e a absortividade (α) são iguais. Segundo, o objeto é considerado um meio opaco, onde a transmissividade é nula e a refletividade é $(1 - \varepsilon)$. Por fim, assume-se que a atmosfera não reflete radiação, resultando em uma emissividade de $(1 - \tau)$.

Figura 2.15 – Parcelas que compõem o sinal de radiação na medição termográfica.



Fonte: Adaptado de FLIR (2011).

Uma vez fornecidas a emissividade (ε), a distância (relacionada a τ), a temperatura média refletida (definindo E_{refl}), e a temperatura atmosférica (definindo E_{atm}), a termocâmara compensa o sinal total de radiação recebido. A Equação 2.6 descreve o sinal radiométrico incidente no termovisor, mas o sinal efetivamente interpretado pelo equipamento é menor. A função de sensibilidade espectral relativa, $S_k(\lambda)$, é determinada pela detectividade normalizada $D(\lambda)$ do detector. Isso facilita uma comparação precisa entre detectores similares, porém de tamanhos variados.

O fator de conversão é um parâmetro de modelo que estabelece a relação entre a radiação térmica captada e o sinal eletrônico resultante. Esse parâmetro, geralmente expresso em $\mu V/Wm^{-2}$, varia conforme a temperatura, permitindo que o termovisor realize um ajuste preciso e mantenha um equilíbrio dos sinais eletrônicos. Na termografia, os sinais eletrônicos são essenciais para transformar a radiação térmica captada pelas câmeras em imagens úteis para análise. Esses sinais são gerados quando a energia térmica emitida por um objeto é detectada pelo sensor infravermelho do termovisor, convertendo essa energia em sinais elétricos que variam de acordo com a intensidade da radiação recebida.

Uma solução comum para enfrentar a interferência da radiação externa em inspeções termográficas é a utilização de anteparos, criando uma área sombreada que bloqueia a radiação de outras fontes; entretanto, essa abordagem não é viável em plantas solares devido a questões de segurança e ao impacto direto na operação dos módulos fotovoltaicos. Em resposta a isso, a norma (ASTM INTERNATIONAL, 2022) fornece diretrizes para as medições de emissividade e temperatura corretas por meio de termografia, incluindo o uso de folha de alumínio corrugada para estimar corretamente a temperatura média refletida, assegurando leituras de temperatura mais confiáveis mesmo nesses contextos desafiadores. Este estudo contempla, no capítulo de metodologia, uma proposta de condução de experimentos em laboratório para estimativa de propriedades ópticas de módulos fotovoltaicos utilizando a termografia.

O *software* embarcado nos termovisores é fundamental para interpretar os sinais eletrônicos, utilizando algoritmos para ajustar e compensar variações de temperatura ambiente, emissividade do objeto e outros fatores ambientais. Ele também facilita a visualização de dados, convertendo sinais elétricos em imagens térmicas coloridas que favorecem a distinção de temperaturas entre os pontos na imagem. Essas imagens formadas são importantes para uma análise detalhada e para a identificação de padrões térmicos que podem sinalizar problemas, buscando antecipar falhas e otimizar a manutenção de sistemas e instalações.

2.4.3 Termografia em Usinas Solares Fotovoltaicas

A necessidade de inspeções regulares nas usinas solares fotovoltaicas é enfatizada pela contínua expansão deste setor e pelo compromisso com a manutenção dos sistemas já instalados. A termografia se destaca como uma técnica eficiente e não invasiva para tais inspeções. Especificamente na análise da superfície frontal dos módulos fotovoltaicos de silício, deve-se reconhecer que tanto as propriedades de emissão quanto de reflexão variam em função do ângulo da câmera termográfica e da temperatura operacional do módulo. Adicionalmente, os módulos fotovoltaicos tendem a operar em temperaturas acima do ambiente externo devido à conversão de parte da energia solar em calor residual. Este calor é dissipado principalmente através de convecção e radiação, processos esses que ajudam a equilibrar a temperatura do módulo e garantir sua eficiência operacional.

Conforme Muttillio *et al.* (2020), a termografia infravermelha tem se mostrado eficaz no diagnóstico de sistemas fotovoltaicos, oferecendo benefícios significativos. Entre eles estão a capacidade de detectar problemas de forma não invasiva e não destrutiva, a possibilidade de realizar inspeções rápidas em extensas áreas, além de permitir que o sistema fotovoltaico continue operando normalmente durante o diagnóstico. No entanto, a precisão das medições termográficas pode ser comprometida por diversos fatores, dentre eles a variação de emissividade nas superfícies dos módulos fotovoltaicos, que se mostra como um dos principais desafios, sendo capaz de afetar a precisão das leituras.

A Figura 2.16 ilustra os principais aspectos da manutenção de sistemas fotovoltaicos, incluindo sujidade, modelos de falhas, termografia e eletroluminescência, desempenho, e riscos na operação e manutenção. Foram identificados itens básicos para minimizar perdas de produção de energia: inspeção de campo, identificação de sensores de irradiação, avaliação da produção, testes de módulos e *strings* fotovoltaicos, uso de câmeras termográficas e de eletroluminescência, monitoramento das *strings* DC de cada inversor e observação do MPPT. Esses métodos ajudam a encontrar e reparar erros, evitando perdas e melhorando o desempenho dos sistemas fotovoltaicos (HERNÁNDEZ-CALLEJO; GALLARDO-SAAVEDRA; ALONSO-GÓMEZ, 2019).

Figura 2.16 – Manutenção de projeto de sistemas fotovoltaicos.



Fonte: adaptado de Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019).

Uma limitação da termografia é que as câmeras detectam intensidades de radiação infravermelha em vez de temperaturas diretamente. Isso pode levar a erros, pois a radiação infravermelha pode ser emitida pelo próprio objeto, por fontes externas (por exemplo, o Sol) ou refletida por superfícies próximas, exigindo que o avaliador diferencie entre essas fontes. Além disso, condições ambientais como a carga solar, o vento e a chuva podem afetar significativamente a precisão da termografia, tornando necessário o controle desses fatores para minimizar interferências climáticas (Comunidad de Madrid, 2011).

A adoção de inspeções regulares por meio da termografia infravermelha é fundamental para a manutenção eficiente das usinas solares fotovoltaicas. Esta técnica não invasiva permite diagnósticos rápidos, garantindo a continuidade operacional e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. No entanto, é imperativo que os profissionais considerem as limitações inerentes à técnica e as variáveis ambientais que podem influenciar a precisão das medições, a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados e otimizar o desempenho energético da instalação.

2.4.4 Estudos de Caso Envolvendo Impacto de Sujidade

Um dos limitadores enfrentados pela termografia, a sujidade nos módulos fotovoltaicos (Figura 2.17) representa um desafio significativo para a manutenção eficiente das usinas. A acumulação de poeira, sujeira e outros detritos na superfície dos módulos pode alterar a emissividade e a distribuição térmica, dificultando a detecção de falhas internas.

Para avaliar a sujidade em módulos fotovoltaicos podem ser utilizadas diversas métricas, conforme detalhado por Rezende e Zilles (2018): (a) obtenção da potência máxima e da corrente de curto-circuito através de medições de corrente (I) e tensão (V), gerando curvas $I \times V$; (b) avaliação da corrente de curto-circuito, que é diretamente proporcional à irradiância recebida pelo módulo. Este método é mais rápido e não exige equipamentos sofisticados, sendo adequado quando a acumulação de sujeira é uniforme e não causa descasamentos elétricos entre as células do módulo; (c) avaliação da taxa de desempenho do sistema em termos de produtividade de energia, considerada a mais precisa para medir a perda real do sistema fotovoltaico, especialmente quando comparada à avaliação da corrente de curto-circuito.

Figura 2.17 – Módulo fotovoltaico limpo em contraste com módulo fotovoltaico sobre efeito de sujidade urbana.



Fonte: o autor.

A eficiência das células fotovoltaicas varia entre 14% e 20%, dependendo do tipo de módulo fotovoltaico. Dado que as células dependem diretamente da incidência solar, é fundamental realizar sua limpeza periódica para garantir a captação máxima de fótons. O acúmulo contínuo de sujeira por longos períodos pode reduzir significativamente o desempenho do sistema, tornando a manutenção regular essencial. Os resultados indicam que a limpeza em intervalos inferiores a 15 dias não é necessária. Em muitas instalações a limpeza regular dos módulos é indispensável, embora isso aumente os custos de manutenção (JÚNIOR; CRUZ; AMARAL, 2018).

A sujidade nos módulos fotovoltaicos varia significativamente conforme a localização geográfica e as condições ambientais. Em Bagdá (Irão), observou-se uma redução de eficiência de 63,70% após 90 dias de exposição, principalmente devido ao acúmulo de poeira e poluentes em um ambiente seco e poluído. De maneira semelhante, em Latipur (Nepal), a eficiência dos módulos diminuiu 29,76% após 150 dias, resultante da deposição de poeira, poluentes e partículas suspensas no ar (ARAÚJO *et al.*, 2020).

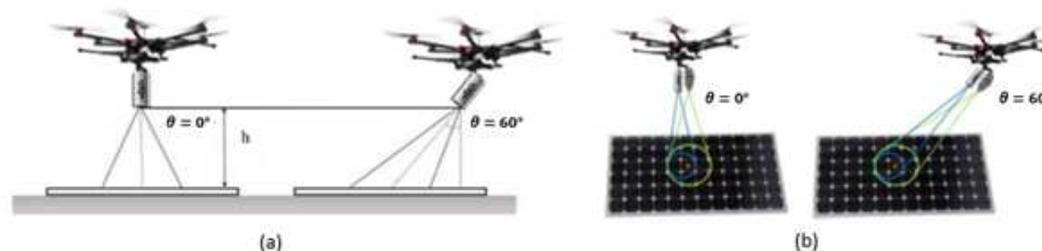
Portanto, a sujidade nos módulos fotovoltaicos constitui um desafio para a manutenção eficiente das usinas, pois o acúmulo de poeira dificulta a detecção precisa de falhas internas. Ferramentas de monitoramento, como o cálculo de *Performance Ratio* (PR) e *softwares* SCADA, são novas ferramentas para identificar rapidamente quando a eficiência está sendo impactada pela sujidade (ARAÚJO *et al.*, 2020). Além disso, a implementação de sistemas de limpeza automática e revestimentos antiaderentes, incluindo a instalação adequada dos módulos e o uso de barreiras protetoras, são fundamentais para assegurar o desempenho otimizado dos sistemas fotovoltaicos.

2.4.5 Desafios e Perspectivas Futuras

A implementação da termografia infravermelha nas usinas fotovoltaicas apresenta desafios significativos, especialmente relacionados à variabilidade das propriedades ópticas dos módulos fotovoltaicos. A termografia é uma técnica não invasiva que possibilita a detecção de problemas térmicos enquanto os sistemas continuam em operação. No entanto, a eficácia dessa técnica é muitas vezes comprometida por fatores ambientais, como a variabilidade da emissividade e refletividade dos materiais dos módulos em função da deposição progressiva de sujeira e as condições climáticas que podem afetar as medições térmicas.

A utilização da termografia para manutenção em usinas fotovoltaicas enfrenta desafios significativos devido à interferência da radiação infravermelha externa. Fatores como radiação solar, vento e chuva podem introduzir erros nas medições, exigindo um controle rigoroso dessas variáveis durante as inspeções. Além disso, a presença de anteparos ou barreiras transparentes pode comprometer a precisão dos dados ao alterar a transmissão da radiação. Entre os principais fatores que afetam a precisão das medições, destaca-se o ângulo de visada, como pode ser observado na Figura 2.18, onde a termografia é feita pelo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em diferentes ângulos de visada ($\theta = 0^\circ$ e 60°), ângulo que é definido entre a projeção do campo de visão da câmera e a direção perpendicular à superfície do módulo fotovoltaico (MUNIZ; MENDES, 2019).

Figura 2.18 – Inspeção termográfica utilizando Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) sob diferentes ângulos de visada: (a) Vista de perfil, (b) Vista superior.



Fonte: Adaptada de Ramírez, Das e Márquez (2021).

Conforme observado por Ferreira (2018), é fundamental estabelecer claramente o objetivo ao realizar inspeções termográficas em módulos solares: enquanto uma inspeção global facilita a rápida identificação de anomalias térmicas, uma abordagem detalhada, examinando cada módulo individualmente, é mais adequada para obter estimativas precisas das temperaturas de operação. Para assegurar que a medição termográfica seja quantitativa e confiável, é indispensável estimar corretamente fatores como a distância entre o termovisor e o alvo, a temperatura ambiente, a temperatura média refletida e, especialmente, a emissividade da superfície, sendo que esta possui dependência direcional.

A sujidade nos módulos fotovoltaicos é um desafio particular para uma manutenção adequada. O acúmulo de poeira, sujeira e outros detritos na superfície pode alterar a distribuição térmica, dificultando a detecção de falhas internas. Para mitigar esses efeitos e garantir o desempenho eficiente das usinas, são utilizadas ferramentas de monitoramento, sistemas de limpeza automatizados e revestimentos antiaderentes. Estudos na literatura mostram que a perda de desempenho devido à sujidade varia entre 1% e 60%, dependendo da região e do ângulo de inclinação dos módulos (COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2021).

A previsão das futuras tendências na inspeção de sistemas fotovoltaicos apresenta um grande desafio, considerando a rápida evolução tanto das tecnologias quanto das demandas dos usuários. Entretanto, é evidente que o crescimento significativo das instalações fotovoltaicas, como parte integrante do diagnóstico de falhas e dos cronogramas de operação e manutenção (O&M) para usinas fotovoltaicas em grande escala (fazendas solares, por exemplo), não poderá ser gerido apenas por mão de obra manual. Será necessário um processo completamente automatizado.

Isso inclui o uso de agentes autônomos, como sistemas aéreos não tripulados (UAS) e robôs, capazes de substituir de forma eficaz as operações manuais. Além disso, a microeletrônica avançada pode possibilitar a incorporação de inteligência nos próprios sistemas fotovoltaicos, permitindo maior autonomia e capacidade de adaptação. Esses avanços são fundamentais para o desenvolvimento de fazendas solares inteligentes, operando sem a necessidade de intervenção constante de operadores, elencado com a conformidade com as normas e especificações técnicas designadas, diagnóstico de falhas baseado em termografia infravermelha de última geração e processamento de imagem térmica são apresentados junto com perspectivas e desafios futuros (HØIAAS *et al.*, 2022).

2.5 Incertezas de Medição

Estimar incertezas tem como objetivo garantir que uma determinada medição está dentro de limites aceitáveis, compatível com tolerâncias previamente estabelecidas. Para garantir que as estimativas das incertezas e, conseqüentemente, o procedimento de medição sejam confiáveis e reproduzíveis, é necessário utilizar uma referência amplamente aceita. O Guia para a Expressão da Incerteza na Medição (GUM) foi criado exatamente para esse propósito. Publicado em 1993 por sete importantes organizações internacionais no campo da metrologia (BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML), o GUM consolidou-se como o documento de referência oficial para a expressão da incerteza em medições. Em 1995, uma versão ligeiramente revisada foi lançada e, desde então, diversos países e organizações o adotaram como padrão ou base para desenvolver normas específicas, refletindo sua importância e ampla aceitação no domínio da metrologia (BICH; PENNECCHI, 2006).

A principal aplicação do GUM está na avaliação de medições indiretas, onde a incerteza da variável de saída é derivada das incertezas das variáveis de entrada. Para este propósito, a Equação 2.7 constitui a denominada ‘Lei de Propagação de Incertezas’:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 u(x_i)u(x_j) \quad (2.7)$$

Frequentemente, assume-se que não há correlação entre as variáveis de entrada, o que permite simplificar a equação ao cancelar o segundo termo do lado direito da Equação 2.6. Quando o segundo termo é cancelado, a equação de estimativa da incerteza combinada, considerando a ausência de correlação entre as variáveis de entrada, é simplificada e reescrita na forma da Equação 2.8.

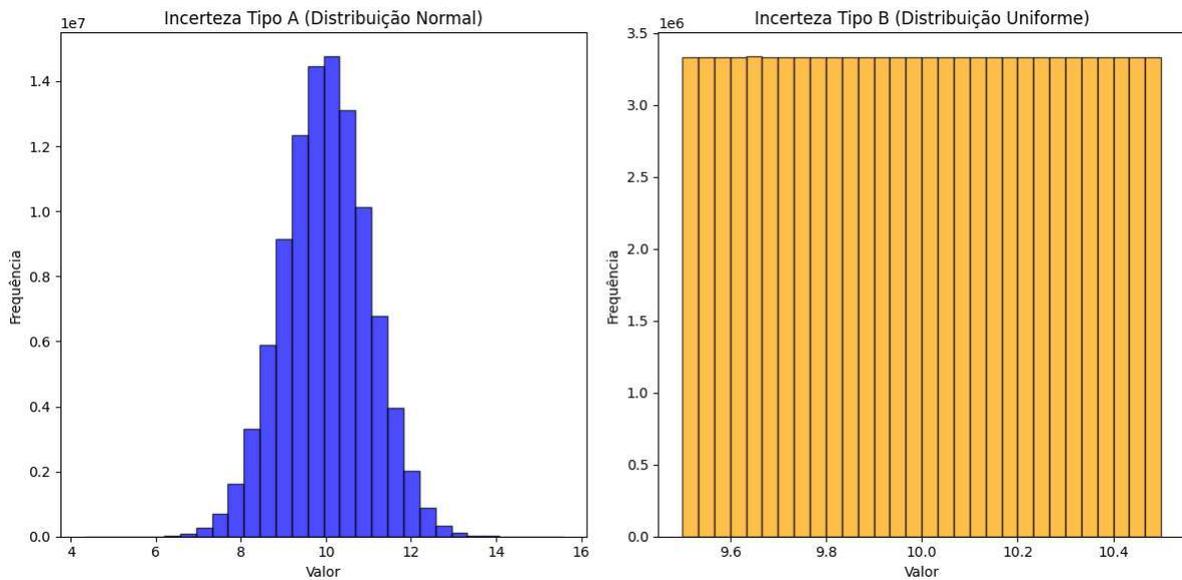
$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.8)$$

Isso significa que a incerteza combinada, $u_c(y)$, é calculada apenas com base nos coeficientes de sensibilidade da função e nas incertezas individuais das variáveis de entrada $u(x_i)$, sem considerar as correlações entre elas. Na análise de incertezas, é importante proceder com uma avaliação estatística apropriada do mensurando, assegurando que a amostra dos resultados de medição seja representativa. Deve-se equilibrar a precisão com a viabilidade prática das medições, especialmente em inspeções termográficas, onde a variabilidade das condições pode impactar significativamente os resultados.

O GUM categoriza as incertezas em Tipo A e Tipo B. A incerteza do Tipo A é obtida através de métodos estatísticos, utilizando o desvio padrão de uma série de medições repetidas, geralmente resultando em uma distribuição normal (sino) que indica que a maioria das medições está próxima da média. Em contraste, a incerteza do Tipo B é determinada por métodos não estatísticos, baseados em julgamentos informados, especificações de instrumentos e dados históricos, geralmente resultando em uma distribuição uniforme onde todas as medições têm a mesma probabilidade de ocorrer dentro de um intervalo específico. A Figura 2.19 apresenta exemplos de distribuição de probabilidade do tipo normal (à esquerda) e retangular (à direita). Uma suposição importante considerada é que as fontes de incerteza das variáveis não são correlacionadas, pois cada uma é medida ou estimada usando métodos independentes (HABTE *et al.*, 2014).

Essas duas categorias abrangem quase todas as fontes de incerteza em medições científicas. É essencial que o método de avaliação e expressão da incerteza seja uniforme globalmente, permitindo que as medições realizadas em diferentes países ou localidades sejam facilmente comparáveis (International Organization for Standardization, 2008).

Figura 2.19 – Exemplos de distribuições de probabilidade.



Fonte: o autor.

Segundo Tejedor, Lucchi e Nardi (2022), a termografia infravermelha é amplamente utilizada para identificar anomalias térmicas e danos em edificações, permitindo a realização de análises qualitativas e quantitativas. Esse método, que possui vasta aplicação em diversos campos, como no estudo da energia solar, destaca-se pela sua versatilidade e precisão na detecção de falhas. A aplicação do GUM na termografia é essencial, pois permite identificar e quantificar fontes de erros e de incertezas como emissividade do material, reflexão de radiação ambiental e distância da câmera ao objeto (SILVA, 2017). A metodologia GUM melhora a confiabilidade das medições termográficas, garantindo que o resultado da medição seja a melhor estimativa do valor do mensurando, considerando todas as incertezas, incluindo efeitos sistemáticos e correções.

3 Metodologia

A utilização da inspeção termográfica para diagnóstico em usinas fotovoltaicas, tanto como indicador térmico quanto elétrico no contexto da manutenção preventiva, é uma prática comum na indústria do ramo. No entanto, é importante ressaltar que essas inspeções estão sujeitas a diversas fontes de interferência, desde as habilidades técnicas do operador encarregado pela inspeção até fatores ambientais inerentes.

Quando as inspeções são realizadas em ambiente externo, é impossível controlar essas fontes de interferência, em particular, aquelas que são consideradas variáveis de entrada do modelo matemático da medição; tais variáveis podem apenas ser observadas e registradas. De forma alinhada aos objetivos do presente trabalho, a investigação experimental das propriedades ópticas da superfície frontal dos módulos fotovoltaicos foi conduzida em ambiente interno, em condições controladas. Tal abordagem inclui a manutenção de um ambiente climatizado e a eliminação de fontes externas de radiação que pudessem afetar os resultados do experimento.

