

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

Pedro Victor Valadares Romanholo

**Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da
EMC/UFG**

Goiânia

2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Pedro Victor Valadares Romanholo

Título do trabalho: Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da EMC/UFG

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento **SIM** **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 2 / 4 / 19

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

Pedro Victor Valadares Romanholo

**Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da
EMC/UFG**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de Concentração: Sistemas Eletro-Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga

Goiânia

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Valadares Romanholo, Pedro Victor

Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da EMC/UFG [manuscrito] / Pedro Victor Valadares Romanholo. - 2019.

viii, 112 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2019.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

Inclui fotografias, abreviaturas, gráfico, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Módulos Fotovoltaicos. 2. Produção de Energia. 3. Produtividade Fotovoltaica. 4. Rendimento Global. 5. Sujidade. I. Pinheiro de Alvarenga, Bernardo , orient. II. Título.

CDU 621.3



Ata de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do candidato **Pedro Victor Valadares Romanholo**, realizada em 18 de fevereiro de 2019.

Aos dezoito dias do mês de fevereiro de dois mil e dezenove, às 14:00 horas, nas dependências da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: Os Doutores Bernardo Pinheiro de Alvarenga – Orientador (EMC/UFG), Tatiana Duque Martins (IQ/UFG), Rodrigo Pinto Lemos (EMC/UFG) e Enes Gonçalves Marra (EMC/UFG), para julgar a Dissertação de Mestrado de **Pedro Victor Valadares Romanholo**, intitulada “**Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da EMC/UFG**”, apresentada pelo Candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Bernardo Pinheiro de Alvarenga, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Tatiana Duque Martins, Rodrigo Pinto Lemos e Enes Gonçalves Marra. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **aprovado** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação de Dissertação de Mestrado, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 30 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 18 de fevereiro de 2019.

Comissão Examinadora Designada:

Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga – Orientador (EMC/UFG) (Avaliação: Aprovado)

Prof.^a. Dr.^a. Tatiana Duque Martins (IQ/UFG) (Avaliação: APROVADO)

Prof. Dr. Rodrigo Pinto Lemos (EMC/UFG) (Avaliação: APROVADO)

Prof. Dr. Enes Gonçalves Marra (EMC/UFG) (Avaliação: APROVADO)

Candidato:

Pedro Victor Valadares Romanholo
Pedro Victor Valadares Romanholo

À minha mãe Fátima, à minha tia Sônia e ao meu tio Paulo (*in memoriam*),
que me trouxeram aos olhos e ao coração os significados mais preciosos da
vida e dos estudos.

Agradecimentos

Ao Eterno, à minha mãe, à minha tia Sônia e ao Victor, por serem o sustentáculo maior;

Aos professores e orientadores Bernardo e Sérgio da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, pela oportunidade, direcionamento e esclarecimento;

À minha companheira de mestrado, Jéssica, por me ajudar nos momentos de dificuldade e por enriquecer minha pesquisa com suas colaborações;

Ao CRTI-UFG, pelos diálogos e análises sempre meticolosas;

Às empresas Espora Energética S/A, Transenergia Renovável S/A (TER), Transenergia São Paulo S/A (TSP) e Caldas Novas Transmissão (CNT), pelo financiamento do projeto P&D ANEEL n^o PD-3033-002/2014, a partir do qual este trabalho foi realizado;

Ao CNPq pelo apoio financeiro;

Ao amigos do Grupo de Física de Materiais da UFG, Hermínia, Raphael, Rosane, Stefane e Thiago, os quais me proporcionaram importantes momentos de descontração, diversão e valiosos intercâmbios de idéias para este trabalho;

Aos professores do Instituto de Física, Adolfo e Jesiel, pelas valiosas oportunidades acadêmicas oferecidas;

Aos professores do Instituto de Química, Anna, Aparecido, Livia, Nyuara e Márton, por despertarem em mim a cada dia mais o amor pelo labor científico;

Aos amigos do Laboratório de Ensino de Química e Atividades Lúdicas, Brenda, Jordana, Thiago e Yasmine, pelas divertidas e produtivas atividades e discussões sobre os estágios de licenciatura;

Por último, o maior dos agradecimentos. Ao professor e orientador Enes, também da Escola de Engenharia Elétrica, pela inenarrável ajuda e oportunidade de realizar este mestrado. Por, desde o primeiro dia, me acolher como um profissional, e não meramente um “recém-formado”. Por todos os diálogos e pela grande aprendizagem das sutis curvas da engenharia. Por toda a paciência que demonstrou ao longo destes dois anos divididos entre a engenharia e a química. Definitivamente, sem sua atenciosa e infalível participação este trabalho não teria chegado até aqui.

À todos que participaram de alguma forma desta conquista.

Muito Obrigado!!!

"O processo natural não leva, em absoluto, a reunir indivíduos em torno de um tipo ideal; ele parece ter uma estratégia muito diferente: preservar a diversidade."

Albert Jacquard

Salvo onde ocorrer citação, todo o material aqui disponibilizado foi produzido pelo autor.