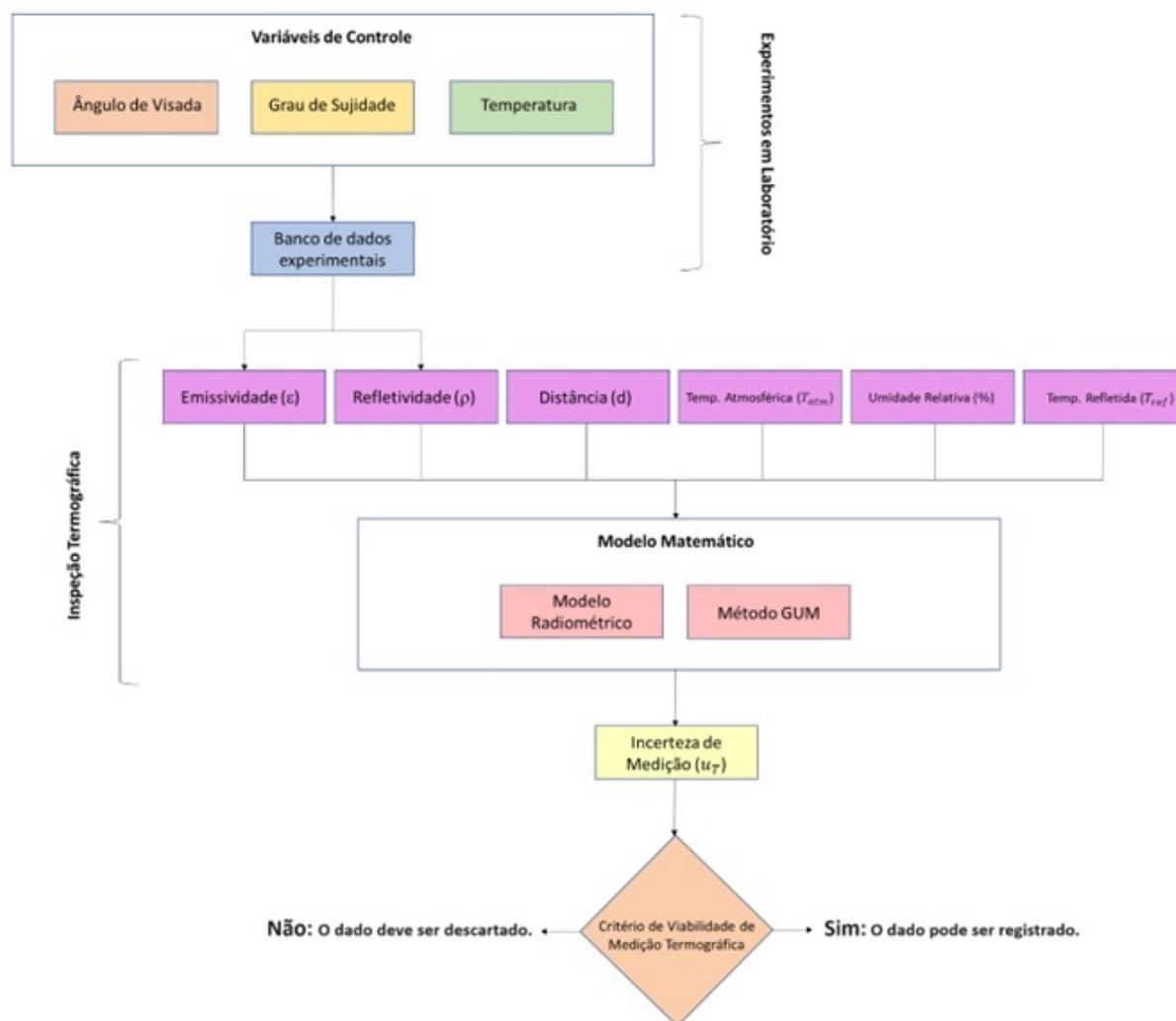
As inspeções termográficas realizadas no Laboratório de Termometria (LabTerm) forneceram uma base de dados para a determinação da emissividade e refletividade direcionais da superfície dos módulos fotovoltaicos. Além disso, essas inspeções também envolveram uma caracterização das principais fontes de incerteza envolvidas, levando a uma estimativa da incerteza de medição dessas propriedades. O pós-processamento dos dados obtidos durante as inspeções termográficas foi realizado através do *software* FLIR Tools. Por fim, para resolver o sistema de equações que descreve o processo de medição, utilizou-se o *software* EES (*Engineering Equation Solver*).

Uma análise semiquantitativa foi desenvolvida para estimar a porção das amostras de sujidade disponíveis que efetivamente recobriu a superfície do módulo fotovoltaico, durante a fase de aplicação, em cada conjunto de ensaios realizados. No que diz respeito à determinação da composição química de amostras de sujidade em áreas urbanas e minerárias, foram empregados os métodos analíticos de Difração de Raios X (DRX) e Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX). Esses ensaios foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais (LCMM), localizado no Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

Neste trabalho, o Capítulo 3 foi dividido em duas seções distintas. A Seção 3.1 trata da modelagem matemática, apresentando as técnicas utilizadas para solucionar o conjunto de equações que descrevem o modelo matemático de medição embarcado na termocâmera responsável pela coleta de dados termográficos. São apresentadas as ferramentas empregadas na implementação do modelo, bem como na geração dos resultados experimentais com as

suas incertezas associadas. A Seção 3.2 aborda os materiais e métodos, onde é descrito o arranjo experimental a partir do qual foram conduzidas as inspeções termográficas para determinar as propriedades ópticas das superfícies dos módulos fotovoltaicos. Também é apresentada a caracterização do termovisor e suas fontes de incerteza na medição, além do pós-processamento dos dados obtidos nas inspeções. Por fim, são apresentados os métodos de caracterização dos tipos de sujeira aos quais o módulo fotovoltaico foi exposto durante os ensaios. Toda a metodologia que acompanha o desenvolvimento do presente trabalho pode ser resumida na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: o autor.

A primeira fase de desenvolvimento do estudo é constituída por um levantamento experimental, em que foram obtidos valores de emissividade e refletividade direcionais do módulo fotovoltaico ensaiado, tendo como variáveis de controle do experimento o ângulo de visada da câmera termográfica, o tipo de sujidade empregada no ensaio e a temperatura do módulo. Os resultados obtidos em laboratório passaram a constituir um banco de dados de valores das referidas propriedades ópticas, com suas respectivas incertezas associadas.

A segunda parte do presente estudo se dedica à utilização dos resultados obtidos em laboratório como parte integrante do processamento de dados durante inspeções termográficas reais dos módulos fotovoltaicos, em que o ângulo de visada tem interferência direta na qualidade da medição. Além das variáveis ambientais que comumente já são requeridas para a realização de inspeções termográficas (distância, umidade relativa, temperatura atmosférica e temperatura média refletida), a proposta apresentada neste estudo é que o ângulo de visada também seja estimado. Com seu valor, é possível consultar o banco de dados e proceder com uma atualização mais precisa da emissividade e refletividade da superfície inspecionada por termografia. Uma avaliação da propagação das incertezas através do modelo matemático do termovisor permitirá, enfim, estimar a incerteza de medição de temperatura e decidir pela pertinência da utilização da termografia em tais condições apresentadas.

3.1 Modelagem Matemática

Nesta seção são apresentadas as adaptações ao modelo matemático da câmera termográfica necessárias para a avaliação das situações de medição que constituem o presente estudo, bem como a abordagem escolhida para a análise das incertezas associadas à utilização desse modelo. Em particular, para a análise de incertezas foi aplicado o Método GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*).

3.1.1 Modelo Matemático da Câmera

Conforme será detalhado ainda nesta seção, os ensaios de determinação das propriedades ópticas dos módulos fotovoltaicos são compostos por um conjunto de duas medições, fixando a temperatura do módulo e o ângulo de visada do termovisor. Para cada situação de medição tratada em experimento, o primeiro passo da metodologia proposta é recuperar o sinal integral (não compensado) captado pelos sensores da câmera térmica, ajustando a emissividade para 1 (um) e a distância para 0 (zero) nos dados de entrada do programa. A temperatura total T_{full} assim obtida pode então ser convertida no sinal radiométrico total usando a Equação 3.1:

$$E(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S(k)C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{T}) - 1]} d\lambda \quad (3.1)$$

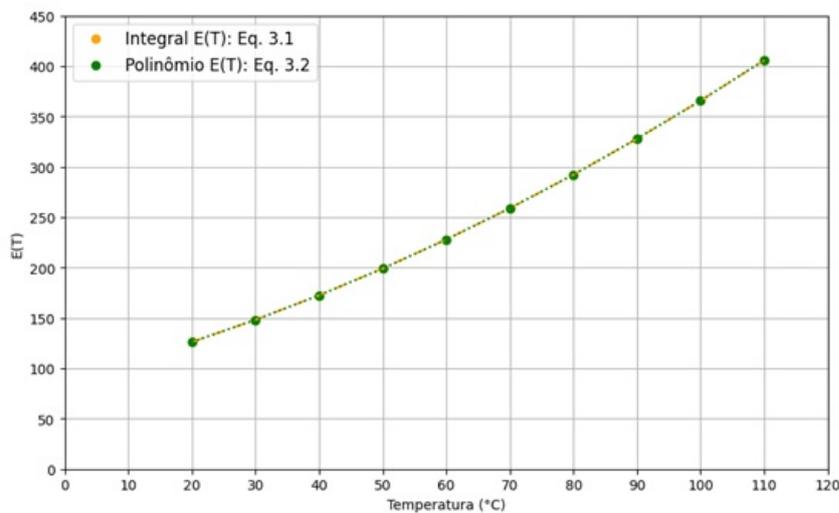
Uma abordagem mais simples de tratamento dos dados experimentais é utilizar um polinômio (de segundo grau) em termos da temperatura T como função de regressão da integral definida pela Equação 3.1. Nesse sentido, uma vez fixado o intervalo espectral de operação da câmera termográfica (7 μm a 14 μm), o sinal radiométrico $E(T)$ definido pela

Equação 3.1 foi estimado por integração numérica para diferentes temperaturas. Ao final, utilizou-se o Excel para se obter uma regressão desses dados na forma de um polinômio de segundo grau. O polinômio assim obtido, Equação 3.2, passa então a substituir a Equação 3.1 sempre que um sinal radiométrico de corpo negro precisar ser estimado na faixa de 7 μm a 14 μm para uma dada temperatura T .

$$E(T) = 0,0113T^2 + 1,6393T + 88,898 \quad (3.2)$$

Para determinar se a aproximação polinomial é válida dentro do intervalo em que se pretende utilizá-la, procedeu-se com uma comparação entre a aproximação polinomial (Equação 3.2) e a integral original (Equação 3.1) dentro de um intervalo entre 20°C e 110°C. A aproximação polinomial apresentou um desvio máximo inferior a 0,04% dentro da faixa avaliada. Um comparativo entre a formulação original para determinação do sinal radiométrico a partir de uma temperatura T e sua respectiva aproximação polinomial é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Comparação entre as aproximações integral e polinomial.



Fonte: o autor.

O modelo radiométrico (Equação 3.3) empregado na medição termográfica é crucial para analisar e interpretar os sinais de radiação térmica detectados pelos sensores infravermelhos. Esses sinais têm origem em três fontes principais: o sinal de emissão do objeto alvo (S_{ob}), o sinal de reflexão a partir desse objeto (S_{ref}) e o sinal referente às influências da atmosfera ao nível do solo (S_{atm}). Sabendo-se que apenas uma parte do sinal radiométrico captado pelo termovisor efetivamente advém da emissão do objeto, torna-se necessário considerar uma série de variáveis para estimar a temperatura associada à superfície alvo analisada (Equação 3.4). Estas variáveis incluem a emissividade da superfície (ε), a refletividade da superfície (ρ), a temperatura média refletida (T_{ref}), a temperatura atmosférica (T_{atm}), a umidade relativa do ambiente ($UR\%$) e a distância entre o termovisor e a superfície alvo (d).

$$S_{tot} = S_{ob} + S_{ref} + S_{atm} \quad (3.3)$$

$$E(T_{full}) = \varepsilon\tau E(T_{ob}) + \rho\tau E(T_{ref}) + (1 - \tau)E(T_{atm}) \quad (3.4)$$

Neste contexto, T_{full} representa a temperatura aparente estimada pelo termovisor, assumindo que a distância entre a câmera e o objeto é zero, e a emissividade é unitária (similar à emissão de um corpo negro). Por outro lado, o símbolo τ denota a transmissividade atmosférica, que é avaliada na faixa de comprimento de onda específica em que o termovisor está operando e é função da distância ao alvo e da umidade relativa do ambiente.

No âmbito deste modelo, pressupõe-se que todas as fontes de radiação circundantes ao objeto alvo no cenário de medição possam ser simplificadas como uma única fonte externa, com temperatura T_{ref} . Esta fonte externa singular emite radiação em direção ao objeto, a qual é refletida pela sua superfície e alcança as lentes do termovisor. Adicionalmente, o modelo geralmente presume que o objeto alvo é opaco à radiação térmica e que a sua superfície pode ser considerada como cinza difusa. No entanto, é importante ressaltar que esta segunda hipótese é uma simplificação que pode se tornar inadequada, particularmente quando a termografia é empregada para registrar variações térmicas na superfície frontal de módulos fotovoltaicos.

Para desvincular o modelo matemático utilizado da premissa de que a superfície inspecionada é cinza difusa, foi desenvolvido um sistema de equações (Equação 3.5 e Equação 3.6) com duas incógnitas: emissividade (ε) e refletividade (ρ). Este sistema foi implementado no programa EES (*Engineering Equation Solver*).

$$E(T_{full,1}) = \varepsilon\tau E(T_{ob}) + \rho\tau E(T_{atm}) + (1 - \tau)\tau E(T_{atm}) \quad (3.5)$$

$$E(T_{full,2}) = \varepsilon\tau E(T_{ob}) + \rho\tau E(T_{CN}) + (1 - \tau)\tau E(T_{atm}) \quad (3.6)$$

Essa implementação no EES permite resolver o sistema de equações, cuja solução define os valores de emissividade e refletividade que a superfície do módulo fotovoltaico assume, uma vez fixada a temperatura do objeto e o ângulo de visada. Sob o ponto de vista experimental, coletar dados para resolver simultaneamente as Equações 3.5 e 3.6 representa projetar duas situações de medição diferentes.

Na primeira situação de medição, $E(T_{full,1})$ é composto por três componentes: (1) sinal do objeto na temperatura T_{ob} ; (2) sinal refletido pelo objeto a partir de um meio circundante na temperatura T_{atm} ; e (3) sinal do meio circundante na temperatura T_{atm} . Nesta situação, $T_{full,1}$ denota a temperatura aparente da superfície. O valor desta temperatura aparente é medido por termografia, enquanto T_{ob} e T_{atm} são previamente avaliados.

Na segunda situação de medição, $E(T_{full,2})$ também é composto por três componentes, mas com fundo reflexivo a uma temperatura de referência diferente: (1) sinal do objeto na temperatura T_{ob} ; (2) sinal refletido pelo objeto a partir de um radiador padrão na temperatura T_{CN} ; e (3) sinal do meio circundante na temperatura T_{atm} . Nesta situação, $T_{full,2}$ denota a temperatura aparente do reflexo da emissão do radiador padrão na superfície. O valor desta temperatura aparente é medido por termografia, enquanto T_{ob} , T_{CN} e T_{atm} são previamente avaliados.

Em todos os termos presentes nas Equações 3.5 e 3.6, $E(T)$ indica a fração de emissão de radiação de um corpo negro, avaliada em uma temperatura específica e na faixa de comprimento de onda operacional do termovisor utilizado nos experimentos. Conforme apresentado anteriormente, a avaliação de cada um destes sinais radiométricos é feita através da Equação 3.2.

3.1.2 Análise de Incertezas

A avaliação da incerteza total na estimativa das propriedades ópticas da superfície do módulo fotovoltaico, conforme descrita pelas Equações 3.5 e 3.6, foi realizada utilizando o programa EES (*Engineering Equation Solver*). O EES possui rotina de cálculo implementada que permite tanto calcular os valores das variáveis emissividade (ε) e refletividade (ρ), quanto suas respectivas incertezas associadas. O cálculo da incerteza na estimativa dessas propriedades considerou um conjunto de fontes externas, incluindo a temperatura atmosférica (T_{atm}), a temperatura do corpo negro (T_{CN}), as temperaturas aparentes medidas pelo termovisor ($T_{full,1}$ e $T_{full,2}$), a temperatura do objeto (T_{ob}) e a transmissividade do meio circundante (τ).

Como em qualquer medição, todas as fontes de incerteza inerentes devem ser quantificadas de forma a expressar adequadamente o resultado obtido. A Tabela 3.1 reúne as estimativas de incerteza consideradas para as variáveis de entrada do modelo matemático do termovisor durante os ensaios de determinação das propriedades ópticas da superfície frontal do módulo fotovoltaico.

Tabela 3.1 – Incertezas assumidas para as variáveis de entrada do modelo matemático.

Variável	Símbolo	Instrumento de referência	Valor [°C]
Temperatura do Objeto	$u_{T_{ob}}$	Termopar Tipo J	0,24
Temperatura Aparente	$u_{T_{full}}$	Termocâmera Flir	2,0
Temperatura do Corpo Negro	$u_{T_{CN}}$	Radiador Padrão	0,5
Temperatura Ambiente	$u_{T_{atm}}$	Termohigrômetro	0,4
Temperatura Média Refletida	$u_{T_{ref}}$	Termocâmera Flir	2,0

Fonte: o autor.

A rotina de cálculo embutida no *software* EES é uma implementação numérica do Método GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) de primeira ordem, particularmente sem a atribuição de correlação estatística entre as variáveis de entrada que constituem o modelo matemático de medição. Ao avaliar as incertezas em medições indiretas, geralmente se utiliza a Lei de Propagação de Incertezas (Equação 3.7) para estimar a incerteza padrão combinada da variável de saída. O processo de cálculo é simplificado ao eliminar o segundo termo do lado direito da equação (para modelos de primeira ordem). Em geral, o Método GUM de primeira ordem fornece uma estimativa confiável da incerteza, considerando a ausência de correlação estatística entre as variáveis de entrada, sem comprometer a precisão do resultado.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 u(x_i) u(x_j) \quad (3.7)$$

Retomando os objetivos do presente estudo, o trabalho foi desenvolvido de modo a estabelecer um critério prático e confiável para determinar a viabilidade de realizar inspeções termográficas em módulos fotovoltaicos com base nos valores de incerteza de medição encontrados a partir das condições que se apresentarem durante a realização da medição. Ao fazer isso, buscou-se não apenas alcançar resultados mais precisos, mas também fornecer uma proposta metodológica sólida para a prática de inspeção termográfica nesse contexto de aplicação.

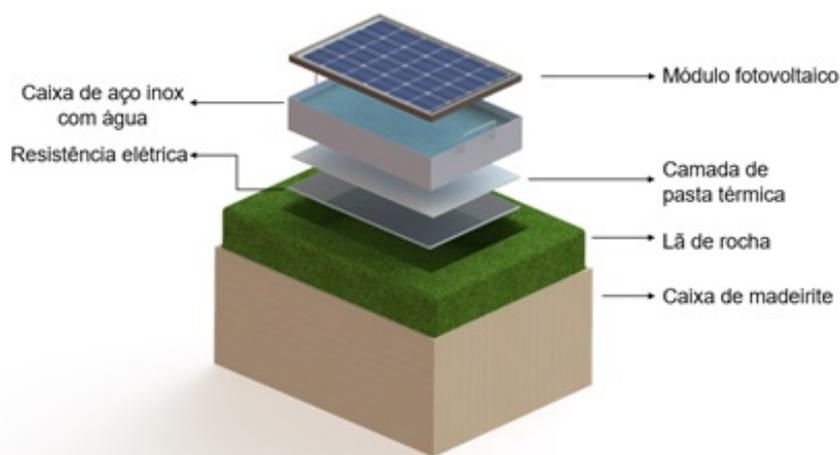
3.2 Materiais e Métodos

A metodologia experimental deste trabalho foi realizada *indoor* tanto com o módulo fotovoltaico totalmente limpo, quanto sob efeito da sujidade urbana e minerária com vistas à determinação das propriedades ópticas da superfície frontal do mensurando, com ênfase na dependência direcional da emissividade e refletividade. Nesse sentido, a metodologia abrange uma avaliação do impacto das diferentes sujidades sobre o comportamento óptico da superfície dos módulos solares. Nesta seção são descritos o aparato experimental utilizado e o procedimento elaborado para os ensaios termográficos, além de apresentado o detalhamento a respeito da caracterização química das amostras de sujidade utilizadas no presente trabalho.

3.2.1 Descrição do Aparato Experimental Utilizado

É comum utilizar métodos comparativos para determinar experimentalmente a emissividade e refletividade das superfícies; no entanto, a dependência de um valor de referência bem conhecido pode afetar a precisão das estimativas por meio dessa abordagem. Neste estudo, foi desenvolvido um aparato experimental (Figura 3.3), para determinar a emissividade e refletividade direcionais da superfície frontal dos módulos fotovoltaicos, utilizando um balanço de energia como método.

Figura 3.3 – Aparato experimental utilizado para determinar as propriedades ópticas superficiais do módulo fotovoltaico.



Fonte: o autor.

Conforme indicado na Figura 3.3, o módulo foi imerso horizontalmente em uma caixa de aço inoxidável cheia de água. Uma fonte de calor foi fixada na parte de trás da caixa e um isolamento térmico, com pasta térmica, foi aplicado em todas as superfícies, exceto na frontal do módulo. O arranjo foi protegido por uma caixa de MDF de 55 cm × 45 cm × 25 cm. A fonte de calor, composta por resistências distribuídas em um *frame*, foi conectada a um regulador de tensão ligado à rede 127V do laboratório, permitindo um sistema contínuo de medição de corrente e tensão. Quando o sistema é ligado, a energia térmica dissipada pela resistência é transmitida para a água que, por convecção, promove uma distribuição de calor mais uniforme através do módulo fotovoltaico, modelo SinoSola SA10-36P, e uma temperatura homogênea na superfície exposta do módulo fotovoltaico. O módulo fotovoltaico mais o seu sistema de aquecimento e isolamento térmico compuseram a parte central de uma montagem experimental maior, que envolveu a utilização de mais equipamentos de medição, conforme mostrado na Figura 3.4. As especificações técnicas desses equipamentos podem ser consultadas no Apêndice A.

Durante o experimento, a temperatura da superfície foi continuamente monitorada usando um termopar tipo J conectado a um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A, com taxa de aquisição ajustada para 2 leituras por segundo. O termopar tipo J utilizado tem uma incerteza expandida de $\pm 0,24^{\circ}\text{C}$, obtida mediante calibração prévia do instrumento.

Figura 3.4 – Equipamentos utilizados na bancada experimental construída.



Fonte: o autor.

Sendo a temperatura do objeto (T_{ob}) essencial para os propósitos do experimento, uma leitura mais precisa foi garantida melhorando o contato do termopar com a superfície através da aplicação de resina *Durepoxi*, dada sua característica como material isolante térmico e resistente à umidade e temperaturas moderadas. Esse tipo de solução prática também pode ser encontrado em outros trabalhos na literatura (CONEGLIAN, 2006). Além de aumentar a pressão de contato e, com isso, garantir uma leitura mais próxima da realidade, a utilização da resina também isolou termicamente a ponta de prova, reduzindo possíveis efeitos convectivos que poderiam distorcer as medições. A Figura 3.5 evidencia o ponto de instalação do termopar sobre a superfície do módulo fotovoltaico, já com a resina *Durepoxi* aplicada.

Figura 3.5 – Vista superior do aparato experimental, em uso do *Durepoxi*.

Fonte: o autor.