RESUMO

Neste trabalho, investigou-se o sistema fotovoltaico (SFV) instalado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás. O estudo desenvolvido foi composto por duas abordagens, dirigindo-se primeiramente à caracterização físico-química da sujidade coletada da superfície dos módulos e, subsequentemente, atendendo ao estudo dos impactos na geração do SFV causados pelo encobrimento da superfície pelo material analisado. A caracterização físico-química da sujidade foi realizada por meio de medidas de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva, Difração de Raios-X, Termogravimetria com Análise Térmica Diferencial, Espectroscopia de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado e Espectrometria na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier; além da caracterização físico-química, foram realizadas Análises Microbiológicas. Os resultados conjuntos destas análises foram interpretados à luz da literatura, permitindo identificar uma matriz rica em minerais e matéria orgânica para a composição da sujidade. Para avaliar os impactos na operação do SFV causados pela deposição deste elemento, amostras de vidro foram fixadas na superfície dos módulos, onde, durante um ano, foram realizadas, em laboratório, medidas mensais de Espectroscopia na Região do Ultravioleta-Visível para se averiguar as perdas na transmitância da superfície. Conjuntamente, dados de precipitação atmosférica e direção dos ventos foram interpretados paralelamente à análise mensal das lâminas. Os resultados obtidos apontam uma dependência substancial entre estes dois parâmetros e o acúmulo da sujidade na superfície analisada. Por último, quatro arranjos contendo 20 módulos cada, foram limpos mensalmente e comparados a outros dois conjuntos análogos que não foram submetidos à limpeza. O período de análise foi de 5 meses. A geração de energia e o rendimento global foram comparados para o par de módulos limpo-sujo associadamente com dados de precipitação atmosférica. Os resultados obtidos mostram que a limpeza da superfície dos módulos aumenta a geração e melhora o rendimento global, especialmente para este último, onde foi observada uma elevação do parâmetro tão alta quanto 34% após limpeza.

Palavras-chave: Módulos Fotovoltaicos; Produção de Energia; Produtividade Fotovoltaica; Rendimento Global; Sujidade.

ABSTRACT

The 34 kWp photovoltaic system located at the Electrical, Mechanical and Computing Engineering School of The Federal University of Goiás was investigated. The performed study was comprised of two approaches, targeting first the physical-chemical characterization of collected dirt from modules' surface and, subsequently, addressing the impacts on energy generation caused by dirt covered devices. Physical-chemical characterization of dirt was carried out by means of Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy, X-Ray Diffraction, Differential Thermal Analysis and Thermogravimetry, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, Fourier Transform Infrared Spectrophotometry; along with physical-chemical characterization, Microbiological Analysis was performed. Assembled analytical results were interpreted in light of literature, allowing to identify a mineral-organic rich dirt matrix. To evaluate dust covering impact on PV operation, glass samples were placed on top of modules, where year-long Ultraviolet-Visible Spectroscopy measurements were taken to access sample's surface transmittance monthly loss. In addition, rainfall and wind direction data was interpreted along with dirt accumulation on top of glass samples. Results point out a substantial rainfall-wind direction dirt settlement dependence. In addition, four arrays of twenty modules each were monthly cleaned and compared to other two uncleaned analogous sets for the interval of 5 months. Energy Yield and Production Ratio were compared between clean-unclean pair of devices along with rainfall data. Results showed that surface cleaning does increase energy yield and production ratio, especially for the latter, which increased as much as 34%.

Keywords: Energy Yield; Photovoltaic Module; Photovoltaic Specific Yield; Production Ratio; Soiling.

Sumário

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	1
1.2 Objetivos Específicos	1
1.3 Justificativa	1
1.3.1 Fatores Ambientais	1
1.3.2 Energia Solar Fotovoltaica no Mundo	2
1.3.3 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	6
1.4 Metodologia	12
1.5 Estrutura da Dissertação	13
CAPÍTULO 2: SUJIDADE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: HISTÓRICO, ESTADO DA ARTE, DESAFIOS E PERSPECTIVAS.	14
2.1 Estudos Pioneiros	14
2.2 Desenvolvimento e Fases dos Estudos	18
2.3 Estudos Contemporâneos	19
2.4 Estado da Arte e Desafios	22
2.5 Considerações finais	25
CAPÍTULO 3: APRESENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DA EMC/UFG	27
3.1 Goiânia	27
3.2 O Sistema Fotovoltaico da EMC/UFG	28
3.3 Considerações Finais	30
CAPÍTULO 4: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DA SUJIDADE	31
4.1 Análises preliminares	31
4.2 Caracterização físico-química da sujidade	35
4.2.1 Caracterização via DRX	36
4.2.2 Caracterização via ICP-OES	38
4.2.3 Caracterização via DTA-TG	39
4.2.4 Caracterização via FTIR	40
4.3 Caracterização microbiológica	41
4.4 Considerações finais	42
CAPÍTULO 5: IMPACTOS DA SUJIDADE NO SFV DA EMC/UFG	43
5.1 Efeitos da sujidade na transmitância da radiação solar	43
5.1.1 Impactos da precipitação atmosférica no acúmulo da sujidade	45
5.1.2 Impactos da direção do vento no acúmulo da sujidade	48
5.2 Efeitos da sujidade na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos	50
5.3.1 Método de limpeza	51
5.3.2 Análise da geração do SFV frente à limpeza dos módulos	52
5.3.3 Análise do desempenho global do SFV frente à limpeza dos módulos	54
5.4 Sugestões de limpeza	60
5.5 Considerações finais	61
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	62
PUBLICAÇÕES REALIZADAS	64
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A - Planta Fotovoltaica	70

APÊNDICE B - Diagrama de Conexões dos Inversores	73
APÊNDICE C - MEV, Espectros EDS e UV-VIS das Lâminas	75
APÊNDICE D - Rosas dos Ventos	87
APÊNDICE E - Cálculo do Rendimento Global	90
ANEXO A - <i>Datasheet</i> dos Módulos Fotovoltaicos	96
ANEXO B - <i>Datasheet</i> dos Inversores	99
ANEXO C - Laudos Técnicos	102
ANEXO D - Carta Solar para o SFV da EMC/UFG	111

Lista de Figuras

1	Fluxo de energia para os EUA no ano de 2017 [1].	3
2	Emissões estimadas de dióxido de carbono pelos EUA no ano de 2014 [2].	4
3	Emissão de dióxido de carbono por país [3].	5
4	Evolução da capacidade instalada para diversas fontes renováveis de energia [8].	6
5	Evolução tecnológica dos materiais utilizados na conversão fotovoltaica [10]	7
6	Evolução dos preços para a instalação de sistemas fotovoltaicos [12].	8
7	Ranking nacional de geração distribuída para o mês de setembro de 2018[23].	10
8	Histórico da potência oriunda de geração distribuída instalada no estado de Goiás [23].	11
9	Previsão anual do aumento da potência de microgeração residencial e comercial instalada [24].	11
10	Projeção de unidades consumidoras a adotarem a modalidade de microgeração distribuída [24].	12
11	Irradiação global no plano horizontal em escala mundial [29].	16
12	Correção da transmitância da radiação solar normal à superfície de uma lâmina (a) de vidro (b) de plástico [30].	17
13	Desempenho de módulos fotovoltaicos instalados em (a) Oman (b) Egito (c) EUA.[31]	17
14	Redução da intensidade solar captada por células fotovoltaicas em função da densidade de sujidade acumulada por tipo de sujidade [38].	20
15	Transmitância da radiação em função da densidade de sujidade acumulada em lâminas de vidro [42].	22
16	Arranjo fotovoltaico utilizado para o estudo no Cairo [31].	23
17	Perdas na potência de saída dos arranjos fotovoltaicos ao longo do tempo [31].	23
18	Ocorrência de publicações sobre sujidade em sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo [44].	24
19	Distribuição dos estudos publicados em 2016 acerca dos efeitos da sujidade em sistemas fotovoltaicos [45].	25
20	Temperatura e precipitação mensal para a cidade de Goiânia [54].	27
21	(a): Velocidade média anual dos ventos a 50 metros do solo [57]. (b): Potencial de Geração Solar Fotovoltaica no Brasil [58]	28
22	Estação meteorológica da EMC/UFG.	29
23	Poluição da superfície dos módulos do SFV da EMC/UFG.	32
24	Características dominantes das amostras coletadas.	32
25	(a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 1, respectivamente.	33
26	(a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 2, respectivamente.	33
27	(a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 3, respectivamente.	34
28	(a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 4, respectivamente.	34
29	(a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 5, respectivamente.	35
30	Difratograma da amostra de sujidade.	36
31	Difratograma da amostra de sujidade com refinamento de Rietveld.	37
32	Termograma da amostra de sujidade.	40
33	Espectro de FTIR.	41
34	Arranjo utilizado na coleta mensal da sujidade.	43
35	Espectros de transmissão UV-VIS das lâminas.	44
36	Precipitação acumulada. (a) Ano de 2017. (b) Ano de 2018.	45
37	Efeito das chuvas na transmitância das lâminas instaladas na direção sul. (a) e (b) Espectro UV-VIS e micrografia da sujidade da lâmina retirada em setembro de 2017, respectivamente. (c) e (d) Espectro UV-VIS e micrografia da sujidade da lâmina retirada em outubro de 2017, respectivamente.	46
38	Impacto da presença de microorganismos na superfície da lâmina. (a) Amostra de março de 2018. (b) Amostra de abril de 2018.	47
39	Efeito da direção dos ventos no acúmulo de sujidade na superfície das lâminas. (a) Espectro UV-VIS da amostra retirada em junho de 2018. (b) Rosa dos ventos para o mês de maio de 2018. (c) Espectro UV-VIS da amostra retirada em agosto de 2018. (d) Rosa dos ventos para o mês de julho de 2018. (e) Fotografia do SFV da EMC/UFG, destacando a presença de árvores próximas ao lado sul do telhado.	49
40	Impacto da sujidade na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos.	50
41	Comparativo entre a temperatura dos módulos limpos (esquerda) e dos módulos sujos (direita).	50
42	Contraste entre módulos limpos e módulos sujos durante a limpeza. (a) Primeira limpeza realizada. (b) Limpeza dos módulos selecionados, apenas.	52
43	Geração de energia elétrica mensal por inversor. (a) e (b) Inversores 1-6 para o ano de 2017.(c) e (d) Inversores 1-6 para o ano de 2018.	53

44	Impactos da limpeza, irradiação e chuvas no ano de 2018 para os módulos conectados aos inversores 2 e 3 (módulos ao norte).	56
45	Impactos da limpeza, irradiação e chuvas no ano de 2018 para os módulos conectados aos inversores 4 e 5 (módulos ao sul).	56
46	Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 2 entre os anos de 2017 e 2018.	58
47	Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 3 entre os anos de 2017 e 2018.	58
48	Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 4 entre os anos de 2017 e 2018.	59
49	Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 5 entre os anos de 2017 e 2018.	59
50	SFV da EMC/UFG. (a) Módulos instalados no lado leste do telhado. (b) Módulos instalados no lado oeste do telhado.	72
51	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de setembro de 2017 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	76
52	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de outubro de 2017 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	77
53	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de novembro de 2017 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	78
54	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de janeiro de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	79
55	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de fevereiro de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	80
56	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de março de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	81
57	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de abril de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	82
58	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de maio de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	83
59	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de junho de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	84
60	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de julho de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	85
61	Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de agosto de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.	86
62	Rosas dos ventos para os meses de setembro a novembro de 2017 e janeiro a agosto de 2018.	89
63	Irradiações globais horizontal, H_{GH} , e inclinada, $H_{G\beta}$, para o dia 30 de setembro de 2018.	94

Lista de Tabelas

1	Deposição de sujidade em função da inclinação do módulo fotovoltaico e da velocidade e direção dos ventos [39]	20
2	Composição quantitativa da sujidade via método de refinamento de Rietveld.	37
3	Quantificação elementar via técnica de ICP-OES.	39
4	Resultados das análises microbiológicas.	42
5	Aumento percentual da geração para o mês de julho/2018 em comparação ao mesmo mês em 2017.	53
6	Rendimento global mensal do SFV da EMC/UFG. (a) Ano de 2017. (b) Ano de 2018.	55
7	Diferenças percentuais entre os rendimentos globais dos inversores para o ano de 2018 em relação ao ano de 2017.	60
8	Valores para a irradiação global no plano horizontal e no plano inclinado ($\beta = 10^\circ$) calculados para o dia 30 de setembro de 2018.	91