O cerne do experimento concentrou-se no monitoramento da potência requerida para manter a superfície frontal do módulo fotovoltaico a uma temperatura conhecida, que poderia ser igual ou superior à temperatura ambiente, em condições rigorosamente

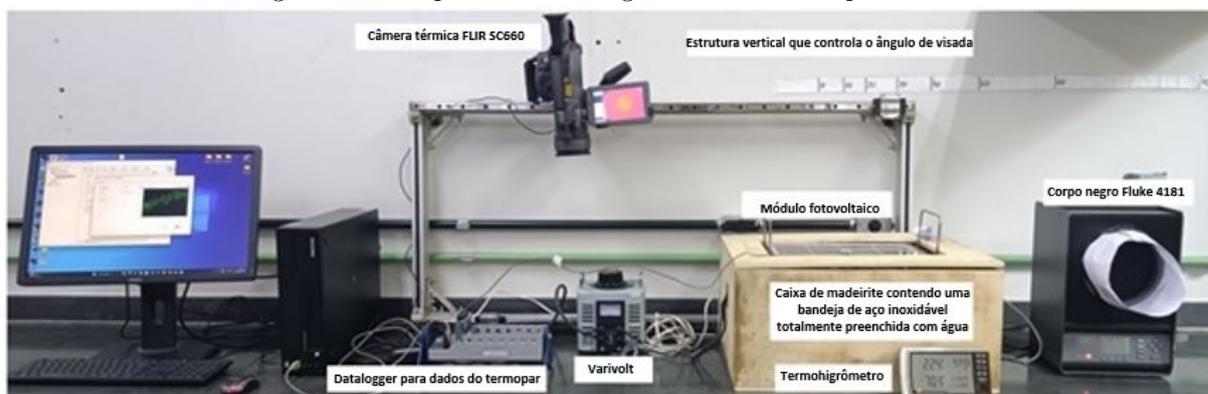
controladas de laboratório. Uma vez alcançado o estado estacionário, toda a energia térmica adicionada pela fonte de calor foi dissipada principalmente por convecção, além de trocas líquidas de radiação entre a superfície do módulo e o ambiente do laboratório, juntamente com perdas térmicas através do isolamento. Alcançada essa fase do experimento, foi possível proceder com um balanço de sinais a partir dos registros termográficos da superfície em questão nas duas condições previamente definidas para aplicação das Equações 3.5 e 3.6. A solução simultânea dessas equações permitiu a caracterização das propriedades ópticas da superfície frontal do módulo fotovoltaico ensaiado, em termos de sua emissividade (ε) e refletividade (ρ) totais hemisféricas.

3.3 Procedimento Experimental para os Ensaios Termográficos

Os modelos embarcados nas câmeras térmicas são fundamentais na interpretação das informações radiométricas registradas. Uma abordagem comum é considerar a expressão $(1 - \varepsilon)$ como uma estimativa da refletividade superficial, especialmente em superfícies opacas. Contudo, essa suposição necessita de validação empírica, especialmente para materiais com propriedades ópticas direcionais. A investigação experimental desenvolvida neste estudo também serviu para testar essa suposição, haja vista que os experimentos conduzidos determinam de forma independente os valores de emissividade e refletividade do módulo fotovoltaico.

Os registros termográficos da superfície frontal do módulo fotovoltaico ensaiado foram obtidos através da bancada experimental evidenciada na Figura 3.6, sendo utilizada a câmera termográfica FLIR SC660. A termocâmera foi posicionada em uma estrutura vertical com precisão angular garantida com um prumo digital e, posteriormente, as imagens termográficas assim obtidas foram analisadas para extrair os dados de emissividade e refletividade direcionais.

Figura 3.6 – Esquema de montagem da bancada experimental.

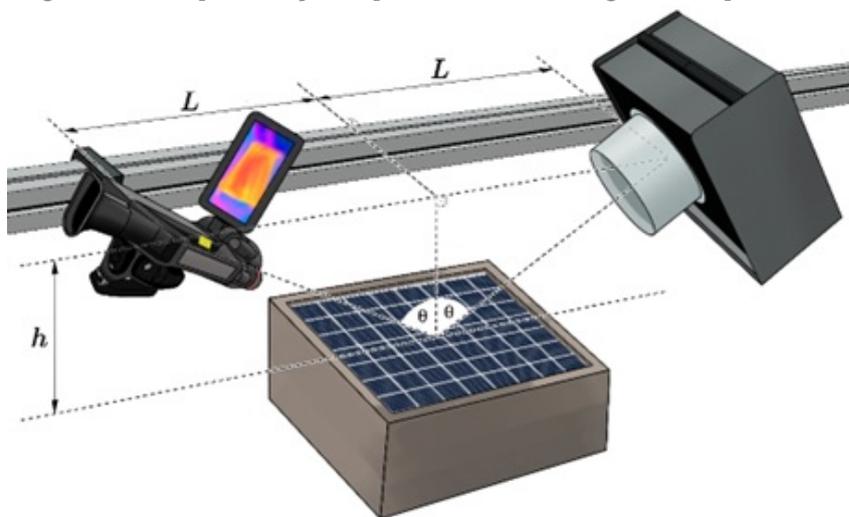


Fonte: o autor.

O procedimento de obtenção dos termogramas acompanhou os seguintes passos:

1. Isolar a sala, mantendo porta e janelas fechadas;
2. Ligar o ar-condicionado e, então, aguardar a climatização do ambiente;
3. Ajustar o sistema de dissipação de energia térmica para o valor desejado e, então, aguardar a estabilização da temperatura registrada pelo termopar tipo J;
4. Posicionar a termocâmera segundo o ângulo de visada desejado, ajustando a parte a ser avaliada do módulo fotovoltaico no centro do seu campo de visão;
5. Para a primeira tomada de temperatura aparente, utilizar a ferramenta de área (retângulo), abrangendo uma porção significativa do módulo fotovoltaico e registrar a temperatura aparente média da superfície do módulo;
6. Para a segunda tomada de temperatura aparente, posicionar o corpo negro no ângulo oposto ao da câmera a fim de fazer com que a radiação refletida pela superfície do módulo alcance as lentes do termovisor (ver Figura 3.7). Em seguida, utilizar a ferramenta de área (retângulo), abrangendo uma porção significativa do módulo fotovoltaico e registrar a temperatura aparente média do reflexo da emissão do radiador padrão na superfície do módulo;
7. Repetir as etapas 3-6 até que todos os ângulos de visada sejam avaliados, em todas as temperaturas previamente definidas.

Figura 3.7 – Representação esquemática da montagem do experimento.



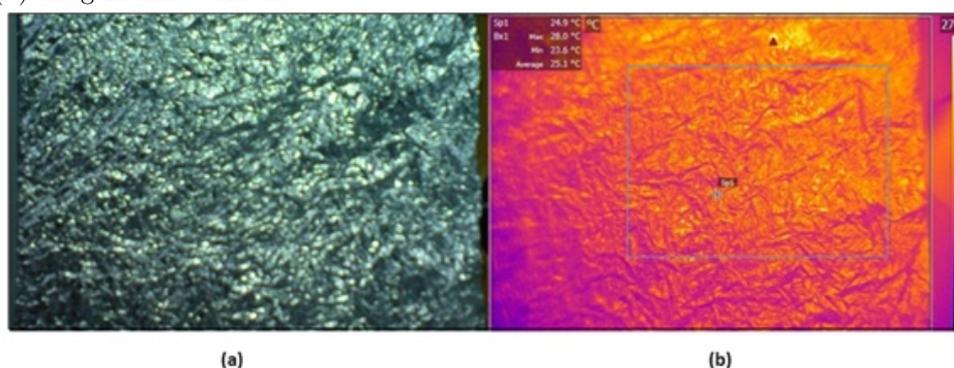
Fonte: o autor.

Para reproduzir cada ângulo de observação definido, foi utilizada a relação trigonométrica $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{L}{h} \right)$, conforme Figura 3.7, na qual o cálculo do ângulo é realizado em função do deslocamento L e da distância vertical h . Para este conjunto de experimentos, foram reproduzidos oito ângulos de visada distintos entre a superfície do módulo fotovoltaico e a câmera: 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° e 70°, abrangendo uma faixa de temperaturas de 25°C a 60°C com incrementos de 5°C. Os ensaios tiveram por objetivo avaliar como os resultados obtidos podem ser impactados em função de variações no ângulo de visada entre câmera e superfície inspecionada, bem como em função de variações na temperatura desta superfície inspecionada.

3.4 Determinação da Temperatura Média Refletida

Para determinar a temperatura média refletida (T_{ref}), parâmetro fundamental nos modelos matemáticos dos termovisores que compensa o sinal de radiação refletido pelo alvo advindo de sua vizinhança, uma prática comum é utilizar uma folha de alumínio corrugada. Buscando reproduzir as mesmas condições de observação do objeto em estudo, essa técnica utiliza uma folha corrugada com seu lado mais espelhado funcionando como um anteparo sobre a superfície alvo. Isso garante o mesmo ângulo de visada com que a câmera térmica normalmente registraria o sinal refletido pela superfície, com origem no ambiente circunvizinho ao módulo. Em seguida, é necessário ajustar os parâmetros de aquisição da termocâmera para emissividade unitária e distância nula. Dessa forma, registra-se a temperatura aparente, não compensada. Dirigindo o foco para o anteparo, a última etapa é registrar a temperatura média nessa região, que corresponde à temperatura média refletida a ser estimada. Esse procedimento, com tomadas de imagem ilustradas na Figura 3.8, pode exigir, em alguns casos, a medição da temperatura aparente refletida em mais de uma posição em relação ao alvo, especialmente quando há várias fontes de reflexão.

Figura 3.8 – Determinação experimental da temperatura média refletida: (a) imagem no espectro do visível; e (b) imagem infravermelha.



Fonte: o autor.

O procedimento foi realizado em ambiente controlado, tendo como suporte o mesmo aparato experimental de todo este estudo, alterando apenas o ângulo de visada que foi de 0° a 70° , com intervalos regulares de 10° . O cálculo da temperatura média refletida (T_{ref}) foi feito a partir da média entre todas as temperaturas aparentes amostradas, conforme a Tabela 3.2, na qual o valor médio encontrado foi de 25°C . Esse valor foi adotado como dado de entrada no modelo radiométrico para estimativa de emissividade (ε) e refletividade (ρ) nos cálculos posteriores.

Tabela 3.2 – Valores de temperatura média refletida em cada um dos ângulos analisados.

Condições Ambiente: $T_{\text{amb}} = 22.8^\circ\text{C}/\text{UR}[\%] = 51.9$			
0°	$25,0^\circ\text{C}$	40°	$25,4^\circ\text{C}$
10°	$24,9^\circ\text{C}$	50°	$24,7^\circ\text{C}$
20°	$25,0^\circ\text{C}$	60°	$24,9^\circ\text{C}$
30°	$25,2^\circ\text{C}$	70°	$24,9^\circ\text{C}$

Fonte: o autor.

3.5 Caracterização Química das Amostras de Sujidade

A presença de sujidade em módulos fotovoltaicos abarca a acumulação de uma variedade de elementos como poeira, detritos, excrementos de aves, poluição atmosférica, folhas, entre outros materiais que gradualmente se depositam sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos. Tal acúmulo pode significativamente diminuir a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, resultando em uma redução na produção de energia elétrica. Nesse sentido, a presente investigação se torna imprescindível ao contemplar essa vertente do estudo.

Neste estudo, foram realizados testes com o módulo fotovoltaico em diferentes condições: módulo completamente limpo, módulo exposto à sujeira urbana, e módulo exposto à sujeira minerária. Essa abordagem envolvendo a acumulação de sujidades permite simular condições muito próximas da realidade, ou seja, em ambiente aberto onde os módulos fotovoltaicos operam. Além disso, o estudo de como a sujidade influencia os valores de emissividade e refletividade dos módulos solares faz-se importante e aplicável, uma vez que o conhecimento preciso de tais propriedades é essencial para a realização de inspeções termográficas.

Para a preparação do módulo a ser ensaiado em condições de sujidade na sua superfície, alguns cuidados foram tomados para que a amostra fosse acomodada da maneira mais uniforme possível. Inicialmente o módulo era limpo com uma flanela de microfibras multiuso, sendo posteriormente umidificado com a própria flanela de limpeza. Só então procedia-se com a aplicação da sujidade em forma de polvilhamento. Cabe ressaltar que uma análise semiquantitativa das amostras de sujidade foi realizada de forma a estimar a quantidade em massa retida na superfície do módulo após essa etapa de aplicação.

Para analisar detalhadamente o tamanho e o tipo de partículas presentes na sujeira, foram utilizadas as técnicas de Difração de Raios X (XRD) e Fluorescência de Raios X (XRF). A Difração de Raios X (XRD) ajuda a identificar se essas partículas são, por exemplo, silicatos finos ou óxidos metálicos maiores, que têm diferentes impactos sobre as propriedades ópticas do módulo. A Fluorescência de Raios X (XRF) ajuda a identificar elementos que podem ter alta absorção térmica, como o carbono presente na fuligem urbana ou os óxidos de ferro de origem minerária. Ambos os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais (LCMM) do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG.

As amostras foram examinadas utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X com dispersão por energia (*EDFRX*) *ARL™ QUANT'X - Thermo Scientific™*, apresentado na Figura 3.9, empregando um tubo de prata (50 W). A análise foi conduzida em condições de vácuo e os dados foram adquiridos usando o *software WINTRACE*, posteriormente processados pelo *Uniquant*. As especificações técnicas do equipamento podem ser consultadas no Apêndice A.

Figura 3.9 – Espectrômetro Thermo Scientific™ ARL™ QUANT'X EDXRF.



Fonte: THERMO FISHER (2024).

Ao integrar essas duas metodologias analíticas, tornou-se possível realizar uma caracterização das amostras de poeira depositadas no módulo fotovoltaico ensaiado. Enquanto a Difração de Raios X fornece informações sobre a estrutura cristalina dos componentes presentes, a Fluorescência de Raios X permite a identificação e quantificação dos elementos químicos constituintes. Informações sobre composição e origem da sujidade podem ser correlacionadas com o desempenho óptico da superfície do módulo fotovoltaico, permitindo inferir o impacto que a sua presença tem sobre os resultados das inspeções termográficas sobre a superfície.

4 Resultados

O Capítulo 4 se dedica a uma análise dos resultados obtidos para as propriedades ópticas do módulo fotovoltaico em diferentes estados: limpo e sujo. Na Seção 4.1 é feita a caracterização da emissividade e refletividade direcionais do módulo em estado limpo, acompanhada de uma análise das tendências reportadas pelos valores médios obtidos e das incertezas dos resultados. Na sequência, a Seção 4.2 trata de apresentar uma caracterização das amostras de sujidade, investigando tanto a sujidade urbana quanto a minerária empregadas no presente estudo. Em seguida, a Seção 4.3 vai tratar então da caracterização das propriedades ópticas do módulo na presença dessas sujidades, incluindo novamente a emissividade e a refletividade direcionais, também apresentando uma análise dos valores médios encontrados e das incertezas dos resultados. O capítulo segue com uma análise comparativa dos principais resultados obtidos, apresentada na Seção 4.4. Por fim, na Seção 4.5, o capítulo se encerra com uma discussão acerca do impacto que o ângulo de visada tem sobre as incertezas dos resultados de medição de temperatura por termografia, apresentando um conjunto de recomendações práticas para o bom uso da técnica nesse contexto de aplicação.

4.1 Caracterização das propriedades ópticas do módulo em estado limpo

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios que caracterizam as propriedades ópticas da cobertura de vidro (totalmente isenta de sujidades) que compõe a superfície frontal do módulo fotovoltaico utilizado no experimento, conforme detalhado na Seção 3.2.1. A investigação experimental proposta tem por objetivo identificar o impacto que a temperatura do módulo e o ângulo de visada têm sobre os valores típicos de emissividade e refletividade da superfície do módulo fotovoltaico limpo.

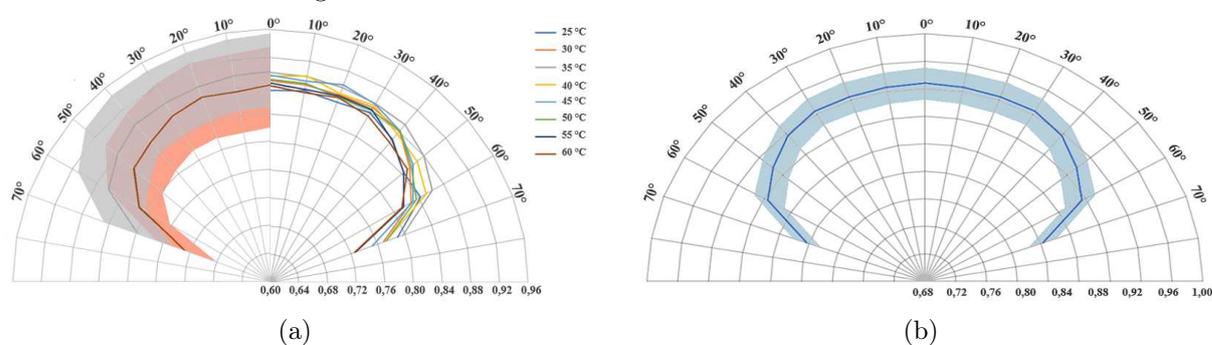
4.1.1 Emissividade Direcional

No tratamento dos dados experimentais, foi utilizado o *software* EES (*Engineering Equation Solver*) para determinar os valores de emissividade e refletividade da superfície frontal dos módulos fotovoltaicos de silício, resolvendo o sistema definido pelas Equações 3.5 e 3.6 previamente apresentadas. Este sistema foi solucionado individualmente para cada combinação de temperatura do módulo e ângulo de visada do termovisor. Conforme definido na Seção 3.1 do presente trabalho, durante a solução das Equações 3.5 e 3.6, a

fração de emissão de radiação de corpo negro em relação à temperatura foi avaliada por meio de um polinômio de segundo grau (Equação 3.2), com um desvio percentual máximo de 0,04% na faixa de 20°C a 110°C.

Para a apresentação dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, em um primeiro momento optou-se pela representação polar, na qual ficam evidenciados os efeitos direcionais sobre as propriedades avaliadas. Começando pela análise dos resultados de emissividade direcional, o primeiro gráfico da Figura 4.1 (a) está dividido em duas partes. Em sua porção direita estão representadas curvas experimentais com valores de emissividade em função do ângulo de visada da câmera termográfica, obtidas para os diferentes valores de temperatura da superfície do módulo fotovoltaico ensaiadas.

Figura 4.1 – Resultados para emissividade direcional no módulo fotovoltaico limpo, em função do ângulo de visada da câmera termográfica.



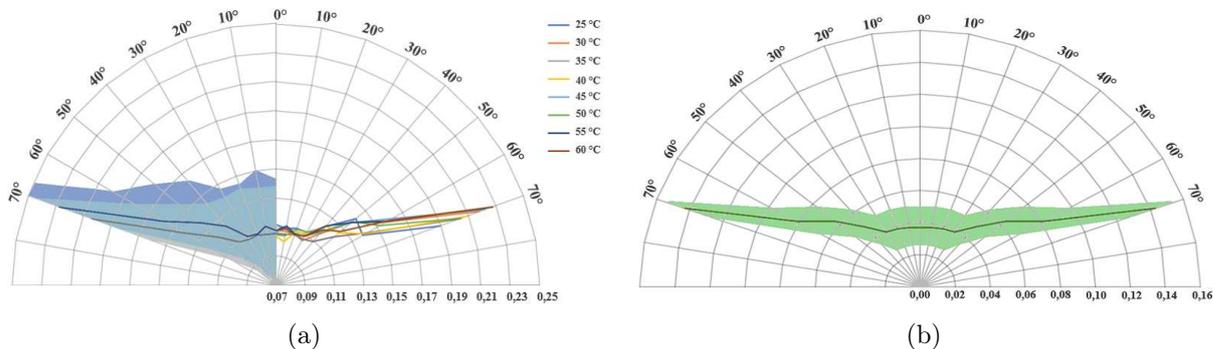
Fonte: o autor.

Neste gráfico pode ser observada uma tendência de decaimento nos valores de emissividade na medida em que se aumenta o ângulo de visada, conforme reportado em literatura (BERGMAN *et al.*, 2017). Outra tendência observada nos resultados é de um baixo distanciamento entre as diferentes curvas, incluindo o entrelaçamento entre várias destas, sugerindo que a temperatura não tenha uma influência muito significativa nos resultados de emissividade. Para confirmar essa suposição, no lado esquerdo ainda deste primeiro gráfico foram traçadas apenas as linhas mais periféricas dos resultados (35°C e 60°C), sendo os intervalos calculados para as incertezas de medição aplicados na forma de sombras nesta representação gráfica. Como os intervalos de incerteza das linhas mais afastadas se sobrepõem ao longo de todo o gráfico, não existe garantia metrológica de diferença entre os resultados e, portanto, conclui-se que a temperatura da superfície não é uma variável de influência sobre a emissividade para este conjunto de dados. Assim sendo, assumindo que apenas o ângulo de visada tem influência sobre os resultados obtidos, no segundo gráfico da Figura 4.1 (b) são apresentados os resultados médios de emissividade, com suas respectivas incertezas. Neste gráfico é possível observar que a emissividade da superfície frontal do módulo fotovoltaico tem decaimento mais significativo para ângulos superiores a 40°.

4.1.2 Refletividade Direcional

Partindo para a análise dos resultados de refletividade, duas representações polares são apresentadas na Figura 4.2. Assim como na análise anterior, o primeiro gráfico (a) também está dividido em duas partes: na metade direita se encontram as curvas experimentais de refletividade em função do ângulo de visada para diferentes temperaturas; e na metade esquerda são representadas apenas as linhas mais periféricas dos resultados (35°C e 55°C) com indicação de seus respectivos intervalos de incerteza.

Figura 4.2 – Resultados para refletividade no modulo fotovoltaico limpo, em função ângulo de visada da câmera termográfica.



Fonte: o autor.

A partir da análise deste gráfico, ao se constatar a sobreposição dos intervalos de incerteza entre as curvas periféricas, demonstra-se não haver garantia estatística de diferença entre os resultados devido à temperatura, quando fixado um ângulo de visada. Portanto, é possível concluir que a temperatura da superfície também não é uma variável de influência sobre a refletividade da superfície avaliada. No segundo gráfico da Figura 4.2 (b) é mostrada a curva resultante da média dos resultados obtidos, com suas respectivas incertezas. Assim como para a análise anterior, existe uma variação mais significativa entre os valores de refletividade da superfície quando os ângulos de visada são superiores a 40°.

A tendência de redução da emissividade e crescimento da refletividade na medida em que se aumentam os valores de ângulo de visada não é uma mera casualidade. Se toda a radiação incidente sobre uma superfície apenas puder ser absorvida, refletida ou transmitida por essa mesma superfície, então é consequência da Primeira Lei da Termodinâmica a constatação de que $(\alpha + \rho + \tau) = 1$. É também bastante comum em estudos sobre radiação térmica assumir ser válida uma extensão da Lei de Kirchhoff para as propriedades direcionais totais, de onde se obtém a relação $\varepsilon = \alpha$. Isso aliado à consideração de que a superfície é opaca significa que $(\varepsilon + \rho) = 1$, suposição esta muito utilizada em estudos envolvendo a termografia e que, inclusive, é assumida no modelo matemático embarcado na câmera térmica. Nesta linha de raciocínio, a fundamentação teórica do problema já prevê que o aumento da emissividade de uma superfície seja acompanhado pela diminuição da refletividade da mesma, e vice-versa. Fato este também observado na presente investigação.

4.2 Caracterização das amostras de sujidade urbana e minerária

Nesta seção são apresentados os resultados que têm por objetivo caracterizar e analisar a composição das amostras de sujidade empregadas no trabalho. Inicialmente, aborda-se uma análise semiquantitativa das amostras, fornecendo uma avaliação preliminar da quantidade (em massa) de sujidade aplicada sobre a superfície do módulo fotovoltaico em cada situação. Em seguida, são detalhados os resultados obtidos através dos ensaios de Difração de Raios X (DRX), uma técnica fundamental para identificar a estrutura cristalina dos materiais presentes. Por fim, exploram-se os resultados decorrentes dos ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX), que fornecem indicativos sobre os elementos químicos presentes nas amostras e suas concentrações relativas.

4.2.1 Análise Semiquantitativa das Amostras

A análise semiquantitativa fornece uma medida aproximada da quantidade de um determinado material particulado, sendo um método empregado para analisar o nível de contaminação em superfícies, produtos ou ambientes, oferecendo uma estimativa aproximada de sua massa, porém sem a precisão da análise quantitativa. Por outro lado, as abordagens totalmente quantitativas dependeriam de medições mais complexas, visando determinar a quantidade exata da amostra avaliada.

No experimento conduzido, a sujidade foi primeiramente avaliada visualmente, sendo então atribuída uma classificação de acordo com critérios pré-estabelecidos. Esses critérios englobaram a quantidade, a distribuição e os tipos de sujidade (urbana e minerária) a serem aplicados na superfície em análise. Após essa classificação preliminar, foram colocadas em um copo plástico com capacidade máxima de 250 ml cerca de seis colheres de chá da sujidade em análise, uma de cada vez. Em seguida, foram feitas as pesagens de cada item.

O substrato que aparou a sujidade era constituído por uma lâmina de plástico com dimensões de 50 cm por 50 cm, inicialmente limpa. As pesagens foram feitas conforme a Figura 4.3: (1) copo de plástico vazio; (2) lâmina de plástico limpa; (3) copo de plástico com seis colheres de chá da amostra de sujidade; (4) copo de plástico com a lâmina de plástico, após coletado o excesso da sujidade que não ficou aderida à superfície do módulo fotovoltaico após aplicação.

O processo de aplicação da sujidade na superfície do módulo fotovoltaico foi constituído de algumas etapas. Primeiramente foi feita a deposição do material sobre a superfície. Em seguida, o módulo foi agitado manualmente para garantir uma distribuição mais uniforme da sujidade. O excesso de material não aderido à superfície do módulo foi coletado pela lâmina de plástico e acomodado no interior do copo plástico para posterior pesagem final. O resultado das pesagens realizadas é apresentado na Tabela 4.1.

Figura 4.3 – Análise semiquantitativa das amostras de sujidade.



Fonte: o autor.

Tabela 4.1 – Valores das pesagens das amostras de sujidade.

Amostra Sujidade Urbana	
(1) Massa do copo vazio [g]	2,000
(2) Massa da lâmina de plástico vazia [g]	5,378
(3) Massa do copo com sujidade urbana [g]	16,721
(4) Massa do copo + lâmina de plástico + amostra residual [g]	14,505
Massa retida no módulo fotovoltaico* [g]	7,594

$$*\text{Valor} = (3) - (4) + (2)$$

Amostra Sujidade Minerária	
(1) Massa do copo vazio [g]	1,855
(2) Massa da lâmina de plástico vazia [g]	5,469
(3) Massa do copo com sujidade minerária [g]	25,723
(4) Massa do copo + lâmina de plástico + amostra residual [g]	18,956
Massa retida no módulo fotovoltaico* [g]	12,236

$$*\text{Valor} = (3) - (4) + (2)$$

Fonte: o autor.

A escolha desse método semiquantitativo se dá pela dificuldade em coletar esse tipo de amostra em campo, considerando a perda do material ao mover o módulo fotovoltaico, já que os particulados de sujidade são facilmente levados pelo fluxo de ar ambiente. A amostra de sujidade urbana foi coletada na Usina Tesla, localizada no terraço do prédio da Escola de Engenharia da UFMG. Já a amostra de sujidade minerária foi recolhida ao redor de módulos fotovoltaicos na região minerária de Congonhas – Minas Gerais. Ambas amostras foram extraídas com a ajuda de uma trincha de pintura média e armazenadas em um pequeno recipiente de plástico com tampa. É válido citar que, ao longo do período de realização dos experimentos em laboratório (que durou semanas para cada amostra), houve perdas de sujidade mesmo com o ambiente sendo climatizado e controlado, já que a sujidade é suscetível a mínimas correntes de ar. Por isso, os valores apresentados na Tabela 4.1 são semiquantitativos.

Os resultados apresentados na Tabela 4.1 mostram que a massa de material depositado sob a superfície do módulo fotovoltaico foi diferente entre os dois tipos de sujidade utilizados. A sujidade urbana apresentou uma massa estimada de 7,594 g retida do módulo

após pesagens, enquanto um total de 12,236 g de sujidade minerária ficou retido na superfície do módulo após aplicação. Essa diferença se deve à variação granulométrica das partículas, que interfere tanto na quantidade que é aplicada inicialmente ao módulo quanto no assentamento dos grãos durante a fase de agitação e na quantidade que fica efetivamente aderida ao final do processo de aplicação. É perceptível a distinção entre as partículas, com a sujidade urbana apresentando grãos mais finos e a sujidade minerária apresentando grãos mais grossos.

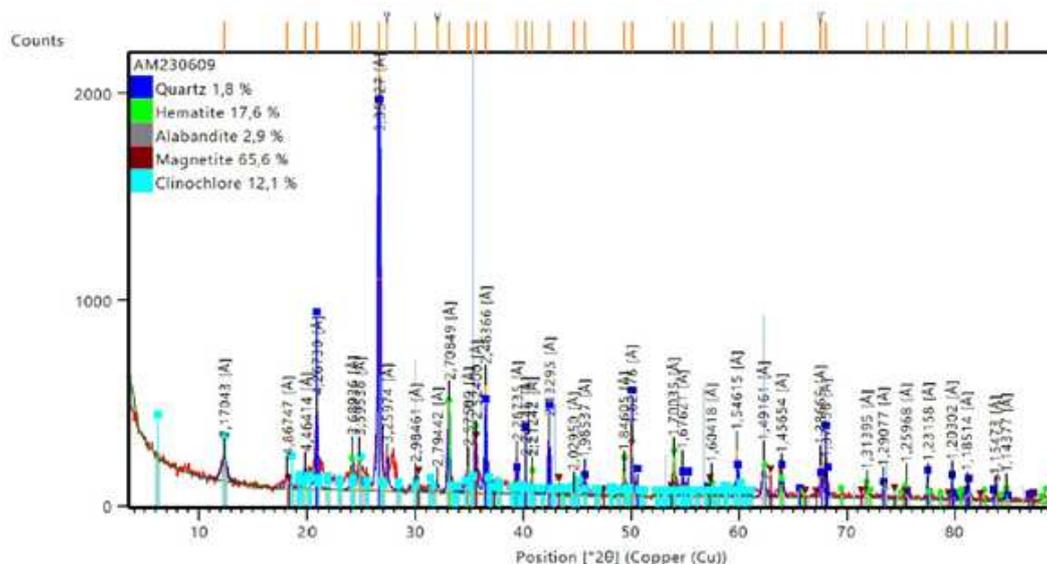
As amostras coletadas também foram submetidas a análises de Difração de Raios X (DRX) e de Fluorescência de Raios X (FRX). Os resultados obtidos estão apresentados nas Seções 4.2.2 e 4.2.3, respectivamente.

4.2.2 Ensaios de Difração de Raios X (DRX)

A técnica de Difração de Raios X (DRX) é amplamente utilizada para determinar a estrutura cristalina de materiais. Particularmente para o contexto deste trabalho, sua utilização permite determinar os diferentes componentes cristalinos presentes nas amostras de sujidade (urbana e minerária) analisadas. Esse tipo de informação agrega uma perspectiva complementar à interpretação dos resultados obtidos para as propriedades ópticas da superfície dos módulos fotovoltaicos, particularmente quando estiverem afetados por sujidade.

Com base nos resultados da análise de Difração de Raios X (DRX) referentes à sujidade de origem urbana (Figura 4.4), foi possível identificar a composição química das partículas predominantes. Essa análise revelou que a sujidade era composta por diversos elementos químicos, cada um com suas características e origens distintas.

Figura 4.4 – Observações das partículas de sujidade de origem urbana.



Fonte: o autor.

A componente majoritariamente identificada no ensaio de Difração de Raios X (DRX) para a sujidade urbana foi a magnetita ($\text{Fe}_2^+\text{Fe}_2\text{O}_4$). A magnetita possui uma emissividade alta, geralmente entre 0,60 e 0,80, o que eleva sua capacidade de emissão de radiação térmica (PABISIAK; KIEJNA, 2014). Já a refletividade do composto é moderada devido a sua natureza metálica. Estudos mostram que a estrutura cristalina e o tamanho dos cristalitos influenciam suas propriedades ópticas e magnéticas. A magnetita sintetizada a partir de areia de ferro exibe alta porosidade e propriedades ópticas ajustáveis conforme os diferentes solventes utilizados na síntese (HERYANTO; TAHIR, 2021).

Os resultados também demonstram uma quantidade relevante de hematita (Fe_2O_3) na composição da sujidade urbana analisada. A hematita apresenta uma emissividade alta, geralmente acima de 0,90 e uma refletividade moderada, refletindo bem a luz visível e na faixa do infravermelho próximo (PABISIAK; KIEJNA, 2014). Assim como a magnetita, a hematita é um óxido de ferro, porém sua presença pode sugerir uma fonte diferente, como atividades de construção civil ou desgaste de materiais metálicos.

Em seguida, tem-se clinocloro (Mg,Fe_2^+) $5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, que é um mineral do grupo das argilas normalmente associado a atividades de escavação e construção, sendo encontrado em solos e rochas alteradas. Sua presença na sujidade urbana indica possíveis influências de atividades de construção civil ou urbanização da região em que a amostra foi coletada.

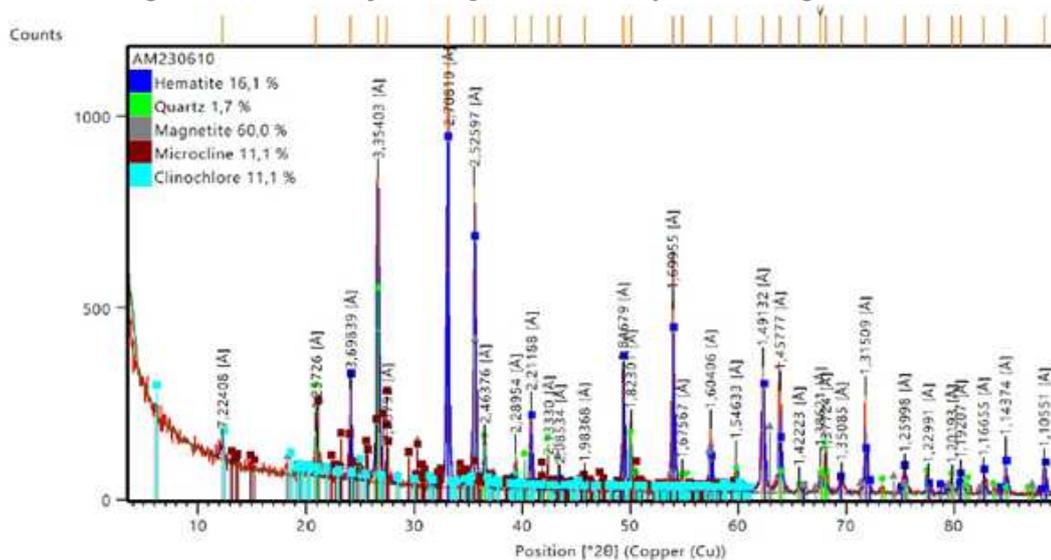
Já em menor quantidade tem-se a alabandita (MnS), um sulfeto de manganês encontrado em ambientes geotérmicos e depósitos minerais. Sua presença na sujidade urbana pode indicar uma possível influência de atividades relacionadas à mineração ou processamento de minerais na área estudada.

Por fim, o quartzo (SiO_2), um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, foi identificado na amostra de sujidade urbana. Sua presença pode ser atribuída a fontes naturais, como rochas e solo, mas também pode ser resultado de atividades antropogênicas, como abrasão de materiais de construção.

Partindo para os resultados obtidos no ensaio de Difração de Raios X (DRX) para a sujidade de origem minerária, através da Figura 4.5 é possível analisar a composição química da amostra analisada. Mais uma vez, o teste revelou a presença predominante de diferentes elementos químicos, fornecendo informações importantes sobre as características e origens dessa sujidade específica.

A primeira constatação ao analisar o resultado do ensaio de Difração de Raios X (DRX) para a amostra de sujidade minerária é uma constituição muito similar ao encontrado para a sujidade urbana, isto é, uma composição preponderante de magnetita ($\text{Fe}_2^+\text{Fe}_2\text{O}_4$) e hematita (Fe_2O_3), seguido por quantidades menores de outros elementos. A Tabela 4.2 evidencia a proximidade entre os resultados obtidos.

Figura 4.5 – Observações das partículas de sujidade de origem mineralária.



Fonte: o autor.

Tabela 4.2 – Compilado dos resultados dos ensaios DRX para as amostras de sujidade.

Sujidade Urbana		Sujidade Mineralária	
Magnetita	65,6%	Magnetita	60,0%
Hematita	17,6%	Hematita	16,1%
Clinocllore	12,1%	Clinocllore	11,1%
Alabandita	2,9%	Microclina	11,1%
Quartzo	1,8%	Quartzo	1,7%

Fonte: o autor.

Particularmente para a sujidade mineralária foi indicada a presença da microclina $K(AlSi_3O_8)$, um tipo de feldspato encontrado em rochas ígneas e metamórficas, frequentemente presente em regiões de mineração. A presença desse mineral na amostra pode sinalizar a alteração das rochas causada por atividades de mineração ou por processos de fragmentação mineral.

Os compostos evidenciados pelo ensaio DRX tanto para a amostra de sujidade urbana quanto para a amostra de sujidade mineralária analisadas possuem diferenças em seus valores de referência para as propriedades de emissividade e refletividade. Os componentes de maior relevância identificados são de maior emissividade e, conseqüentemente, tendendo a refletividades mais baixas. Essa constatação já é um indicativo dos resultados que os testes experimentais com o módulo sujo devem apresentar na Seção 4.3 deste trabalho.

4.2.3 Ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX)

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) é utilizado no contexto deste trabalho para determinar a composição elementar das amostras de sujidade avaliadas. Ele funciona irradiando a amostra com raios X de alta energia, que fazem com que os átomos na amostra

emitam fluorescência característica. Essa fluorescência é então detectada e analisada para determinar quais elementos estão presentes na amostra e em quais quantidades.

Quando analisada a amostra de sujeidade urbana através da técnica Fluorescência de Raios X (FRX), detectou-se a presença de 25 componentes químicos, conforme Tabela 4.3. A saber, o termo $m/m\%$ é a porcentagem em massa do elemento por massa de amostra e o termo $StdErr\%$ é o desvio padrão. Vale ressaltar que o desvio padrão encontrado é muito baixo para todas as concentrações amostradas.

Tabela 4.3 – Compostos e quantitativo por amostra – Sujidade Urbana.

Composto	$m/m\%$	$StdErr\%$	Composto	$m/m\%$	$StdErr\%$
Óxidos			Elementos		
SiO ₂	40,72000	0,15000	Fe	19,87000	0,35000
Fe ₂ O ₃	28,41000	0,50000	Si	19,03000	0,07000
Al ₂ O ₃	23,33000	0,22000	Al	12,34000	0,12000
K ₂ O	1,78000	0,03000	K	1,48000	0,02000
CaO	1,55000	0,06000	Ca	1,11000	0,04000
MgO	1,37000	0,06000	Mg	0,82300	0,03900
TiO ₂	0,87400	0,08500	Ti	0,52400	0,05100
SO ₃	0,56400	0,02900	Na	0,37500	0,03000
Na ₂ O	0,50600	0,05200	Cl	0,23500	0,01200
ZnO	0,23500	0,01000	Sx	0,22600	0,01200
MnO	0,20700	0,01600	Zn	0,18900	0,00800
BaO	0,08500	0,00750	Mn	0,16000	0,01200
Soma:	99,63100		Ba	0,07610	0,00670
			Soma:	56,67310	

Fonte: o autor.

Do lado esquerdo da tabela estão os valores para os óxidos, que resultam de reações químicas entre os elementos fundamentais da amostra e o oxigênio. Na coluna $m/m\%$ os valores somam aproximadamente 99,63%, o que indica que quase toda a massa da amostra é constituída pelos óxidos listados. Apesar de próximo, essa soma não atinge 100% devido à margem de erro da medição e a possível presença de outros óxidos residuais não contabilizados. Já no lado direito da tabela, encontram-se as concentrações para os elementos químicos fundamentais. Essa soma não alcança 100% pelo fato do oxigênio presente não ser diretamente detectado no ensaio, estando este combinado aos demais elementos na formação dos óxidos.

Os principais elementos identificados a partir dos resultados obtidos com o teste de fluorescência de raios X (FRX) recuperam vários aspectos da origem da sujeidade analisada. Dióxido de silício (SiO₂), também conhecido como sílica, é um composto comum encontrado na natureza, especialmente em rochas, areia e solo. Óxido de ferro (Fe₂O₃), conhecido como hematita, é um mineral de cor avermelhada amplamente encontrado na natureza. Por fim, o óxido de alumínio (Al₂O₃), também chamado de alumina, delimita o conjunto dos elementos óxidos mais abundantes com porcentual em massa do elemento por massa de amostra. Outros óxidos de menor representatividade encontrados na amostra são: óxido de potássio (K₂O), óxido de cálcio (CaO), também conhecido como cal viva, usado na

produção de cimento, na purificação de água e na indústria química, óxido de magnésio (MgO), dióxido de titânio (TiO₂), que tem propriedades de opacidade e resistência à corrosão, trióxido de enxofre (SO₃), óxido de sódio (Na₂O), usado na produção de ácido sulfúrico, óxido de zinco (ZnO), óxido de manganês (MnO) e óxido de bário (BaO).

Dentre os elementos químicos constituintes, a sujidade urbana analisada é composta principalmente por ferro (Fe), um metal amplamente utilizado na indústria e na fabricação de materiais como aço, ferro fundido e ligas metálicas; silício (Si), um dos elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre e crucial na fabricação de semicondutores, módulos solares, vidros especiais e ligas metálicas; e alumínio (Al), fechando o grupo de elementos mais abundantes com porcentual em massa do elemento por massa da amostra analisada. Elementos com menor representatividade em porcentual em massa do elemento por massa de amostra, são: potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), titânio (Ti), sódio (Na), um metal alcalino encontrado em muitos minerais, cloro (Cl), sulfeto (S_x), um composto químico contendo enxofre em um estado de oxidação menor, zinco (Zn), manganês (Mn), e bário (Ba).

Ao analisar a amostra de sujidade minerária utilizando a técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), foram identificados 15 componentes químicos, conforme apresentado na Tabela 4.4. Conforme apresentado anteriormente, a porcentagem em massa do elemento em relação à massa da amostra é indicada pelo termo $m/m\%$, enquanto $StdErr\%$ representa o desvio padrão, cabendo destacar que o desvio padrão encontrado para todas as concentrações amostradas também é muito baixo assim como para a amostra anteriormente analisada.

Tabela 4.4 – Compostos e quantitativo por amostra – Sujidade Minerária.

Composto	$m/m\%$	$StdErr\%$	Composto	$m/m\%$	$StdErr\%$
Óxidos			Elementos		
Fe ₂ O ₃	56,78000	0,55000	Fe	39,71000	0,38000
SiO ₂	24,41000	0,13000	Si	11,41000	0,06000
Al ₂ O ₃	16,72000	0,19000	Al	8,85000	0,10000
MgO	0,75100	0,06500	Mg	4,53000	0,03900
TiO ₂	0,42600	0,04200	K	0,27400	0,06000
K ₂ O	0,33000	0,00700	Ti	0,25500	0,02500
CaO	0,30800	0,01500	Ca	0,22000	0,01100
Soma:	99,72500		Cl	0,18900	0,00900
			Soma:	61,36100	

Fonte: o autor.

De maneira similar ao resultado obtido com os ensaios DRX, a Fluorescência de Raios X (FRX) também evidencia uma similaridade muito grande entre os elementos constituintes da amostra de sujidade minerária em relação aos elementos constituintes da amostra de sujidade urbana (anteriormente analisada). O que se tem, de fato, é uma concentração mais elevada de hematita (Fe₂O₃), dióxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃) na constituição da sujidade minerária, seguido por outros óxidos

de menor representatividade em massa. Sob o ponto de vista dos elementos químicos constituintes, os resultados indicam uma maior concentração de ferro (Fe), silício (Si) e alumínio (Al), o que basicamente foi o resultado típico também encontrado ao se analisar a sujidade urbana. A Tabela 4.5 evidencia a proximidade entre os resultados obtidos.

Tabela 4.5 – Compilado dos resultados dos ensaios FRX para as amostras de sujidade.

Sujidade Urbana				Sujidade Minerária			
Óxidos		Elementos		Óxidos		Elementos	
SiO ₂	40,72%	Fe	19,87%	Fe ₂ O ₃	56,78%	Fe	39,71%
Fe ₂ O ₃	28,41%	Si	19,03%	SiO ₂	24,41%	Si	11,41%
Al ₂ O ₃	23,33%	Al	12,34%	Al ₂ O ₃	16,72%	Al	8,85%
K ₂ O	1,78%	K	1,48%	MgO	0,75%	Mg	0,45%
CaO	1,55%	Ca	1,11%	TiO ₂	0,42%	K	0,27%
MgO	1,37%	Mg	0,82%	K ₂ O	0,33%	Ti	0,26%
TiO ₂	0,87%	Ti	0,52%	CaO	0,31%	Ca	0,22%

Fonte: o autor.

Os óxidos presentes nos módulos fotovoltaicos influenciam diretamente seu desempenho, particularmente devido ao potencial de alteração nas propriedades ópticas da sua superfície. Óxidos com alta emissividade, como hematita (Fe₂O₃) e dióxido de silício (SiO₂), são benéficos para a dissipação de calor, ajudando a manter a temperatura dos módulos mais baixa e melhorar a eficiência. Por outro lado, óxidos com alta refletividade, como óxido de alumínio (Al₂O₃) e dióxido de titânio (TiO₂), podem causar perda de fótons incidente, reduzindo a quantidade de energia solar convertida em eletricidade. Vale novamente destacar que a maior representatividade da hematita (Fe₂O₃) e do dióxido de silício (SiO₂) nas amostras de sujidade analisadas já indicam uma tendência de obtenção de uma maior emissividade (e menor refletividade) nos resultados dos testes realizados com o módulo fotovoltaico sujo. Estes resultados são apresentados na Seção 4.3.

4.3 Caracterização das Propriedades Ópticas do Módulo com Presença de Sujidade

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios que caracterizam as propriedades ópticas da cobertura de vidro que compõe a superfície frontal do módulo fotovoltaico utilizado no experimento na presença de dois tipos de sujidades (urbana e minerária), conforme detalhado na Seção 3.2.1. A investigação experimental proposta tem por objetivo identificar o impacto que a temperatura do módulo e o ângulo de visada têm sobre os valores típicos de emissividade e refletividade da superfície do módulo fotovoltaico sujo.