Lista de Abreviaoes

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CRTI	Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovao
DRX	Difrao de Raios-X
DTA-TG	Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EMC	Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computao
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
ICP-OES	Espectrometria de Emissão tica com Plasma Indutivamente Acoplado
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SFV	Sistema Fotovoltaico
UFG	Universidade Federal de Goiás
UV-VIS	Espectroscopia Ultravioleta-Visível-Infravermelho-Próximo

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi realizada com o intuito de se estudar e analisar os efeitos da deposição de sujidade sobre a superfície de módulos fotovoltaicos, no que se refere a sua cobertura e à influência na produção de energia elétrica. O sistema de geração fotovoltaica observado, a partir do qual obteve-se os dados experimentais aqui analisados, foi o Sistema Fotovoltaico (SFV) instalado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) com potência instalada de 34 kW.

1.1 Objetivo Geral

1. Determinar os impactos da sujidade depositada sobre a superfície de módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica a partir de dados obtidos do SFV da EMC/UFG.

1.2 Objetivos Específicos

1. Caracterização físico-química da sujidade presente no SFV da EMC/UFG em termos da composição química, morfologia das partículas e massa acumulada ao longo do tempo sob condições meteorológicas naturais;
2. Determinação dos efeitos causados pela sujidade sobre a transmitância no vidro frontal dos módulos da SFV/UFG;
3. Acompanhamento da energia elétrica produzida sob efeito da variação da sujidade ao longo do tempo;
4. Estabelecimento da relação entre sujidade e as seguintes figuras de mérito, que representam o desempenho do sistema fotovoltaico: produção de energia e rendimento global;
5. Determinar a melhor periodicidade para a realização de limpeza dos módulos fotovoltaicos.

1.3 Justificativa

1.3.1 Fatores Ambientais

O uso de fontes de energia não renováveis e, conseqüentemente, a degradação ambiental e urbana gerada pela emissão de contaminantes e poluentes formam um dos problemas mais desafiadores da atualidade. Trata-se de uma relação dialética, onde o homem busca por seu avanço e desenvolvimento no espaço em que ocupa e, em contrapartida, os recursos disponibilizados por este mesmo espaço se mostram finitos e, muitas vezes, geradores de efeitos nocivos ao ambiente.

A identidade das fontes de energia não renováveis é relativamente ampla, comumente oriunda de combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural, e também a partir do processo de fissão nuclear. O uso de fontes não renováveis é intenso, contribuindo, na maior parte do mundo, com a maior parcela para a geração de energia elétrica e abastecimento de meios de transporte, setores industriais, comerciais, residenciais e serviços. A figura 1 traz uma ilustração do fluxo de energia para os Estados Unidos no ano de 2017. Pode-se observar claramente que, para o caso dos EUA, as principais fontes utilizadas na geração de energia elétrica são o carvão, o gás natural e a energia nuclear. Ainda analisando a figura 1, pode-se notar que o setor de transporte depende essencialmente do petróleo. As consequências desta diversidade de fontes de energia são mostradas via figura 2, onde tem-se uma ilustração das emissões estimadas de dióxido de carbono na atmosfera pelos EUA no ano de 2014. De forma correspondente, pode-se observar a partir da figura 2 que os maiores volumes de dióxido de carbono são produzidos a partir das principais fontes de energia utilizadas pelos EUA, ou seja, pelo petróleo, gás natural e carvão. Esta análise é válida a partir da consideração de que os EUA são responsáveis por cerca de 15% da emissão de CO_2 global, conforme pode ser observado via figura 3.

A partir deste cenário contemporâneo, onde os níveis de emissão de poluentes cresce constantemente, tem-se uma busca por soluções que viabilizem o desenvolvimento e que garantam a sustentabilidade dos meios de produção. Neste recorte, vários esforços vem sendo desenvolvidos para alcançar níveis aceitáveis de emissões de CO_2 . Recentemente, no ano de 2015, a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas determinou um limite de $2\text{ }^\circ C$ para o aumento da temperatura global até 2100. As principais sugestões para mitigação dos impactos ambientais foram a de adotar uma maior diversificação da matriz energética, incluindo fontes de energia renováveis, e a inserção de um número maior de unidades sequestradoras de dióxido de carbono, sendo os maiores exemplos as florestas [4]. Ainda neste contexto, em janeiro de 2018, o Parlamento da União Européia determinou que até 2030 deve-se dobrar os níveis de energia produzida a partir de fontes renováveis. Entretanto, nesta mesma diretriz, foi aprovado o corte e uso de madeira como fonte de energia renovável e de baixa emissão de CO_2 [5]. Este resultado foi de encontro com a comunidade científica, que em carta aberta demonstrou repúdio a esta medida, justificando que o uso extra de madeira para a geração de energia irá agravar ainda mais o cenário de altas emissões de dióxido de carbono na atmosfera [6, 7].

1.3.2 Energia Solar Fotovoltaica no Mundo

Diante dos desafios que surgem com o desenvolvimento global e o conseqüente aumento dos níveis de poluição, tem-se uma busca crescente por fontes de energia alternativas. Uma fonte de