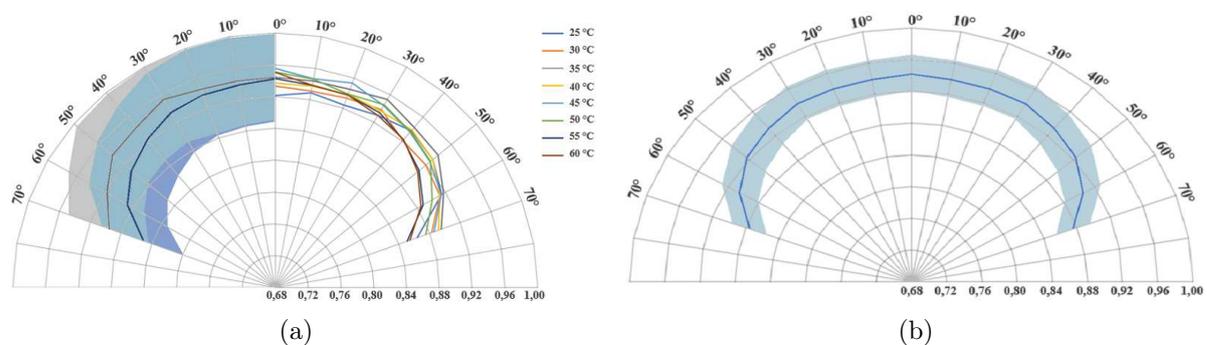
4.3.1 Emissividade Direcional

Para o processamento dos dados experimentais seguiu-se utilizando o *software* EES (*Engineering Equation Solver*) para determinar os valores de emissividade e refletividade da superfície frontal dos módulos fotovoltaicos de silício. Esta segunda parte do estudo envolvendo a caracterização das propriedades ópticas é constituída por dois conjuntos separados de experimentos: um sendo conduzido com a superfície do módulo coberta de sujidade urbana, e outro com a superfície do módulo coberta de sujidade de origem minerária. As Equações 3.5 e 3.6 previamente apresentadas seguem definindo o sistema a ser resolvido, para cada combinação de temperatura do módulo e ângulo de visada do termovisor. Conforme definido na Seção 3.1 do presente trabalho, durante a solução das Equações 3.5 e 3.6, a fração de emissão de radiação de corpo negro em relação à temperatura foi avaliada por meio de um polinômio de segundo grau (Equação 3.2), com um desvio percentual máximo de 0,04% na faixa de 20°C a 110°C.

Para a apresentação dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, nesta seção opta-se novamente pela representação polar, na qual ficam evidenciados os efeitos direcionais sobre as propriedades avaliadas. Também opta-se pela apresentação simultânea dos resultados obtidos com a superfície do módulo coberta pelas sujidades urbana e minerária, com o intuito de facilitar sua análise e comparação.

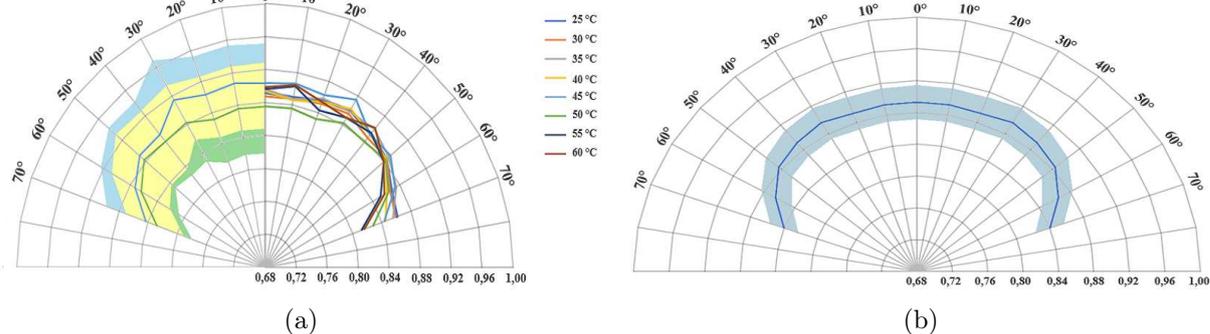
Começando a análise pelos resultados de emissividade direcional, o primeiro gráfico das Figuras 4.6 e 4.7 (a) está dividido em duas partes. Em sua porção direita estão representadas curvas experimentais com valores de emissividade em função do ângulo de visada da câmera termográfica, obtidas para os diferentes valores de temperatura da superfície do módulo fotovoltaico ensaiadas nas condições de sujidade urbana e minerária, respectivamente.

Figura 4.6 – Resultados para emissividade direcional no módulo fotovoltaico com sujidade urbana, em função do ângulo de visada da câmera termográfica.



Fonte: o autor.

Figura 4.7 – Resultados para emissividade direcional no módulo fotovoltaico com sujidade mineral, em função do ângulo de visada da câmera termográfica.



Fonte: o autor.

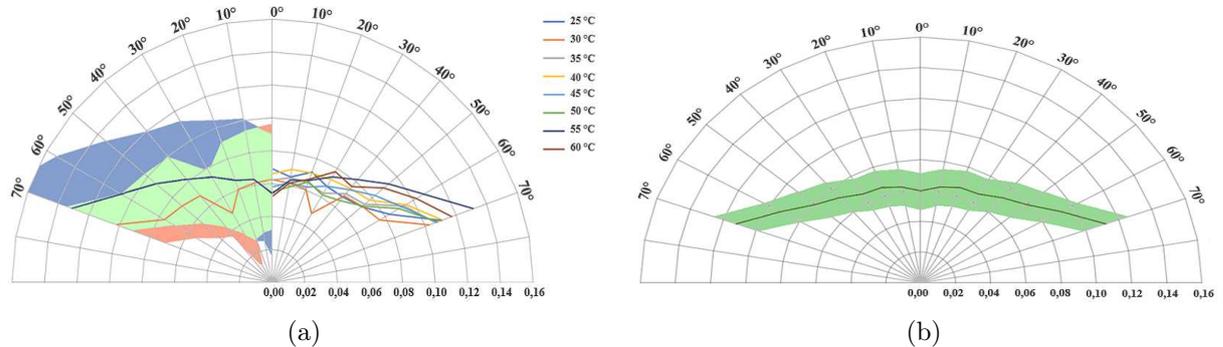
A proximidade entre as diferentes linhas no gráfico é uma evidência visual de que os resultados experimentais demonstram não haver uma influência significativa da temperatura da superfície do módulo sobre a emissividade direcional tanto para a sujidade urbana quanto para a sujidade mineral. Fato é que sob influência da temperatura (fixada a posição do termovisor), os valores de emissividade assumiram variações médias de 8,76% e 4,36% nos experimentos conduzidos para as sujidades urbana e mineral, respectivamente. Já para o segundo parâmetro cuja influência nos resultados pretendia-se investigar, o ângulo de visada tem um impacto muito mais significativo nos valores de emissividade da superfície avaliada, reiterando a forte característica direcional desta propriedade óptica. Haja vista as reduções de até 15% observadas para a emissividade nos experimentos conduzidos para as sujidades urbana e mineral (fixada a temperatura do módulo). A tendência apontada pelos experimentos é de reduções ainda maiores de emissividade, caso ângulos de visada superiores a 70° fossem avaliados.

Para confirmar a suposição de que a temperatura tem uma interferência discreta nos resultados, no lado esquerdo ainda deste primeiro gráfico das Figuras 4.6 e 4.7 foram traçadas apenas as linhas mais periféricas dos resultados, sendo os intervalos calculados para as incertezas de medição aplicados na forma de sombras nesta representação gráfica. Como, em ambos os casos, os intervalos de incerteza das linhas mais afastadas se sobrepõem ao longo de todo o gráfico, não existe garantia metrológica de diferença entre os resultados e, portanto, conclui-se que a temperatura da superfície não é uma variável de influência sobre a emissividade tanto para a sujidade urbana quanto para a sujidade mineral. Assim sendo, assumindo que apenas o ângulo de visada tem influência sobre os resultados obtidos, no segundo gráfico disposto nas Figuras 4.6 e 4.7 (b) são apresentados os resultados médios de emissividade, com suas respectivas incertezas. Neste gráfico é possível observar que a emissividade da superfície frontal do módulo fotovoltaico tem decaimento mais significativo para ângulos superiores a 50°, tanto no caso da sujidade urbana quanto no caso da sujidade mineral.

4.3.2 Refletividade Direcional

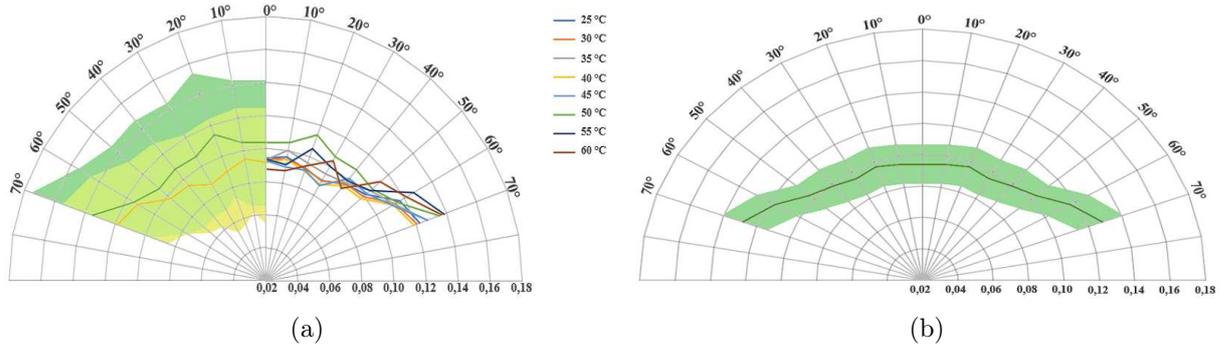
Partindo para a análise dos resultados de refletividade, duas representações polares são apresentadas tanto na Figura 4.8 (sujidade urbana) quanto na Figura 4.9 (sujidade minerária). Assim como na análise anterior, o primeiro gráfico (a) também está dividido em duas partes: na metade direita se encontram as curvas experimentais de refletividade em função do ângulo de visada para diferentes temperaturas; e na metade esquerda são representadas apenas as linhas mais periféricas dos resultados com indicação de seus respectivos intervalos de incerteza.

Figura 4.8 – Resultados para refletividade no modulo fotovoltaico com sujidade urbana, em função ângulo de visada da câmera termográfica.



Fonte: o autor.

Figura 4.9 – Resultados para refletividade no modulo fotovoltaico com sujidade minerária, em função ângulo de visada da câmera termográfica.



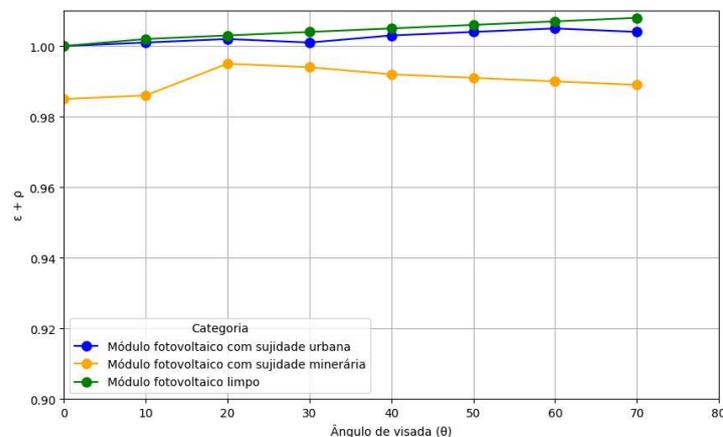
Fonte: o autor.

A partir da análise deste gráfico, ao se constatar a sobreposição dos intervalos de incerteza entre as curvas periféricas, demonstra-se não haver garantia estatística de diferença entre os resultados devido à temperatura, quando fixado um ângulo de visada. Portanto, é possível concluir que a temperatura da superfície também não é uma variável de influência sobre a refletividade da superfície avaliada. No segundo gráfico das Figuras 4.8 e 4.9 (b) é mostrada a curva resultante da média dos resultados, com suas respectivas incertezas. Assim como para a análise anterior, existe uma variação mais significativa entre os valores de refletividade da superfície quando os ângulos de visada são superiores a

40° no caso da sujidade urbana, e superiores a 50° no caso da sujidade minerária. Outra evidência da forte característica direcional da refletividade é a constatação experimental de aumentos percentuais de até 87% no comparativo entre os ângulos de visada de 0° e 70°, o que mostra que a reflexão pode ser um problema se a inspeção termográfica for realizada com a câmara muito inclinada em relação à superfície frontal do módulo fotovoltaico.

Fato anteriormente já observado nesta investigação experimental e novamente identificado nos ensaios envolvendo as sujidades urbana e minerária é a tendência de redução da emissividade e crescimento da refletividade na medida em que se aumentam os valores do ângulo de visada entre termovisor e superfície alvo. A suposição usualmente assumida nos modelos matemáticos envolvendo medições termográficas é de que a superfície inspecionada é cinza-difusora e opaca em relação à radiação térmica. Esse conjunto de suposições leva à relação típica de que $(\epsilon + \rho) = 1$, poucas vezes de fato verificada experimentalmente. O trabalho aqui desenvolvido coloca essa relação à prova com dados de ensaios conduzidos em laboratório e atesta que tal relação realmente se verifica. Na Figura 4.10 estão apresentados resultados para a soma dos valores médios de emissividade e refletividade direcionais obtidos para os ensaios realizados tanto para o módulo limpo, quanto para o módulo coberto das sujidades urbana e minerária.

Figura 4.10 – Soma dos valores médios de emissividade e refletividade direcionais obtidos.



Fonte: o autor.

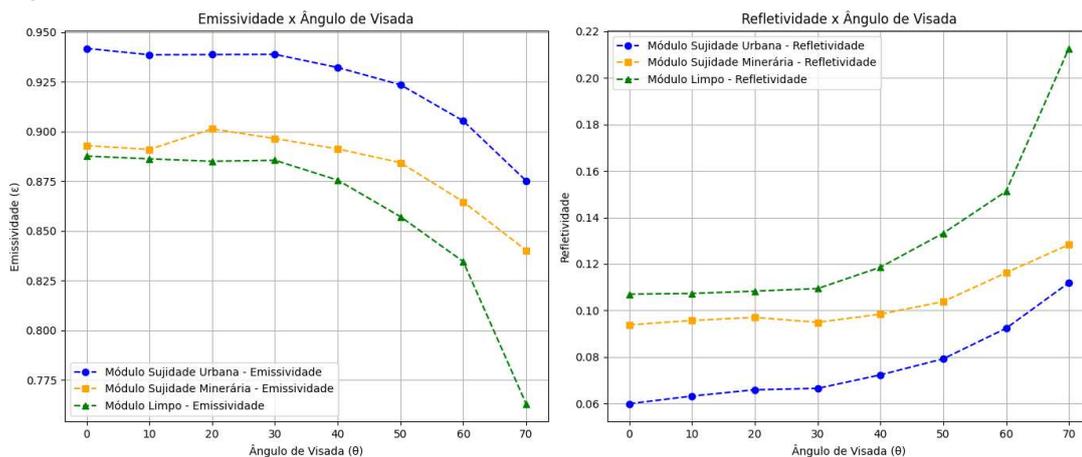
4.4 Comparativo de Resultados

Nesta seção são apresentadas algumas análises comparativas entre os principais resultados experimentais obtidos considerando as diferentes condições superficiais aplicadas ao módulo: superfície limpa, superfície coberta por sujidade urbana e superfície coberta por sujidade de origem minerária. Em um segundo momento, essa comparação é estendida para resultados que estão disponíveis em literatura específica.

4.4.1 Comparativo entre os Resultados dos Ensaios Realizados

A Figura 4.11 apresenta os resultados de emissividade e refletividade direcionais obtidos para as três condições superficiais do módulo simuladas experimentalmente. Cada ponto no gráfico representa o valor médio da propriedade direcional em um determinado ângulo de visada, considerando todas as 08 (oito) estimativas naquela direção obtidas para as diferentes temperaturas simuladas durante a investigação experimental.

Figura 4.11 – Valores médios de emissividade e refletividade direcional do módulo fotovoltaico.

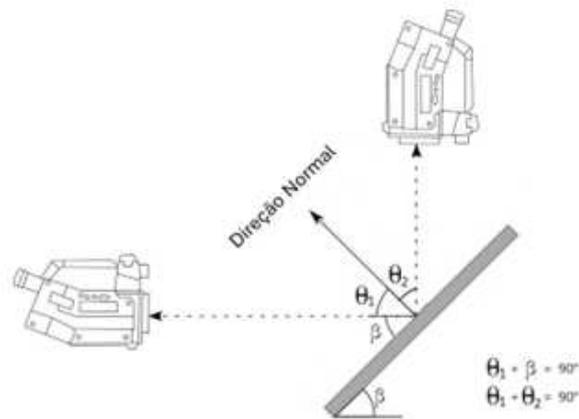


Fonte: o autor.

Os resultados apresentados na Figura 4.11 indicam que, independentemente da presença de sujidades, as propriedades ópticas da superfície do módulo fotovoltaico apresentam variações muito discretas para ângulos relativamente pequenos. Considerando os resultados para ângulos de visada até 40° , todas as variações identificadas para emissividade e refletividade direcionais foram inferiores a 0,015. Isso significa que os resultados de inspeções termográficas em módulos só terão alguma influência perceptível da direcionalidade a partir de inclinações superiores a esse valor. Admitindo que os módulos fotovoltaicos são instalados com o ângulo de inclinação igual ao da latitude da localidade (no Brasil, variando entre aproximadamente 5° e 35°), a Figura 4.12 deixa claro que inspeções verticais dos módulos, a exemplo de inspeções aéreas via drones, são mais indicadas do que uma inspeção horizontal. Haja vista que $\theta_2 < \theta_1$ nestas condições.

Seguindo com a análise dos resultados apresentados na Figura 4.11, um destaque deve ser dado à refletividade direcional (gráfico da direita), que pode ter o seu valor significativamente modificado, em termos percentuais, com o aumento do ângulo de visada. Isso significa que, em casos de inspeções termográficas realizadas com a termocâmera muito inclinada em relação à superfície alvo, o sinal de reflexão será proporcionalmente mais significativo. Isso pode mascarar consideravelmente os resultados, pois superfícies mais reflexivas tendem a apresentar nas inspeções termográficas temperaturas aparentes mais distorcidas em relação à temperatura real.

Figura 4.12 – Variação do ângulo de visada em diferentes condições de inspeção.



Fonte: o autor.

Por fim, ainda cabe destacar outro resultado que a Figura 4.11 acrescenta à análise. No comparativo entre os conjuntos de ensaios realizados simulando diferentes condições de sujidade, o módulo limpo foi o que apresentou os menores valores de emissividade direcional e, conseqüentemente, os maiores valores de refletividade direcional em todos os ângulos considerados. De fato, esperava-se que a superfície de vidro limpa realmente fosse mais reflexiva em relação ao demais ensaios conduzidos com sujidades aplicadas à superfície. Porém é interessante notar a coerência destes resultados com os ensaios de Difração de Raios-X (DRX) e Fluorescência de Raios-X (FRX) que apontavam que tanto a amostra de sujidade urbana quanto a amostra de sujidade minerária eram preponderantemente constituídas por hematita (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2), dois óxidos que apresentam alta emissividade e que, naturalmente, conferem à superfície em que são aplicados essa característica.

Todas as estimativas experimentais de emissividade e refletividade direcionais obtidas neste estudo vêm acompanhadas de suas respectivas incertezas. As incertezas de cada valor encontrado foram calculadas a partir da aplicação da Lei de Propagação de Incertezas segundo rotina de cálculo disponível no EES (*Engineering Equation Solver*). Adicionalmente, o *software* também permite que sejam calculadas as contribuições percentuais de cada variável de entrada do modelo matemático a partir das incertezas assumidas para essas variáveis (definidas na Seção 3.1.2). A Tabela 4.6 reúne os resultados dessa análise obtidos para uma temperatura de $50^\circ C$ e $\theta = 0^\circ$.

Análises como esta são importantes para a identificação das variáveis de entrada que contribuem de forma mais significativa para a incerteza da variável que está sendo estimada de forma indireta segundo um modelo matemático, tal como o balanço de sinais radiométricos empregado no presente estudo. O que a Tabela 4.6 indica é que se existir, em aplicações futuras, uma necessidade de melhoria da qualidade na estimativa da emissividade e refletividade direcionais segundo o procedimento experimental proposto, esforços devem ser concentrados na diminuição das incertezas de medição das temperaturas aparentes

Tabela 4.6 – Contribuições percentuais das fontes de incerteza consideradas na estimativa das propriedades ópticas do módulo fotovoltaico.

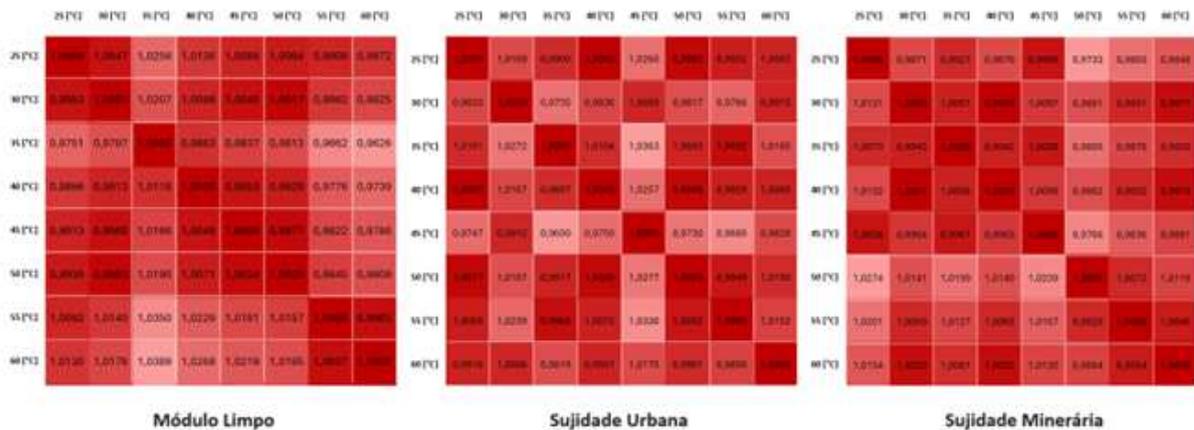
		Módulo Limpo	Sujidade Urbana	Sujidade Minerária
T_{atm}	Emissividade (ϵ)	0,00%	0,00%	0,00%
T_{CN}		0,02%	0,01%	0,02%
$T_{full,1}$		85,26%	85,84%	85,30%
$T_{full,2}$		13,66%	13,32%	13,64%
T_{obj}		0,40%	0,42%	0,39%
T_{ref}		0,60%	0,34%	0,58%
τ		0,06%	0,07%	0,07%
T_{atm}	Refletividade (ρ)	0,00%	0,00%	0,00%
T_{CN}		0,06%	0,04%	0,06%
$T_{full,1}$		46,47%	47,35%	46,51%
$T_{full,2}$		53,12%	52,41%	53,08%
T_{obj}		0,00%	0,00%	0,00%
T_{ref}		0,33%	0,19%	0,32%
τ		0,02%	0,01%	0,02%

Fonte: o autor.