Estimated U.S. Energy Consumption in 2017: 97.7 Quads

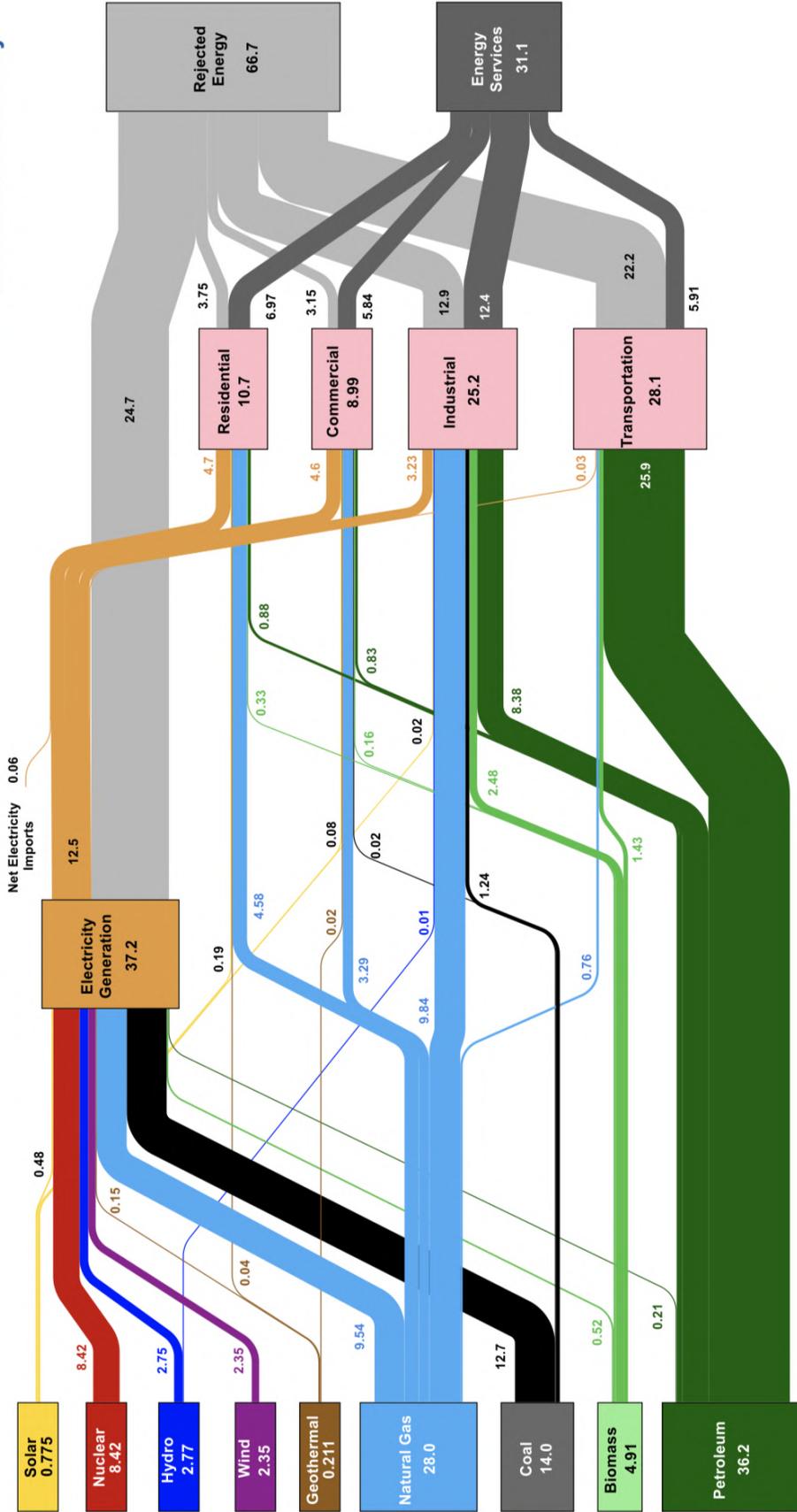


Figura 1: Fluxo de energia para os EUA no ano de 2017 [1].