($T_{full,1}$ e $T_{full,2}$) medidas com o termovisor, neste trabalho avaliadas em $\pm 2^\circ\text{C}$ de acordo com o manual do fabricante. Conforme evidenciado na Tabela 4.6, para todas as condições superficiais tratadas neste trabalho, a temperatura aparente é responsável por mais de 99% da incerteza obtida na estimativa da emissividade e refletividade da superfície do módulo fotovoltaico de silício.

Na Seção 4.1 e na Seção 4.3 inferiu-se que a temperatura não tinha influência significativa nos resultados obtidos para as propriedades ópticas da superfície do módulo por um argumento fundamentado em análise de incertezas. Alternativamente, essa influência pode ser avaliada através da dispersão nos resultados que a variável temperatura gera. A Figura 4.13 apresenta uma disposição matricial da razão dos resultados de emissividade normal ($\theta = 0^\circ$) obtidos para as diferentes temperaturas de ensaio, nas condições de módulo limpo e com sujidades.

Figura 4.13 – Razão de valores de emissividade normal nas diferentes temperaturas ensaiadas.



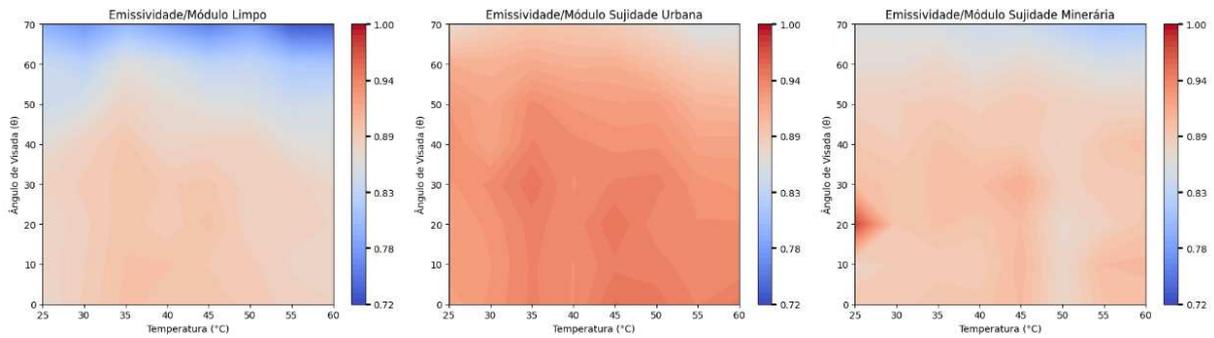
Fonte: o autor.

O valor registrado em cada célula é o resultado do valor de emissividade normal obtido para a temperatura indicada na coluna, dividido pelo valor de emissividade normal obtido para a temperatura indicada na linha. Naturalmente, as diagonais principais dessa representação gráfica recebem valores unitários e também funcionam como um eixo de simetria no aspecto visual do resultado apresentado. A escala de cores foi definida de forma a preencher com tonalidade mais escura as células com valores mais próximos de 1, e preencher com tonalidade mais clara as células com valores mais afastados de 1. Como pode-se perceber, a grande maioria das células é preenchida com cores mais escuras, o que indica que variar a temperatura nos ensaios não causou uma variação significativa nos valores de emissividade normal do módulo fotovoltaico, independentemente da superfície estar limpa ou com aplicação dos dois tipos de sujidade avaliados. Todos os valores de razão de emissividade normal obtidos encontram-se no intervalo $[0.96;1.04]$, o que indica que nenhuma variação superior a 4% foi detectada e que, portanto, reforça a ideia de que a temperatura não tem influência significativa sobre tal propriedade.

De forma mais geral, os resultados obtidos nos experimentos conduzidos podem ser avaliados sem restringir a análise a valores médios ou apenas uma direção em particular. Informações úteis podem ser extraídas retomando todos os pontos experimentais originalmente obtidos. Com esse intuito, as Figuras 4.14 e 4.15 apresentam uma distribuição em escala de cores dos valores de emissividade e refletividade direcionais, respectivamente, em função da temperatura da superfície (eixo x) e do ângulo de visada (eixo y). De fato, o que se tem nas Figuras 4.14 e 4.15 é uma representação gráfica do banco de dados levantado no presente trabalho. Cada figura está dividida entre os resultados obtidos para o módulo fotovoltaico limpo (à esquerda), com sujidade urbana (ao centro) e com sujidade minerária (à direita).

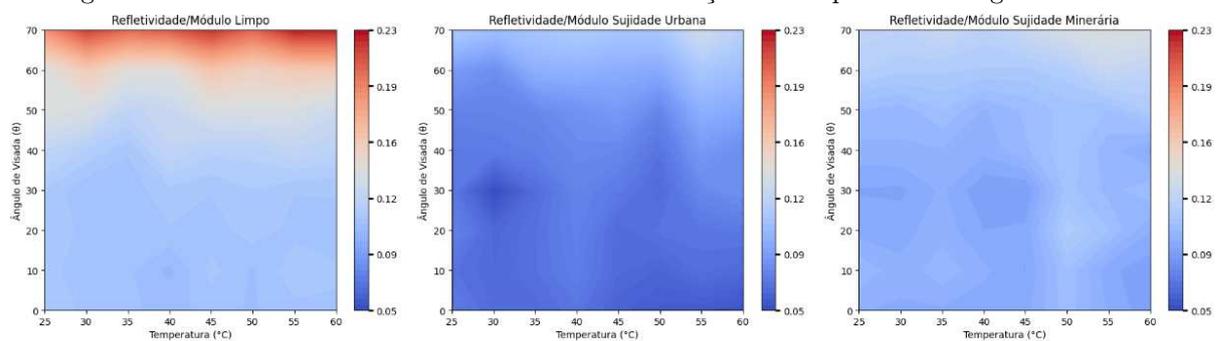
Ao avaliar essa representação do conjunto de resultados, é possível ter uma noção mais clara, ainda que qualitativa, da distribuição de valores das propriedades em função das variáveis de controle do experimento. Em todos os gráficos apresentados, percebe-se que as maiores variações (gradientes de cores) detectáveis para emissividade e refletividade acontecem na vertical e, em contrapartida, variações bem discretas acontecendo na horizontal. O significado disso é que as propriedades ópticas avaliadas são muito mais influenciadas pela variável que se encontra disposta no eixo y (ângulo de visada) do que pela variável indicada no eixo x (temperatura). Constatação em total acordo com os resultados e análises anteriormente apresentados.

Figura 4.14 – Valores de emissividade direcional em função de temperatura e ângulo de visada.



Fonte: o autor.

Figura 4.15 – Valores de refletividade direcional em função de temperatura e ângulo de visada.



Fonte: o autor.

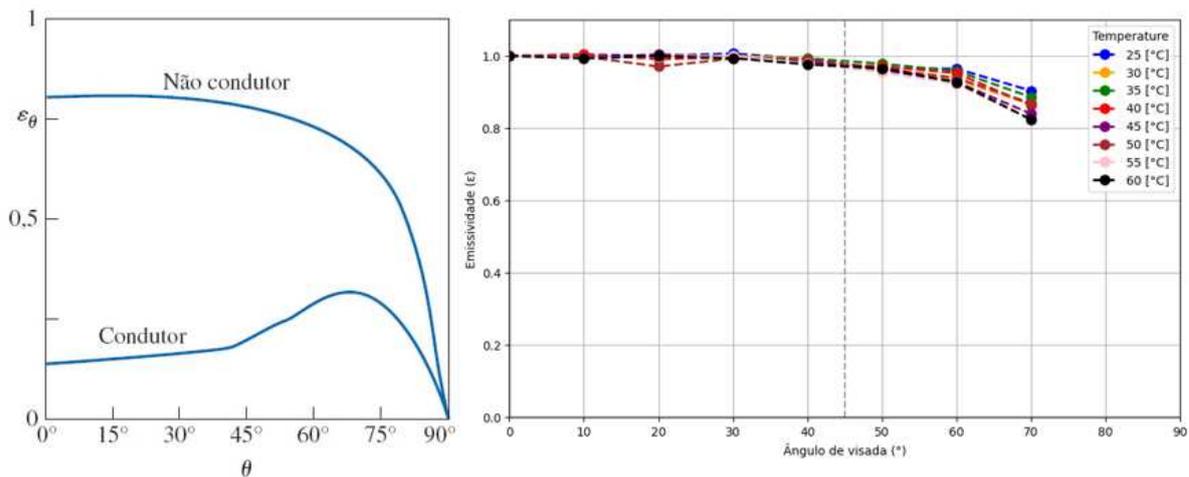
4.4.2 Comparativo com Referências Externas ao Trabalho

Primeiramente os resultados experimentais obtidos são comparados com o comportamento óptico previsto para materiais não condutores, classe à qual se insere o material que constitui a superfície frontal dos módulos fotovoltaicos de silício. Em seguida, e de forma mais específica, os dados são comparados à norma (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2016) : *Outdoor infrared thermography of photovoltaic modules and plants*, além de outras pesquisas correlatas disponíveis em literatura.

Segundo Bergman *et al.* (2017), um emissor difuso possui emissividade constante, independente da direção. Embora essa seja uma aproximação razoável, todas as superfícies reais apresentam algum desvio desse comportamento. Para materiais condutores, a emissividade direcional é praticamente constante para ângulos baixos, apresenta algum aumento em uma faixa intermediária de valores de ângulo de visada, seguido por um declínio acentuado até zero para ângulos ainda maiores. Já para materiais não condutores, como o material tratado no presente trabalho, a emissividade direcional, em geral, é aproximadamente constante para uma ampla faixa até $\theta \lesssim 70^\circ$, diminuindo acentuadamente a partir disso. A Figura 4.16 apresenta (à esquerda) um comparativo entre o comportamento típico esperado para a emissividade direcional de materiais condutores e não condutores. No gráfico da direita são apresentados os resultados normalizados de emissividade direcional obtidos

nos ensaios, calculados como a razão entre a emissividade direcional em um determinado ângulo de visada (ε_θ) e a emissividade na direção normal (ε_n). A partir desta construção, todos os gráficos apresentados do lado direito da Figura 4.16 se iniciam com o valor de $\varepsilon_\theta/\varepsilon_n = 1$.

Figura 4.16 – (a) Distribuição direcional representativa da emissividade em diferentes materiais; (b) Resultados para emissividade direcional normalizada no módulo fotovoltaico limpo.



Fonte: (a) Bergman et al. (2017); (b) o autor.

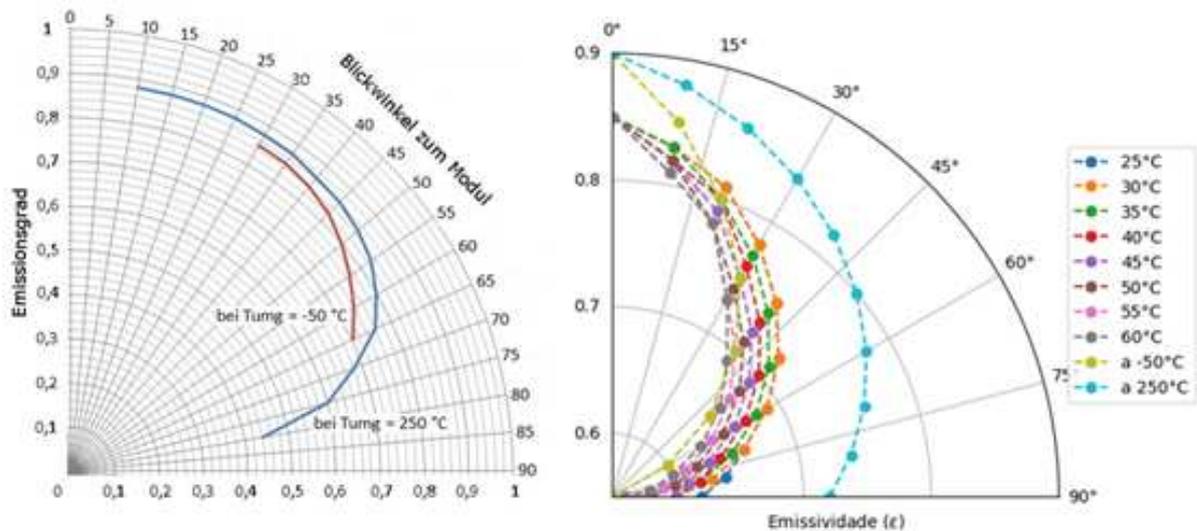
Muitas vezes a emissividade de uma superfície é caracterizada em termos de uma “emissividade hemisférica” (ε), que seria um valor representativo de emissividade utilizado no cálculo da emissão global de radiação térmica, já contabilizando todas as direções. Bergman *et al.* (2017) indica que, embora existam direções preferenciais para a emissão, a emissividade hemisférica não difere acentuadamente do valor da emissividade normal à superfície. Indica ainda que para materiais não condutores, a razão $\varepsilon/\varepsilon_n$ raramente se situa fora do intervalo $[0.95;1.00]$, ou seja, comportando-se como um emissor difuso, em termos práticos.

Apesar do presente trabalho não se propor a calcular a emissividade hemisférica da superfície do módulo fotovoltaico, o resultado apresentado na Figura 4.16(b) segue intimamente relacionado a essa discussão, pois evidencia que a razão $\varepsilon_\theta/\varepsilon_n$ é aproximadamente 1 para uma ampla faixa de ângulos de visada, se comportando praticamente como um emissor difuso para $\theta \lesssim 50^\circ$. A partir desse valor, a emissividade direcional tem uma diminuição mais acentuada, que só não é mais evidente nos resultados pelo fato dos ensaios não ultrapassarem $\theta = 70^\circ$.

A norma International Electrotechnical Commission (2016) descreve que os vidros não ferrosos, de fato, apresentam uma diminuição nos valores de emissividade direcional com o ângulo de visada. O comportamento geral das curvas indicadas pela norma levantadas para diferentes temperaturas do vidro pode ser consultado na Figura 4.17 (à esquerda). Nota-se que é necessária uma significativa variação de temperatura para que se torne perceptível alguma alteração na emissividade direcional do vidro por efeito dessa variável,

algo já evidenciado nos resultados do presente trabalho. Ainda em relação à Figura 4.17 (à direita) é feito um comparativo entre os valores de emissividade direcional do vidro apontados pela norma e os valores experimentais obtidos para as diferentes temperaturas ensaiadas. Neste comparativo, as duas últimas curvas indicadas na legenda (linhas verde e azul) contêm extrapolações dos valores informados em norma para cobrir a indisponibilidade de dados para ângulos de visada menores.

Figura 4.17 – Comparação entre norma IEC 62466-3 (2016a) e resultados experimentais de emissividade direcional obtidos para o módulo fotovoltaico limpo.



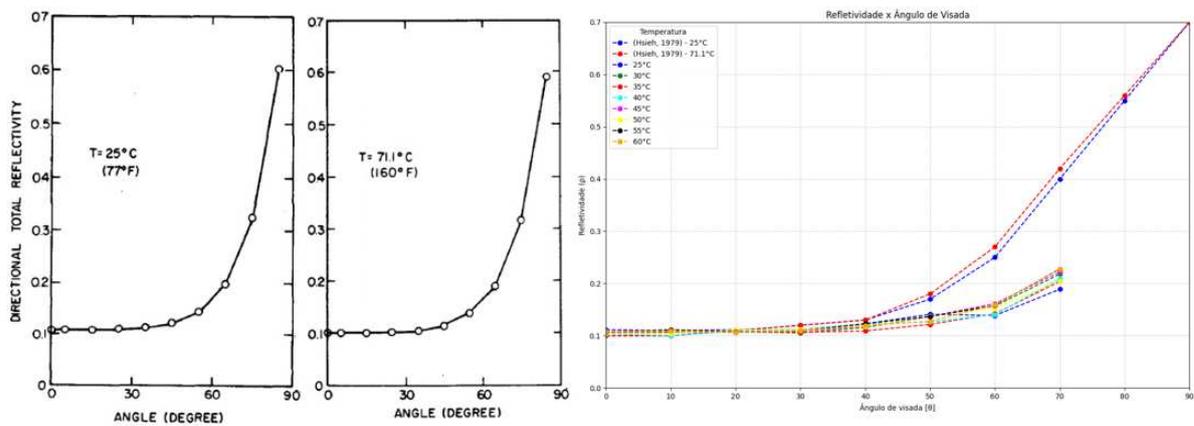
Fonte: adaptado de International Electrotechnical Commission (2016).

No comparativo com a curva indicada pela norma para a emissividade direcional do vidro a uma temperatura de 50°C, é clara a congruência com os resultados experimentais. Destaca-se, portanto, a importância do ângulo de visada na determinação da emissividade do vidro como uma etapa prévia à realização de qualquer inspeção termográfica sobre esse tipo de superfície. De forma geral, as características verificadas são a diminuição da emissividade com o aumento do ângulo de visada e a relativa estabilidade de seu valor com variações de temperatura.

Hsieh e Su (1979) conduziram experimentos em diferentes tipos de vidros com o objetivo de mensurar suas propriedades radiativas térmicas e avaliar sua adequabilidade ao projeto de coletores solares. Dentre as propriedades ópticas avaliadas, destaca-se a refletividade direcional do vidro para diferentes temperaturas de referência. Conforme apresentado na Figura 4.18, a refletividade direcional apresenta relativa estabilidade em seus valores para baixos ângulos de visada, aproximadamente até 40°. A partir desse limiar, observa-se que incrementos no ângulo de visada ocasionam um significativo aumento no valor da refletividade, reforçando a forte característica direcional que esta propriedade tem especialmente nas maiores inclinações.

Ainda em relação à Figura 4.18, no comparativo com os resultados experimentais obtidos no presente trabalho, o comportamento geral da curva de refletividade em função do ângulo de visada é percebido, incluindo a pouca influência da temperatura de referência considerada e a transição próxima aos 40° que marca o início da influência direta do ângulo de visada nos valores reportados. Nesse comparativo há um distanciamento entre os resultados de refletividade direcional do artigo e os valores experimentais obtidos no presente trabalho para ângulos de visada maiores, porém cabendo destacar a existência de diferentes tipos de vidro com características ópticas próprias e que não há informações disponíveis para garantir que a mesma cobertura de vidro foi avaliada em ambos os trabalhos.

Figura 4.18 – Comparação entre resultados de literatura e resultados experimentais de refletividade direcional obtidos para o módulo fotovoltaico limpo.



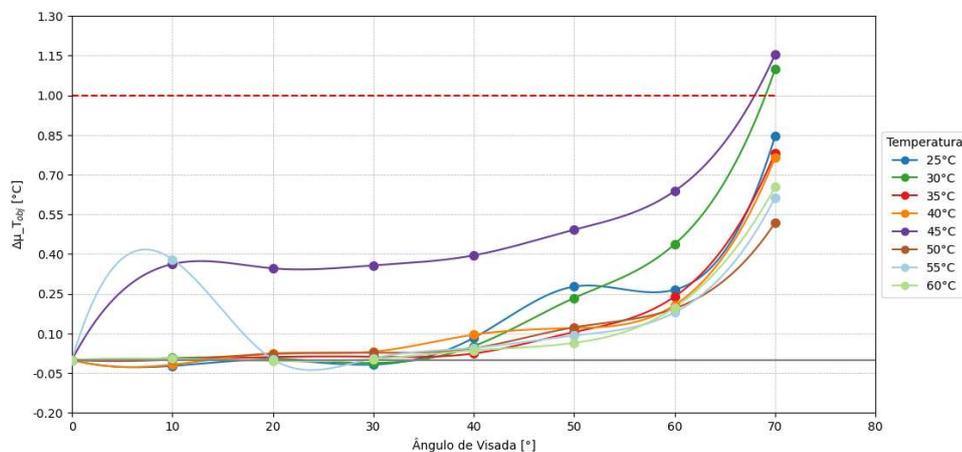
Fonte: Adaptado de Hsieh e Su (1979).

4.5 Recomendações práticas para as inspeções termográficas

Com os valores de emissividade, refletividade e suas respectivas incertezas determinados para o módulo testado em laboratório, a parte final deste trabalho dedica-se a investigar o impacto do ângulo de visada sobre os valores de temperatura que seriam obtidos através das inspeções termográficas em uma situação real de medição. O objetivo desta análise é delimitar faixas de ângulo de visada adequadas para a utilização da termografia, buscando compreender como a inclinação da termocâmera pode levar a uma interpretação equivocada da condição de um módulo ou de uma *string* em comparação com a inspeção “ideal”, definida como a inspeção termográfica sendo executada com o termovisor perpendicular à superfície do módulo.

No contexto da análise de falhas, estudos como os de Moretón, Lorenzo e Narvarte (2015) e (RAHAMAN; URMEE; PARLEVLLET, 2022) destacam a presença de *hot-spots* como um dos principais sinais de mau funcionamento dos módulos. Nos casos mais extremos, conhecidos como *major hot-spots* (pontos quentes maiores), pode haver perdas de tensão de saída superiores a 10%. Em casos menos graves, denominados *minor hot-spots* (pontos quentes menores), esses *hot-spots* podem indicar defeitos internos, como célula *shunt*. Tendo como referência as faixas de variação de temperatura indicativas de *hot-spots* reportadas em literatura, a Figura 4.19 exibe o gráfico do incremento das incertezas de medição ($\Delta u_{T_{obj}}$), em função do ângulo de visada. Cabe destacar que cada valor reportado é o incremento de incerteza em relação à incerteza da inspeção definida como “ideal”.

Figura 4.19 – Incremento das incertezas de medição de temperatura por termografia em função do ângulo de visada para o módulo limpo.



Fonte: o autor.

Conforme indicado por (RAHAMAN; URMEE; PARLEVLLET, 2022), variações de temperatura acima de 1°C já podem ser consideradas *hot-spots* indicativos de alguns tipos de falhas em módulos fotovoltaicos. Dessa forma, é recomendável que o incremento de incerteza de temperatura entre as inspeções termográficas realizadas com uma determinada inclinação em comparação com as inspeções perpendiculares também não ultrapasse essa faixa de 1°C, sob risco de comprometer o diagnóstico. Observando os resultados, verifica-se que apenas para ângulos superiores a 60° esse valor foi excedido, especificamente nas curvas referentes às temperaturas de 30°C e 45°C. Para as demais temperaturas, valores próximos ao limite foram observados em ângulos de visada de 70°, porém ainda abaixo de 1°C.