Estimated U.S. Carbon Emissions in 2014: ~5,410 Million Metric Tons

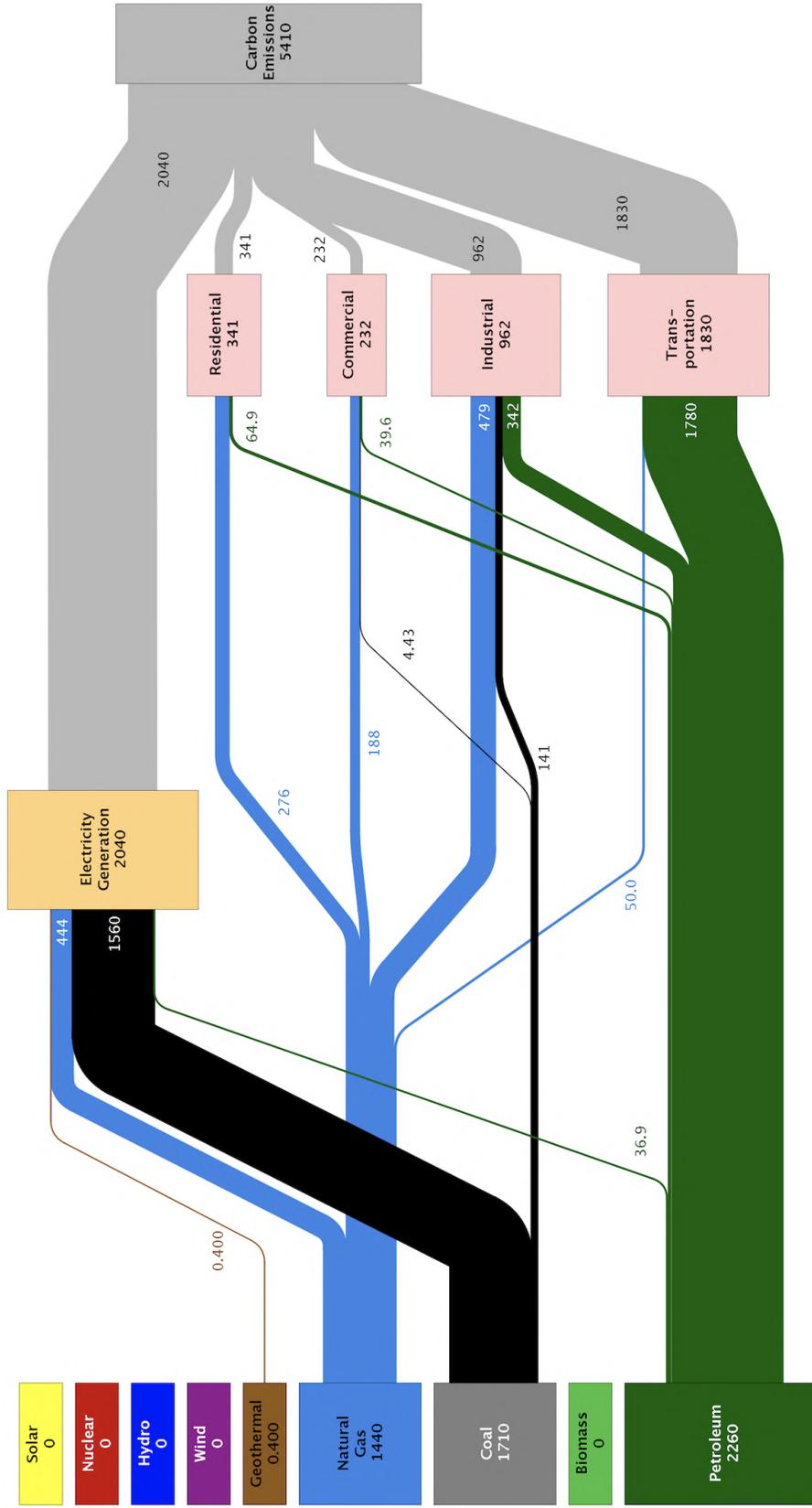


Figura 2: Emissões estimadas de dióxido de carbono pelos EUA no ano de 2014 [2].

Share of global carbon dioxide emissions from fuel combustion (2015)

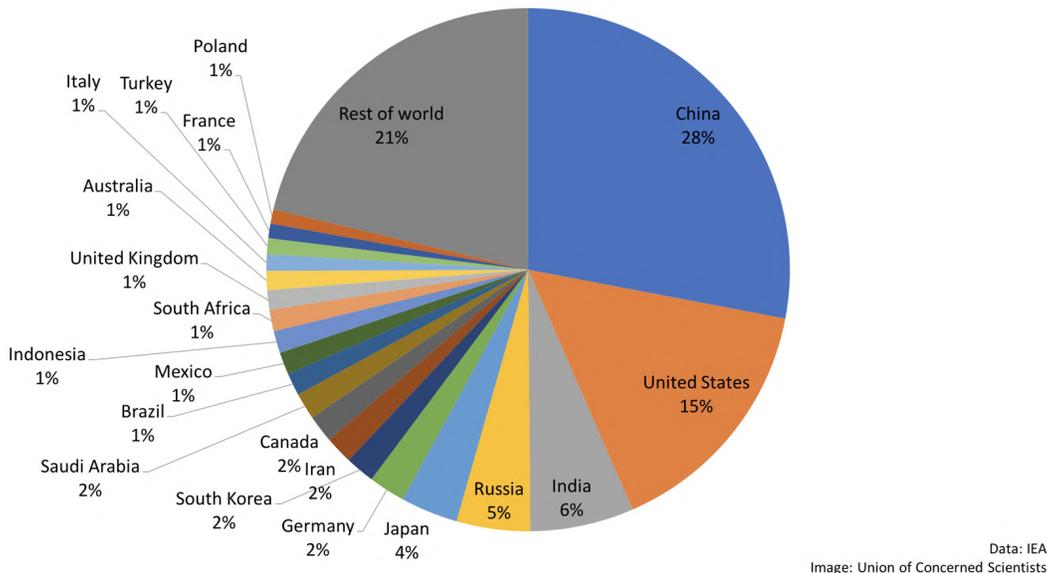


Figura 3: Emissão de dióxido de carbono por país [3].

energia que tem apresentado notável crescimento é a solar fotovoltaica. A figura 4 traz a evolução da capacidade instalada, em escala global, para diversos tipos de fontes renováveis de energia. Pode-se observar que o crescimento relativo da energia solar fotovoltaica foi conspícuo, principalmente entre os anos de 2013 e 2017.

O aumento da participação solar fotovoltaica nas matrizes energéticas ao redor do mundo é explicado por dois principais motivos. O primeiro é relacionado ao avanço científico e tecnológico na produção de novos materiais semicondutores (responsáveis pela conversão fotovoltaica de energia) e no processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos comerciais.

As células fotovoltaicas podem ser divididas em células de primeira, segunda e terceira geração. A primeira geração, caracterizada pelas células de silício mono e policristalino, e a segunda geração, caracterizada pelas células de silício amorfo e di-seleneto de cobre-índio-gálio, estão bem estabelecidas e são produzidas em larga escala. A terceira geração, caracterizada pelas células fotovoltaicas de multijunção e materiais orgânicos, ainda se encontra em fase de desenvolvimento em laboratórios de pesquisa [9].

A figura 5 traz a evolução da eficiência de conversão fotovoltaica para diversos tipos de células de primeira, segunda e terceira geração. Embora as células de multijunção, representadas pela cor roxa na figura 5, possuam alta eficiência, tem-se que as mesmas ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento.

Conforme o estudo realizado pelo Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energia Solar em 2018, tem-se que em 2017 a tecnologia de silício cristalino (mono e policristalino) compunha 95% da pro-

Total Renewable Power Generation Capacity, 2011-2017

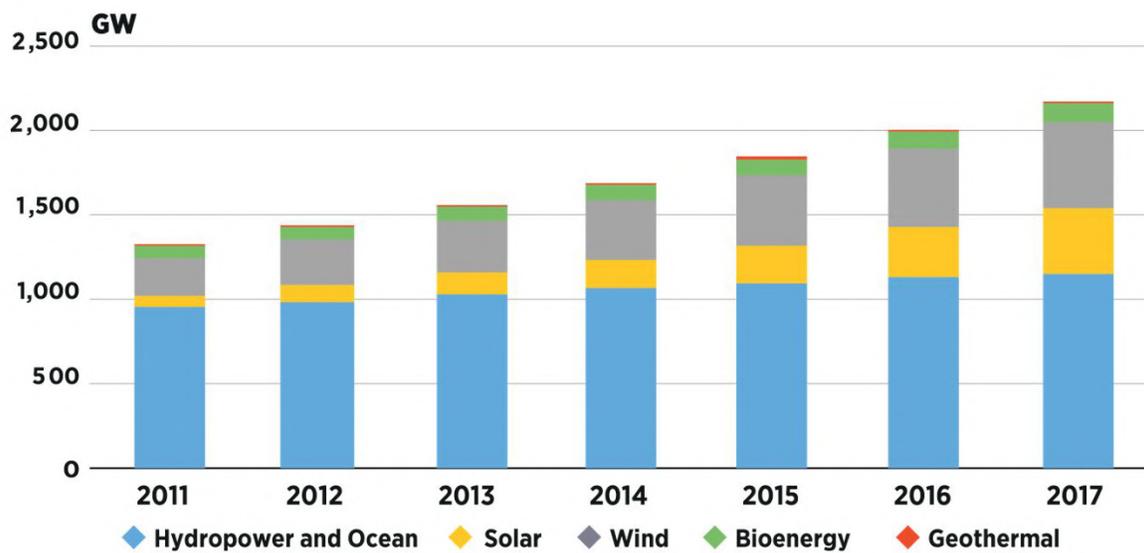


Figura 4: Evolução da capacidade instalada para diversas fontes renováveis de energia [8].

dução total de módulos fotovoltaicos, sendo que deste percentual, 62% era composto de módulos de silício policristalino. Para o mercado de células de segunda geração baseadas em filmes finos, responsáveis por 5% da produção total de células fotovoltaicas, tem-se que aquelas feitas de telureto de cádmio ocupam a maior fatia [11].

O segundo fator responsável pelo aumento da participação fotovoltaica nas matrizes energéticas é relacionado com os preços dos dispositivos e projetos de instalação. A figura 6 traz a evolução dos preços por unidade de Watt em corrente contínua (CC) para instalações de sistemas fotovoltaicos nos Estados Unidos de quatro naturezas distintas: instalação residencial, instalação comercial, instalação em escala de usina fotovoltaica (UFV) centralizada de módulos fixos e instalação de UFVs com seguidor solar em um eixo. Nesta mesma figura, observa-se que os custos de projeto são discriminados naqueles oriundos de módulos fotovoltaicos (amarelo), inversores (azul escuro), materiais estruturais e elétricos (azul claro), mão de obra (laranja) e outros custos (hachurado). Percebe-se que os custos que mais sofreram redução foram os oriundos da aquisição de módulos fotovoltaicos, o que se alinha ao desenvolvimento tecnológico ascendente das células fotovoltaicas mostrado na figura 5.

1.3.3 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

O Brasil iniciou sua participação no setor de energia solar fotovoltaica em meados da década de 50, por meio de pesquisas e desenvolvimento tecnológico de células a base de silício cristalino.