Apesar da Figura 4.19 apresentar os resultados de incerteza considerando a temperatura da superfície como variável a ser considerada no cálculo, vale destacar que o presente trabalho evidenciou que a influência da temperatura sobre as propriedades ópticas é muito baixa. Além disso, é inviável basear uma recomendação técnica de realização de inspeções termográficas no conhecimento prévio da temperatura superficial do módulo que, afinal, é a variável que se pretende medir. Nesse sentido, um melhor caminho é estabelecer os valores médios das propriedades considerando apenas o ângulo de visada

como variável de influência. A Tabela 4.7 apresenta os resultados médios obtidos para as propriedades ópticas e suas incertezas. Essa tabela também apresenta os valores de incerteza da temperatura ($u_{T_{ob}}$) e de incremento de incerteza ($\Delta u_{T_{ob}}$) a partir da inspeção perpendicular, considerando uma medição termográfica hipotética de uma superfície a 50°C .

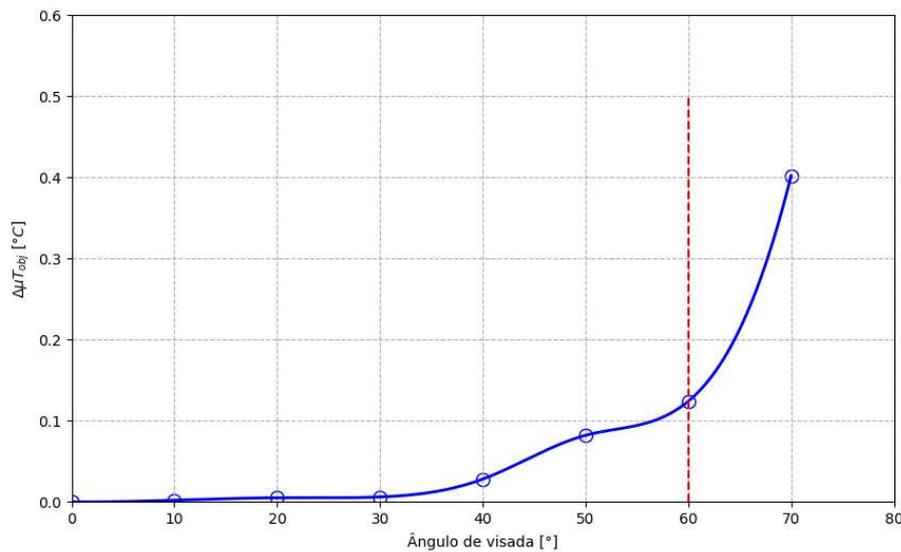
Tabela 4.7 – Propriedades ópticas médias e incertezas de medição de temperatura superficial do módulo fotovoltaico (limpo) para diferentes ângulos de visada.

Ângulo	ε	u_{ε}	ρ	u_{ρ}	$u_{T_{ob}}$ [°C]	$\Delta u_{T_{ob}}$ [°C]
0°	0,8876	0,0188	0,1070	0,0125	2,773	-
10°	0,8862	0,0188	0,1073	0,0125	2,775	0,002
20°	0,8850	0,0188	0,1083	0,0126	2,778	0,005
30°	0,8855	0,0188	0,1094	0,0126	2,779	0,006
40°	0,8755	0,0187	0,1186	0,0127	2,801	0,028
50°	0,8571	0,0185	0,1332	0,0129	2,855	0,082
60°	0,8345	0,0182	0,1512	0,0132	2,897	0,124
70°	0,7660	0,0178	0,2127	0,0143	3,175	0,402

Fonte: o autor.

Ao se trabalhar com a média dos resultados, foram obtidos valores de incrementos de incerteza menores em comparação com os resultados da Figura 4.19, o que é esperado visto que as incertezas das propriedades ópticas médias são menores que as incertezas de cada valor individualmente medido. No entanto, a forma como o incremento de incerteza varia em relação ao ângulo de visada segue um comportamento parecido, conforme evidenciado na Figura 4.20. Nela, pode-se perceber que variações bruscas a partir de 60° se mantêm, o que serve de alerta para se evitar a realização de inspeções termográficas em módulos fotovoltaicos sob ângulos de visada acima deste valor.

Figura 4.20 – Incremento das incertezas de medição considerando valores médios na avaliação das propriedades ópticas do módulo fotovoltaico.



Fonte: o autor.

5 Conclusão

O presente estudo teve como objetivo principal desenvolver uma metodologia para determinar a viabilidade da realização de inspeções termográficas em usinas fotovoltaicas, com ênfase na caracterização das propriedades ópticas dos módulos de silício sob diferentes condições de sujidade. A complexidade das inspeções termográficas em ambientes externos, sujeitas a diversas fontes de interferência, torna essencial a quantificação das incertezas envolvidas, seguindo as diretrizes do Método GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), aplicado neste trabalho para avaliar a precisão dos resultados obtidos.

Uma das etapas fundamentais deste estudo foi a caracterização das propriedades ópticas dos módulos fotovoltaicos em estado limpo e com diferentes tipos de sujidade, urbana e minerária. A emissividade e a refletividade direcionais dos módulos foram medidas em ambiente controlado, onde se eliminou a interferência de fontes externas, assegurando a confiabilidade dos resultados. A análise revelou que a emissividade diminui à medida que o ângulo de visada aumenta, com uma queda mais acentuada para ângulos superiores a 40° . Essa tendência é menos influenciada pela temperatura do módulo, sugerindo que o ângulo de visada é a principal variável a ser considerada durante as inspeções termográficas.

Quando se analisou a sujidade urbana e minerária, observou-se que essas condições afetam significativamente as propriedades ópticas dos módulos. A sujidade urbana, caracterizada pela presença de partículas finas de silicatos e óxidos de ferro, apresentou uma redução média de 8,76% na emissividade, enquanto a sujidade minerária, composta principalmente por partículas mais grossas de óxidos metálicos, resultou em uma redução de 4,36%. Essa diferença pode ser atribuída à composição química das sujidades, determinada por ensaios de Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX), que identificaram a presença predominante de magnetita e hematita, compostos que influenciam diretamente o comportamento térmico das superfícies dos módulos.

A refletividade, por sua vez, aumentou com o ângulo de visada, especialmente em ângulos superiores a 50° , tanto para módulos limpos quanto sujos. Isso sugere que a sujidade tende a reduzir a refletividade em comparação ao estado limpo, mas essa redução é compensada pelo aumento do ângulo de visada, o que deve ser considerado ao planejar inspeções termográficas. Além disso, o estudo indicou que, apesar da sujidade influenciar a refletividade, a temperatura do módulo não exerce um papel significativo, reafirmando a importância do ângulo de visada como a variável crítica.

Outro aspecto abordado neste estudo foi a aplicação do Método GUM para a análise de incertezas. A metodologia implementada permitiu estimar a incerteza total associada às medições de emissividade e refletividade, levando em conta fatores como a temperatura do

objeto, a temperatura aparente medida pelo termovisor, e a transmissividade atmosférica. A análise mostrou que as incertezas aumentam significativamente em ângulos de visada superiores a 60° , o que pode comprometer a detecção de *hot-spots* e, conseqüentemente, a eficácia das inspeções.

Com base nos resultados obtidos, foi possível formular recomendações técnicas para a realização de inspeções termográficas em módulos fotovoltaicos. Dentre as principais recomendações, destaca-se a necessidade de manter o ângulo de visada da câmera termográfica abaixo de 60° para minimizar as incertezas de medição e garantir a precisão na detecção de anomalias térmicas. Além disso, sugere-se que as inspeções considerem as características específicas das sujidades presentes nos módulos, uma vez que essas influenciam diretamente as propriedades ópticas e, portanto, os resultados das medições.

Em suma, o trabalho atingiu seus objetivos ao desenvolver uma metodologia tecnicamente fundamentada para a realização de inspeções termográficas em usinas solares fotovoltaicas. A integração dos resultados experimentais, aliados à análise de incertezas pelo Método GUM, permite uma aplicação prática para o estudo, contribuindo para a otimização das operações e a manutenção eficiente dos sistemas fotovoltaicos. Este estudo fornece uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de inspeção e manutenção de sistemas solares.

A continuidade deste trabalho inclui a expansão dos estudos sobre sujidade em módulos fotovoltaicos, com análises quantitativas que possibilitem maior controle sobre a quantidade e a forma de aplicação dos diferentes tipos de sujidade. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de estudos em ambientes externos, sob condições reais de acúmulo de sujeira, como em áreas urbanas e minerárias, visando avaliar o desempenho dos módulos em situações representativas. Além disso, a aplicação de termografia considerando as influências direcionais sobre as propriedades ópticas pode fornecer resultados mais consistentes. Estes estudos em campo, com módulos em operação, permitirão uma análise mais precisa dos impactos da sujidade nas propriedades ópticas e na eficiência energética dos módulos fotovoltaicos, ampliando o entendimento sobre as condições que afetam a performance em ambientes diversificados.

Publicações geradas ao longo da dissertação

1. OLIVEIRA, F.A.F. Artigo apresentado no I Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG 2022, intitulado “Metodologia para Determinação de Propriedades Ópticas em Módulos Fotovoltaicos por Termografia”.
2. OLIVEIRA, F.A.F. Artigo apresentado no II Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG 2023, intitulado “Avaliação da Influência da Variação das Propriedades Ópticas sobre Inspeções Termográficas em Módulos Fotovoltaicos”.
3. OLIVEIRA, F.A.F.; PEREIRA, R.G.S.; PORTO, M.P.; FERREIRA, R.A.M. Artigo apresentado no COBEM 2023, intitulado “Evaluation of the Influence of Varying Optical Properties on Thermographic Inspections of the Front Surface of Silicon Photovoltaic Modules”.
4. OLIVEIRA, Flávia Aparecida Ferreira de; PEREIRA, Robert Gustavo Silva; PORTO, Matheus Pereira; FERREIRA, Rafael Augusto Magalhães. **Long-wavelength infrared optical properties of polycrystalline silicon PV modules under clean and soiled conditions for thermography analysis**. *Solar Energy*, v. 284, p. 113028, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113028>.

Referências

- AMERICAN PHYSICAL SOCIETY (APS). *First Practical Silicon Solar Cell*. 2009. Disponível em: <https://www.aps.org>. Acesso em: 21 jun. 2024. Citado na página 26.
- AMRI, F. Renewable and non-renewable energy and trade into developed and developing countries. *Quality & Quantity*, v. 53, n. 1, p. 377–387, 2019. Citado na página 24.
- ANZOLIN, H. d. M.; DANI, N. *O Emprego Da Fluorescência de Raios-X Na Determinação Da Composição Química De Rochas Fosfáticas*. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Citado na página 37.
- ARAÚJO, D. N.; CARVALHO, P. C. Marques de; DUMONT, I. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. *Revista Tecnologia*, 2019. Citado na página 33.
- ARAÚJO, D. N.; COSTA, S. C. S.; DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C. M. d. Impactos da sujeira e efeitos da limpeza no desempenho de módulos fotovoltaicos. In: *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Fortaleza: [s.n.], 2020. 01 a 05 de junho de 2020. Citado na página 47.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16969:2021: Ensaios não destrutivos — Termografia infravermelha — Princípios gerais*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. Citado na página 39.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E1862-14(2022): Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers*. West Conshohocken, PA: [s.n.], 2022. Citado na página 44.
- AZEVEDO, L. F. d.; FONSECA, P. C. D.; MISSIO, F. J. Distribuição de renda e regime de crescimento econômico no brasil: avaliação e propostas. *Revista de Economia Política*, v. 42, n. 1, p. 25–47, jan-mar 2022. Citado na página 25.
- BAHOU, S. Techno-economic assessment of a hydrogen refuelling station powered by an on-grid photovoltaic solar system: A case study in morocco. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier, 2023. Citado na página 28.
- BAUER, E.; FREITAS, V. P. d.; MUSTELIER, N.; BARREIRA, E.; FREITAS, S. S. d. Infrared thermography – evaluation of the results reproducibility. *Structural Survey*, v. 33, n. 1, p. 20–35, 2015. Citado na página 41.
- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2017. Citado 4 vezes nas páginas 41, 67, 85 e 86.
- BEZERRA, F. D. Energia solar. *Caderno Setorial ETENE, Banco do Nordeste*, Ano 8, n. 295, jul 2023. Citado na página 32.
- BICH, W.; PENNECCHI, F. The gum, guide to the expression of uncertainty in measurement, and related documents. present status and future developments. In:

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA, INRIM, TORINO, ITALY. *XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a Sustainable Development*. Rio de Janeiro, Brazil, 2006. Citado na página 49.

BISAGA, I.; PARIKH, P.; TOMEI, J.; TO, L. S. Mapping synergies and trade-offs between energy and the sustainable development goals: A case study of off-grid solar energy in rwanda. *Energy Policy*, v. 149, 2021. Citado na página 28.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. *Introdução à difração de raios-x em cristais*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2000. Citado na página 36.

BOUZGUENDA, M.; BASHMAIL, B.; AL-KHALDI, M. B. Y.; AL-JAFAR, N.; AL-JASIM, S.; AQIL, M. A. A. Design of an automated cleaning system for solar panels. In: *Materials Research Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2023. v. 31, p. 408–414. Citado na página 35.

BRUM, M. A.; BECK, F.; SILVA, O. E.; CALLEGARI, G. L.; CARARA, M. A.; MARQUES, S.; RIGUE, J. N. Utilização da técnica de difração de raios-x para o estudo de amostras de ti-6al-4v forjadas e fabricadas por fusão seletiva a laser. *Ciência e Natura*, v. 40, n. Especial, p. 249–254, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

BÜHLER, A. J.; SANTOS, F. H. d.; GABE, I. J. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. In: CBENS. *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VII*. Gramado, 2018. Citado na página 28.

COELHO, R. F. *Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

Comunidad de Madrid. *Guía de la Termografía Infrarroja: Aplicaciones en Ahorro y Eficiencia Energética*. Madrid: Consejería de Economía y Hacienda, 2011. Citado na página 46.

CONEGLIAN, A. *Avaliação do tempo e métodos de aquecimento de toras de Eucalyptus grandis Hill ex-Maiden e sua influência no rendimento em laminação e na qualidade das lâminas*. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2006. Xiv, 100 f. Citado na página 60.

CORTESE, T. T. P.; SOTTO, D.; AUMOND, J. J. Mudanças climáticas e planejamento urbano: cenários e desafios. *Journal of Environmental Management & Sustainability*, v. 12, n. 2, p. 1–3, 2023. Edição Especial. Citado na página 23.

COSTA, A. L. C.; HIRASHIMA, S. Q. d. S.; FERREIRA, R. V. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos fv. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 21, p. 201–220, fev 2021. Citado na página 49.

CRESESB. *Manual de Engenharia Fotovoltaica*. Rio de Janeiro, 2014. Acesso em: 17 ago. 2024. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Citado na página 21.

DANTAS, G.; POMPERMAYER, F. Energia solar no brasil: histórico e planejamento energético. *Revista de Planejamento Energético*, v. 24, n. 3, p. 67–89, 2018. Disponível em: <http://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/rppublica/article/view/18489>. Acesso em: 18 jun. 2024. Citado na página 32.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. Citado na página 27.

DWIPUTRA, F.; SAPUTRI, F. R. Analysis of renewable energy potential in south sulawesi, indonesia. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, v. 8, n. 2, p. 1157–1165, 2024. Citado na página 23.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022*. 2022. Acesso em: 16 jun. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

FAREED, Z.; PATA, U. K. Renewable, non-renewable energy consumption and income in top ten renewable energy-consuming countries: Advanced fourier based panel data approaches. *Energy*, 2022. Citado na página 24.

FARMAKI, S.; EXARCHOS, D. A.; TRAGAZIKIS, I. K.; MATIKAS, T. E.; DASSIOS, K. G. A novel infrared thermography sensing approach for rapid, quantitative assessment of damage in aircraft composites. *Sensors*, v. 20, n. 15, p. 4113, 2020. Citado na página 39.

FERREIRA, R. *Modelagem Matemática Aplicada ao Diagnóstico de Falha de Componentes Elétricos de Subestação*. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Citado na página 43.

FERREIRA, R. A. M. *Metodologia para Avaliação do Desempenho de Painéis Fotovoltaicos Utilizando um Modelo Elétrico-Térmico e Termografia Quantitativa*. 118 p. Tese (Tese (Doutorado)) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 48.

FERRETTI, M. Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de raios x (frx) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais. *Revista CPC*, v. 7, p. 74–98, 2008. Citado na página 36.

FILHO, H. D. d. F.; LOPES, G. A. d. C. Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de difratometria de raios-x. *Estação Científica (UNIFAP)*, v. 3, n. 1, p. 31–45, 2013. Citado na página 36.

FLIR. *User's Manual: FLIR SC6xx*. Wilsonville, EUA, 2011. Citado na página 44.

FRAGA, M. M. *Avaliação do Impacto de Sujidades no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Minas Gerais*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, 2018. Citado na página 34.

GHOLAMI, A.; KHAZAEI, I.; ESLAMI, S.; ZANDI, M.; AKRAMI, E. Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance. *Solar Energy*, v. 159, p. 346–352, 2018. Citado na página 33.

GLOWACZ, A. Thermographic fault diagnosis of electrical faults of commutator and induction motors. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 121, p. 105962, 2023. Citado na página 39.

GÜR, T. M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, Elsevier, v. 89, p. 100965, 2022. Acesso em: 17 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/journal/progress-in-energy-and-combustion-science>>. Citado na página 21.

HABTE, A.; SENGUPTA, M.; REDA, I.; ANDREAS, A.; KONINGS, J. *Calibration and Measurement Uncertainty Estimation of Radiometric Data: Preprint*. 2014. Disponível em: <http://example.com>. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado na página 50.

HERNÁNDEZ-CALLEJO, L.; GALLARDO-SAAVEDRA, S.; ALONSO-GÓMEZ, V. A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, v. 188, p. 426–440, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

HERYANTO, H.; TAHIR, D. The correlations between structural and optical properties of magnetite nanoparticles synthesised from natural iron sand. *Ceramics International*, v. 47, n. 12, p. 16820–16827, 2021. Citado na página 72.

HSIEH, J. S.; SU, C. C. Thermal radiative properties of different types of glass for solar collectors. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 101, p. 123–128, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.

HØIAAS, I.; GRUJIC, K.; IMENES, A. G.; BURUD, I.; OLSEN, E.; BELBACHIR, N. Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 161, p. 112353, 2022. Acesso em: 8 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122001878>>. Citado na página 49.

INFRATHERM. *Termografia*. 2024. Acesso em: 10 jul. 2024. Disponível em: <<https://www.infratherm.net.br/termografia>>. Citado na página 42.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 62466-3: Outdoor infrared thermography of photovoltaic modules and plants*. Geneva, Switzerland, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 85, 86 e 87.

International Organization for Standardization. *ISO/IEC Guide 98-3:2008: Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2008. Citado na página 50.

JOSHI, A. S.; DINCER, I.; REDDY, B. V. Performance analysis of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 8, p. 1884–1897, 2009. Citado na página 26.

Júnior, J. G. S.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Gramado: [s.n.], 2018. 17 a 20 de abril de 2018. Citado na página 47.

JÚNIOR, W. D. C. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5th. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Citado na página 36.

KAYRI, I.; BAYAR, M. T. A new approach to determine the long-term effect of efficiency losses due to different dust types accumulation on pv modules with artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, p. 140282, 2024. Citado na página 33.

KAZEM, H. Impact of long-term dust accumulation on photovoltaic module performance — a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 119568–119593, 2023. Citado na página 38.

KAIUZÁ, M.; HATZOPOULOS, A. Application of extension rings in thermography for electronic circuits imaging. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, v. 21, n. 1, p. 50–68, 2024. Citado na página 39.

KUMAR, K. *A History of the Solar Cell, in Patents*. 2020. Disponível em: <http://example.com>. Acesso em: 12 jul. 2024. Citado na página 26.

LAMEIRINHAS, R. A. M.; TORRES, J. P. N.; CUNHA, J. P. d. M. A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. *Energies*, v. 13, n. 11, 2020. Citado na página 26.

LI, J.; XU, X. Can esg rating reduce corporate carbon emissions? – an empirical study from chinese listed companies. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, 2024. Citado na página 23.

LIMA, A. A.; MENEZES, N. P.; SANTOS, S.; AMORIM, B.; THOMAZI, F.; ZANELLA, F.; HEILMANN, A.; BURKARTER, E.; DARTORA, C. A. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, 2020. E20190191. Citado na página 27.

LOPES, M. d. S.; BRITO, D. M. C. Impactos socioambientais ocasionados por hidrelétrica no vale do jari, amapá, brasil: percepções comunitárias. *Ambiente & Sociedade*, v. 24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc2021v24e0121A0>. Citado na página 25.

LYRA, A. C. A. d.; AZEVEDO, R. d. S.; PEREIRA, T. B. *et al.* Utilização da termografia para prevenção de lesões musculoesqueléticas no meio desportivo. *Ciência Atual*, v. 16, n. 2, p. 112–120, 2020. Citado na página 39.

MAGHAMI, M. R.; HIZAM, H.; GOMES, C.; RADZI, M. A. M.; REZADAD, M. I.; HAJIGHORBANI, S. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1307–1316, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

MAKRIDES, G.; ZINSSER, B.; PHINIKARIDES, A.; SCHUBERT, M.; GEORGHIOU, G. E. Temperature and thermal annealing effects on different photovoltaic technologies. *Renewable Energy*, v. 43, p. 407–417, 2012. Citado na página 28.

McKinsey & Company. *Global Energy Perspective 2023*. 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/global-energy-perspective-2023>. Acesso em: 18 jun. 2024. Citado na página 25.

- MORALES-CERVANTES, A. *et al.* Monitoring steel heating processes using infrared thermography and deep learning-based semantic segmentation. *JOM*, v. 76, n. 1, p. 114–119, 2024. Citado na página 39.
- MORETÓN, R.; LORENZO, E.; NARVARTE, L. Experimental observations on hot-spots and derived acceptance/rejection criteria. *Solar Energy*, v. 118, p. 28–40, 2015. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15002327>>. Citado na página 89.
- MUNIZ, P. R.; MENDES, M. A. *Termografia Infravermelha Aplicada à Manutenção Elétrica: dos fundamentos ao diagnóstico*. Vitória: Edifes, 2019. 134 p. ISBN 978-85-8263-416-5. Citado na página 48.
- MUSTAFA, R. J.; GOMAA, M. R.; AL-DHAIFALLAH, M.; REZK, H. Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems. *Sustainability*, v. 12, n. 608, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/2/608>. Acesso em: 21 jun. 2024. Citado na página 33.
- MUTTILLO, M.; NARDI, I.; STORNELLI, V.; RUBEIS, T. de; PASQUALONI, G.; AMBROSINI, D. On field infrared thermography sensing for pv system efficiency assessment: Results and comparison with electrical models. *Sensors*, v. 20, n. 1055, 2020. Citado na página 45.
- NOBRE, T. L.; CAPERUTO, E. C. A termografia infravermelha como aliada na prevenção e diagnóstico de lesões musculoesqueléticas no esporte: Uma revisão narrativa. *REVISTA ELETRÔNICA LEOPOLDIANUM*, v. 50, n. 140, 2024. Citado na página 39.
- OLIVEIRA, A. V. D. *et al.* Termografia infravermelha como técnica para detecção de mastite bovina subclínica. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 74, p. 992–998, 2023. Citado na página 39.
- OLORUNFEMI, B. O.; OGBOULAMNI, O. A.; NWULU, N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: A systematic review on smart systems. *Sustainability*, v. 14, n. 17, p. 10720, 2022. Citado na página 34.
- PABISIAK, T.; KIEJNA, A. Fe adsorption on hematite (-fe₂o₃)(0001) and magnetite (fe₃o₄)(111) surfaces. *The Journal of Chemical Physics*, v. 141, n. 13, 2014. Citado na página 72.
- PAMPLONA, J. B.; CACCIAMALI, M. C. O paradoxo da abundância: recursos naturais e desenvolvimento na América Latina. *Estudos Avançados*, v. 31, n. 89, p. 251–270, jan-abr 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890020>. Citado na página 26.
- PASSER, A.; KREINER, H. Challenges of a healthy built environment: Air pollution in construction industry. *Sustainability*, v. 13, n. 18, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10469>. Citado na página 32.
- PEETERS, J.; RIBBENS, B.; DIRCKX, J. J. J.; STEENACKERS, G. Estimativa e validação experimental da emissividade direcional utilizando termografia infravermelha. *Infrared Physics & Technology*, v. 77, p. 344–350, 2016. Citado na página 42.

- PINHEIRO, H. H. C.; FIDELIS, N. d. S.; BRANCO, D. A. C.; PEREIRA, M. G. Photovoltaic solar systems in multi-headquarter institutions: A technical implementation in northeastern Brazil. *Energies*, v. 13, n. 11, p. 1–15, maio 2020. Citado na página 31.
- RAHAMAN, S. A.; URMEE, T.; PARLEVLIET, D. A. Investigate the impact of environmental and operating conditions of infrared (ir) imaging on infrared thermography of pv modules to identify defects. *Solar Energy*, v. 245, p. 231–253, October 2022. Citado na página 89.
- RAJPUT, S. K. *Solar Energy - Fundamentals, Economic and Energy Analysis*. [S.l.]: Northern India Textile Research Association, 2017. ISBN 978-93-81125-23-6. Citado na página 28.
- RAMÍREZ, I. S.; DAS, B.; MÁRQUEZ, F. P. G. Fault detection and diagnosis in photovoltaic panels by radiometric sensors embedded in unmanned aerial vehicles. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 29, n. 12, p. 1124–1143, 2021. Acesso em: 9 ago. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 48.
- RASHID, M.; YOUSIF, M.; RASHID, Z.; MUHAMMAD, A.; ALTAF, M.; MUSTAFA, A. Effect of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules for different climate regions. *Heliyon*, v. 9, p. e23069, 2023. Disponível em: <https://www.heliyon.com/article/e23069>. Acesso em: 15 jun. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 38.
- REIS, C. M. *Diversificação da Matriz Energética Brasileira – Caminho para a Segurança Energética em Bases Sustentáveis*. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Relações Internacionais, 2015. Citado na página 25.
- REZENDE, V. G. S. d.; ZILLES, R. Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Gramado: [s.n.], 2018. 17 a 20 de abril de 2018. Citado na página 46.
- RITCHIE, H.; ROSADO, P. *Electricity Mix*. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>. Acesso em: 10 jun. 2024. Citado na página 23.
- ROCHA, H. S. C. *Metodologia de Registro de Imagens Termográficas para Equipamentos Elétricos*. 98 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Citado na página 42.
- RONÇANI, M. D.; ZANCHETTA, L. P.; RAMPINELLI, G. A. Avaliação da influência do ângulo azimutal e da inclinação do módulo fotovoltaico na geração de energia elétrica. In: *V Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Recife: [s.n.], 2014. 31 a 03 de abril de 2014. Citado na página 31.
- SALAMAH, T. *et al.* Effect of dust and methods of cleaning on the performance of solar pv module for different climate regions: Comprehensive review. *Science of The Total Environment*, v. 827, p. 154050, 2022. Citado na página 38.
- SANTOS, L. *Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas*. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia da

Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

SCHMITZ, C. R.; OLIVEIRA, J. C.; HENNING, L. F. Development of a test bench for parts for use in automatic packaging machines. In: *ANAIS SEPETEC 2022*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 14. Citado na página 39.

SHAO, H. *et al.* Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 191, p. 114094, 2024. Citado na página 24.

SILVA, B. P. A. d. *Metodologia para a determinação de temperatura em painéis fotovoltaicos por meio de termografia quantitativa*. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Citado na página 51.

SILVA, E. A. d. *Proposta de um modelo global não-linear para caracterização do comportamento elétrico de células fotovoltaicas*. Tese (Tese (Doutorado)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Citado na página 28.

SILVA, L. M. T.; ABREU, M. C. S.; MALDONADO, M. U.; COLLAÇO, F. M. A.; BORGES, C. P. Identificação de impactos socioecológicos relacionados ao abastecimento hídrico de um centro de produção de hidrogênio verde. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC) E UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). *XXVI Seminários em Administração (SemeAd 2023)*. [S.l.], 2023. Citado na página 24.

SILVA, S. S. F. d.; ALVES, A. C.; RAMALHO, M. C. Energia eólica e complementaridade energética: estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na região nordeste do Brasil. *Qualitas Revista Eletrônica*, v. 19, n. 3, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18391/req.v19i3.5640>. Citado na página 26.

SOUZA, M. P. V. de; LÓPEZ, F.; MALDAGUE, X. Corrosion under insulation mitigation by passive multivariate thermography. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 2024. Citado na página 39.

SPECHT, A.; FRIEDRICH, B. Challenges and opportunities of thermography in metallurgy. In: *Conference of Metallurgists*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 285–295. Citado na página 39.

STREJOIU, A.; LAZAROIO, G. C. Exploring optimal charging strategies for off-grid solar photovoltaic systems: A comparative study on battery storage techniques. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2023. Citado na página 28.

TEIXEIRA, G. *Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos*. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Citado na página 43.

TEJEDOR, B.; LUCCHI, E.; NARDI, I. Application of qualitative and quantitative infrared thermography at urban level: Potential and limitations. In: BIENVENIDO-HUERTAS, D.; MOYANO-CAMPOS, J. (Ed.). *New Technologies in Building and Construction*. [S.l.]: Springer, 2022, (Lecture Notes in Civil Engineering, v. 258). p. 9. Citado na página 51.

- TSAI, D. *et al.* *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil*. 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 10 jun. 2024. Citado na página 25.
- USAMENTIAGA, R.; VENEGAS, P.; GUEREDIAGA, J.; VEGA, L.; LÓPEZ, I.; SALVADOR, R. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, v. 14, n. 7, p. 12305–12348, 2014. Citado na página 39.
- VITORINO, C. F. *et al.* Utilização da algometria e termografia infravermelha como instrumentos de avaliação da dor: uma revisão sistemática. *Acta fisiátrica*, v. 30, n. 2, p. 129–135, 2023. Citado na página 39.
- YEE, T. S.; SHRIFAN, N. H. M. M.; AL-GBURI, A. J. A.; ISA, N. A. M.; AKBAR, M. F. Prospect of using machine learning-based microwave nondestructive testing technique for corrosion under insulation: A review. *IEEE Access*, agosto 2022. Citado na página 41.
- ZAHEDI, A. Maximizing solar pv energy penetration using energy storage technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 866–870, 2011. Citado na página 27.
- ZHOU, G.; HUANG, L.; LI, W.; ZHU, Z. Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: A survey. *Journal of Sensors*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, p. Article ID 815467, 20 pages, 2014. Citado na página 29.

Apêndices

APÊNDICE A – Lista de equipamentos

A.1 Calibrador infravermelho de precisão FLUKE 4181

Figura A.1 – Calibrador infravermelho de precisão FLUKE 4181.



Modelo: FLUKE 4181

Faixa de temperatura: 35 °C a 500 °C

Precisão: $\pm 0,35$ °C (a 35°C)

Estabilidade: $\pm 0,05$ °C (a 35°C)

Tempo de estabilização: 10 minutos

Emissividade nominal: 0,95

Dimensões: 356 mm x 241 mm x 216 mm

Peso: 9,5 kg

(Fonte: Manual FLUKE)

A.2 Câmera termográfica FLIR SC 660

Figura A.2 – Câmera termográfica FLIR SC 660.



Modelo: FLIR SC 660

Resolução: 640 x 480 pixels

Sensibilidade térmica: 30 mK (a 30°C)

Faixa espectral: 7,5 a 13,0 μm

Intervalo de medição: -40 °C a 1500 °C

Intervalo de operação: -15 °C a 50 °C

Precisão: $\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$ da leitura

Dimensões: 299 mm x 144 mm x 147 mm

Peso: 1,8 kg

(Fonte: Manual FLIR)

A.3 Espectrômetro ARL QUANT'X EDXRF

Figura A.3 – Espectrômetro ARL QUANT'X EDXRF.



Modelo: ARL QUANT'X EDXRF

Precisão: Sensibilidade excepcional para análise de traços.

Resolução típica: 140 eV FWHM no Mn $K\alpha$. Alta contagem de estatísticas em curtos tempos de medição para resultados mais precisos.

Dimensões: Design compacto de bancada. Câmara de amostra grande com estágio de posição única e opcional de extensão para amostras de até 36 cm de altura.

Peso: Aproximadamente 70 kg (varia conforme configuração e acessórios).

Características Adicionais: Equipado com detector de deriva de silício (SDD) de última geração, opcionalmente com detector SDD500G. Tecnologia de Processamento Digital de Pulso (DPP) avançada. Análise multi-elementar de alto desempenho. Software Thermo Scientific™ UniQuant™ para análise sem padrão. Possibilidade de análise em ar, vácuo e hélio. Câmera CCD para visualização de amostras. Changer de amostras automático para até 20 posições. Suporte para análise de líquidos com atmosfera de hélio.

(Fonte: Manual THERMO FISHER)

A.4 Termohigrômetro TESTO 622

Figura A.4 – Termohigrômetro TESTO 622.



Modelo: TESTO 622

Temperatura: $\pm 0,4$ °C

Umidade: ± 2 %RH + 1 dígito a 25 °C (10 a 90 %RH), ± 3 %RH no restante da faixa

Pressão Absoluta: ± 3 hPa

Dimensões: 185 mm x 105 mm x 36 mm

Peso: Aproximadamente 240 g

Faixa de Medição de Temperatura: -10 a +60 °C

Faixa de Medição de Umidade: 0 a 100 %RH

Faixa de Medição de Pressão Absoluta: 300 a 1200 hPa

Resolução: 0,1 °C para temperatura, 0,1 %RH para umidade, e 0,1 hPa para pressão

Taxa de Medição: Uma vez a cada dez segundos

Vida útil da bateria: Até 12 meses, utilizando 4 pilhas AA

Montagem: Pode ser montado na parede ou utilizado em uma mesa

Alarmes: Alerta visual de LED quando os limites de medição são excedidos

Display: Grande e de fácil leitura, exibindo também a hora e a data

(Fonte: Manual TESTO)

A.5 Unidade de aquisição de dados Agilent 34970A

Figura A.5 – Unidade de aquisição de dados Agilent 34970A.



Modelo: Agilent 34970A

DC Voltagem: 0,004% da leitura + 0,003% da faixa

Resistência: 0,004% da leitura + 0,003% da faixa

Temperatura: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ para termopares tipo K

Dimensões: 212 mm x 88 mm x 348 mm

Peso: Aproximadamente 4 kg

Características adicionais:

Faixa de Medição de Tensão DC: 100 mV a 300 V

Faixa de Medição de Corrente DC: 1 a 1A

Faixa de Medição de Resistência: 100 Ω a 100M Ω

Entrada de Temperatura: Suporte para termopares, RTDs, e termistores

Capacidade de Canal: Até 60 canais de entrada para medições de temperatura, tensão, corrente, e resistência

Comunicação: Interfaces GPIB e RS-232 para fácil integração com outros sistemas e software

(Fonte: Manual Agilent)

A.6 Varivolt RS PRO 1 Phase 3.6kVA Variac

Figura A.6 – Varivolt RS PRO 1 Phase 3.6kVA.



Modelo: RS PRO 1 Phase 3.6kVA Variac

Precisão: Saída de corrente alternada contínua variável sem distorção de forma de onda, com proteção contra sobrecarga

Dimensões: 225 mm x 225 mm x 190 mm

Peso: 14 kg

Características adicionais: Montagem de superfície. Rotação do botão no sentido horário. **Tensão primária:** 240 V **Tensão secundária:** 0-240 V, 0-270 V **Capacidade de potência:** 3,6 kVA **Corrente primária:** 15 A **Frequência operacional:** 50-60 Hz (Fonte: Manual RS PRO)

A.7 Módulo Fotovoltaico SinoSola SA10-36P

Figura A.7 – Módulo Fotovoltaico SinoSola SA10-36P.



Modelo: Módulo Fotovoltaico SinoSola SA10-36P

Dados elétricos - Potência Máxima (P_m): 10W

Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}): 22,5V - *Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}):* 0,6A

Tensão de Potência Máxima (V_{mp}): 19,0V - *Corrente de Potência Máxima (I_{mp}):* 0,5A

Tolerância de Potência: 0 +3%

Dimensões: 350 mm × 252 mm × 25 mm

Características adicionais: Todos os dados técnicos em condições de teste padrão ($E=1000W/m^2$, $T_c=25^\circ C$, AM 1.5)

Tensão Máxima do Sistema: DC 715V - *Classe de Aplicação do Módulo:* A

Temperatura Nominal de Operação da Célula: $45\pm 2^\circ C$

Temperatura de Operação: $-40^\circ C$ a $+85^\circ C$

(Fonte: Manual SinoSola)

APÊNDICE B – Propriedades ópticas do módulo fotovoltaico

Tabela B.1 – Valores de emissividade para o módulo limpo.

Emissividade (ε)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	0.873	0.887	0.899	0.894	0.895	0.889	0.884	0.880
10°	0.877	0.885	0.898	0.898	0.891	0.888	0.879	0.874
20°	0.873	0.884	0.895	0.886	0.899	0.881	0.882	0.880
30°	0.879	0.887	0.894	0.891	0.893	0.882	0.884	0.873
40°	0.866	0.881	0.893	0.876	0.882	0.882	0.865	0.860
50°	0.843	0.855	0.880	0.868	0.861	0.857	0.844	0.850
60°	0.842	0.828	0.862	0.851	0.831	0.836	0.815	0.812
70°	0.789	0.768	0.797	0.772	0.752	0.773	0.727	0.726

Tabela B.2 – Incertezas dos valores de emissividade para o módulo limpo.

Incertezas de emissividade (u_ε)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	±0.055	±0.053	±0.053	±0.052	±0.052	±0.053	±0.053	±0.054
10°	±0.055	±0.053	±0.053	±0.052	±0.052	±0.053	±0.053	±0.054
20°	±0.055	±0.053	±0.053	±0.052	±0.052	±0.053	±0.053	±0.054
30°	±0.055	±0.053	±0.053	±0.052	±0.052	±0.053	±0.053	±0.053
40°	±0.056	±0.054	±0.053	±0.052	±0.052	±0.053	±0.052	±0.053
50°	±0.056	±0.054	±0.052	±0.052	±0.051	±0.052	±0.051	±0.052
60°	±0.056	±0.054	±0.052	±0.051	±0.050	±0.050	±0.049	±0.050
70°	±0.057	±0.055	±0.052	±0.050	±0.048	±0.048	±0.045	±0.045

Tabela B.3 – Valores de refletividade para o módulo limpo.

Refletividade (ρ)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	0.112	0.108	0.106	0.104	0.106	0.105	0.108	0.108
10°	0.110	0.108	0.106	0.100	0.110	0.105	0.112	0.109
20°	0.112	0.108	0.107	0.108	0.107	0.111	0.108	0.107
30°	0.112	0.105	0.107	0.111	0.109	0.112	0.109	0.109
40°	0.123	0.116	0.109	0.123	0.117	0.118	0.123	0.120
50°	0.141	0.137	0.122	0.126	0.137	0.138	0.137	0.128
60°	0.139	0.157	0.142	0.141	0.162	0.152	0.158	0.159
70°	0.189	0.218	0.204	0.209	0.222	0.205	0.228	0.227

Tabela B.4 – Incertezas dos valores de refletividade para o módulo limpo.

Incertezas de refletividade (u_ρ)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038	±0.039
10°	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038	±0.039
20°	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038	±0.039
30°	±0.032	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038	±0.039
40°	±0.032	±0.033	±0.034	±0.036	±0.036	±0.037	±0.039	±0.040
50°	±0.033	±0.034	±0.034	±0.036	±0.037	±0.038	±0.039	±0.040
60°	±0.033	±0.035	±0.035	±0.036	±0.038	±0.039	±0.040	±0.041
70°	±0.036	±0.039	±0.039	±0.040	±0.041	±0.041	±0.043	±0.044

Tabela B.5 – Valores de emissividade para o módulo com sujidade urbana.

Emissividade (ε)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	0.922	0.933	0.944	0.937	0.955	0.951	0.942	0.950
10°	0.929	0.931	0.944	0.937	0.947	0.946	0.938	0.938
20°	0.924	0.934	0.945	0.939	0.954	0.939	0.938	0.938
30°	0.930	0.939	0.953	0.936	0.944	0.945	0.934	0.930
40°	0.938	0.921	0.943	0.939	0.935	0.936	0.923	0.923
50°	0.930	0.920	0.939	0.930	0.926	0.927	0.909	0.907
60°	0.915	0.911	0.917	0.912	0.914	0.901	0.888	0.885
70°	0.864	0.883	0.895	0.892	0.886	0.875	0.851	0.855

Tabela B.6 – Incertezas dos valores de emissividade para o módulo com sujidade urbana.

Incertezas de emissividade(u_ε)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	±0.055	±0.053	±0.053	±0.053	±0.054	±0.056	±0.056	±0.058
10°	±0.055	±0.053	±0.053	±0.053	±0.054	±0.056	±0.056	±0.057
20°	±0.055	±0.053	±0.054	±0.053	±0.054	±0.055	±0.056	±0.057
30°	±0.055	±0.053	±0.054	±0.053	±0.053	±0.055	±0.056	±0.057
40°	±0.055	±0.053	±0.054	±0.053	±0.053	±0.055	±0.055	±0.056
50°	±0.055	±0.053	±0.054	±0.053	±0.052	±0.054	±0.054	±0.055
60°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.053	±0.052	±0.053	±0.053	±0.053
70°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.052	±0.051	±0.051	±0.051	±0.051

Tabela B.7 – Valores de refletividade para o módulo com sujidade urbana.

Refletividade(ρ)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	0.069	0.062	0.062	0.066	0.058	0.055	0.054	0.052
10°	0.065	0.061	0.065	0.070	0.062	0.059	0.063	0.061
20°	0.071	0.060	0.065	0.071	0.062	0.065	0.066	0.067
30°	0.067	0.049	0.063	0.072	0.068	0.061	0.074	0.078
40°	0.068	0.069	0.071	0.075	0.074	0.065	0.082	0.076
50°	0.072	0.072	0.074	0.078	0.082	0.073	0.093	0.089
60°	0.083	0.076	0.093	0.095	0.092	0.090	0.107	0.102
70°	0.111	0.103	0.107	0.111	0.107	0.108	0.131	0.117

Tabela B.8 – Incertezas dos valores de refletividade para o módulo com sujidade urbana.

Incertezas de refletividade (u_ρ)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	±0.030	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038
10°	±0.030	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038
20°	±0.030	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038
30°	±0.030	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.038	±0.039
40°	±0.030	±0.031	±0.033	±0.034	±0.035	±0.036	±0.038	±0.039
50°	±0.030	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.038	±0.039
60°	±0.030	±0.031	±0.033	±0.034	±0.036	±0.036	±0.038	±0.039
70°	±0.031	±0.032	±0.034	±0.035	±0.036	±0.037	±0.038	±0.039

Tabela B.9 – Valores de emissividade para o módulo com sujidade minerária.

Emissividade (ε)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	0.892	0.887	0.896	0.894	0.903	0.875	0.896	0.899
10°	0.876	0.888	0.887	0.886	0.907	0.876	0.903	0.905
20°	0.888	0.891	0.898	0.894	0.903	0.871	0.882	0.894
30°	0.900	0.895	0.898	0.902	0.915	0.883	0.890	0.889
40°	0.892	0.886	0.899	0.890	0.890	0.879	0.893	0.901
50°	0.884	0.885	0.888	0.884	0.891	0.883	0.880	0.880
60°	0.868	0.866	0.875	0.861	0.873	0.864	0.852	0.857
70°	0.861	0.859	0.856	0.845	0.844	0.824	0.813	0.816

Tabela B.10 – Incertezas dos valores de emissividade para o módulo com sujidade minerária.

Incertezas de emissividade (u_ε)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.051	±0.052	±0.052	±0.054	±0.056
10°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.051	±0.052	±0.052	±0.054	±0.056
20°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.051	±0.052	±0.052	±0.054	±0.055
30°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.051	±0.052	±0.053	±0.054	±0.055
40°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.051	±0.052	±0.053	±0.054	±0.055
50°	±0.055	±0.053	±0.052	±0.051	±0.051	±0.053	±0.053	±0.054
60°	±0.056	±0.053	±0.052	±0.050	±0.051	±0.052	±0.052	±0.053
70°	±0.056	±0.053	±0.051	±0.050	±0.050	±0.040	±0.049	±0.050

Tabela B.11 – Valores de refletividade para o módulo com sujidade minerária.

Refletividade (ρ)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	0.094	0.094	0.093	0.092	0.092	0.104	0.094	0.088
10°	0.101	0.095	0.100	0.095	0.090	0.105	0.091	0.088
20°	0.092	0.093	0.096	0.090	0.091	0.114	0.105	0.094
30°	0.090	0.090	0.095	0.087	0.087	0.107	0.100	0.104
40°	0.096	0.097	0.097	0.095	0.101	0.108	0.099	0.093
50°	0.102	0.099	0.105	0.097	0.102	0.107	0.105	0.113
60°	0.117	0.114	0.113	0.112	0.111	0.115	0.127	0.122
70°	0.122	0.120	0.128	0.118	0.128	0.135	0.139	0.137

Tabela B.12 – Incertezas dos valores de refletividade para o módulo com sujidade mineral.

Incertezas de refletividade (u_ρ)								
θ	25 [°C]	30 [°C]	35 [°C]	40 [°C]	45 [°C]	50 [°C]	55 [°C]	60 [°C]
0°	± 0.031	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.035	± 0.037	± 0.038	± 0.039
10°	± 0.031	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.035	± 0.037	± 0.038	± 0.039
20°	± 0.031	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.035	± 0.037	± 0.038	± 0.039
30°	± 0.031	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.035	± 0.037	± 0.038	± 0.039
40°	± 0.031	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.036	± 0.037	± 0.038	± 0.039
50°	± 0.031	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.036	± 0.037	± 0.038	± 0.039
60°	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.034	± 0.036	± 0.037	± 0.038	± 0.039
70°	± 0.032	± 0.033	± 0.034	± 0.034	± 0.036	± 0.038	± 0.038	± 0.039