Best Research-Cell Efficiencies

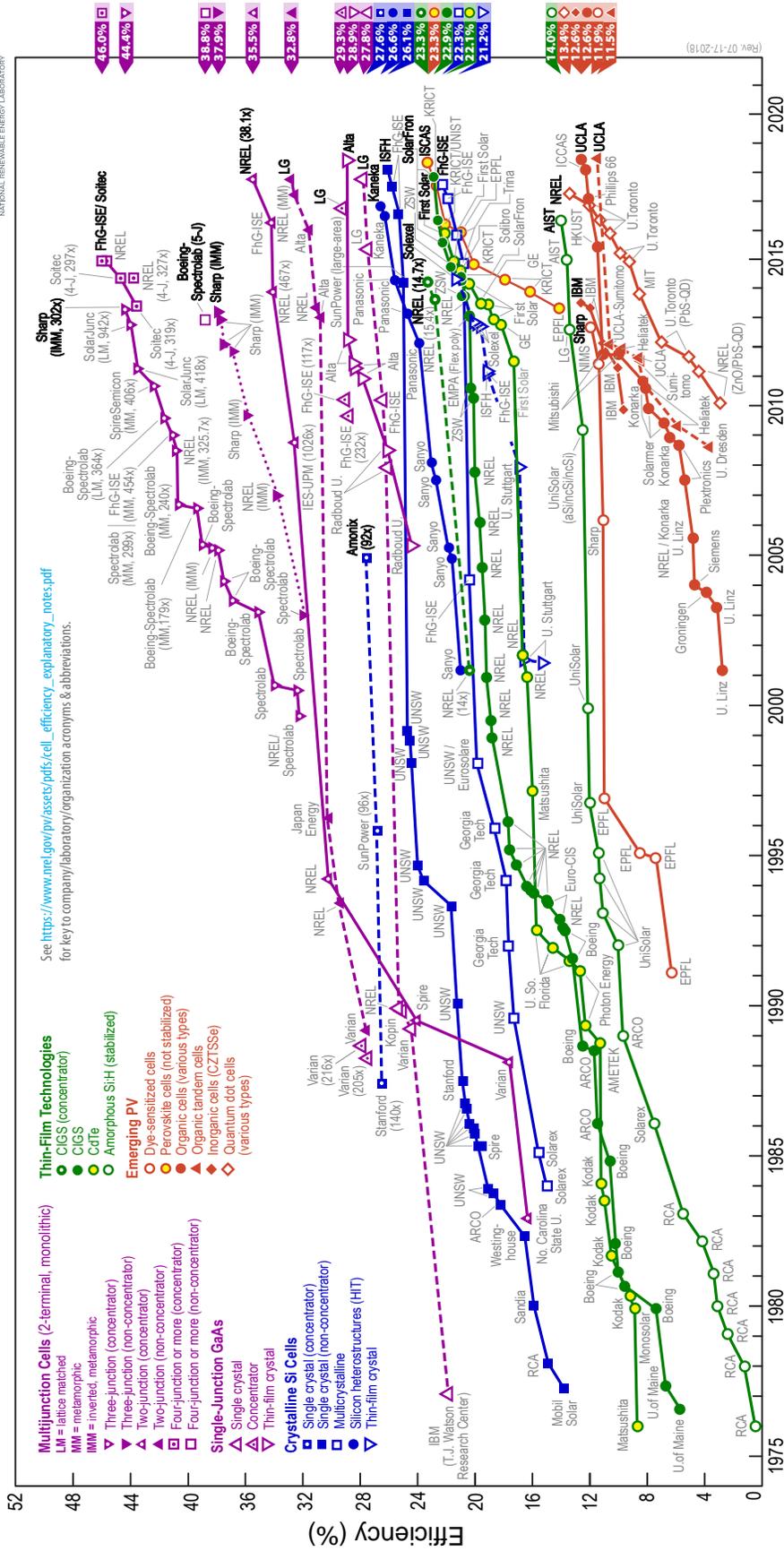


Figura 5: Evolução tecnológica dos materiais utilizados na conversão fotovoltaica [10]

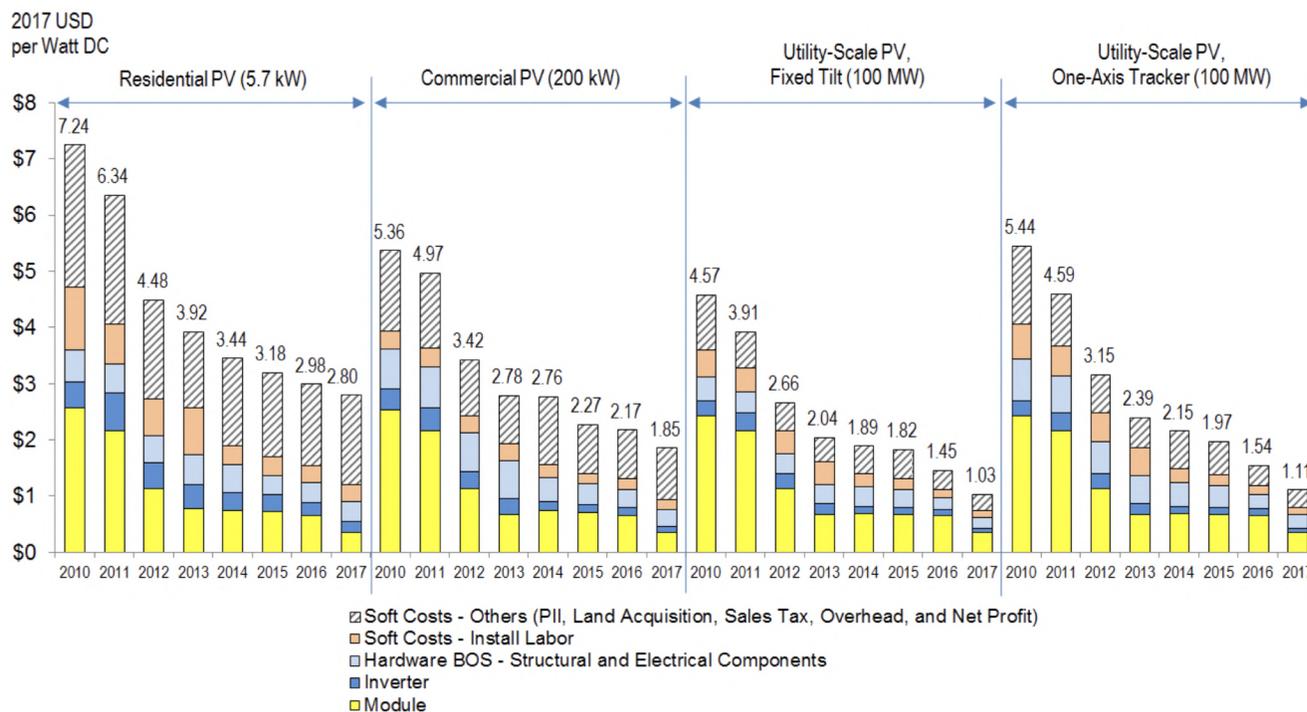


Figura 6: Evolução dos preços para a instalação de sistemas fotovoltaicos [12].

Entretanto, foi a partir da década de 70 que um grande grupo de pesquisadores se interessou pela energia fotovoltaica, aumentando notavelmente o desenvolvimento desta. O entusiasmo brasileiro por esta modalidade de geração de energia não se limitou à área acadêmica, vez que esforços foram realizados com o objetivo de utilizar a energia fotovoltaica para fins sociais. Conforme cita Tolmasquim (2016) [13]:

A partir da década de 1990, a energia fotovoltaica começou a fazer parte da solução para atendimento de localidades afastadas da rede elétrica. Em 1994, o Governo Federal, através do Ministério de Minas e Energia, criou o PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), que visava promover a eletrificação rural, principalmente via sistemas fotovoltaicos. Mais tarde, em 2003, foi instituído o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Programa Luz para Todos (LpT), que impulsionou a instalação de SIGFIs (Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes) ao redor do Brasil, incluindo sistemas fotovoltaicos. Dessa forma, até 2012 estimava-se a existência de 30 a 40 MW em sistemas fotovoltaicos isolados no país.

O ano de 2012 foi particularmente importante para o estabelecimento da energia fotovoltaica no Brasil, visto que houve a regulamentação de sistemas fotovoltaicos, em especial aqueles instalados em unidades consumidoras conectados à rede elétrica. Esta regulamentação foi realizada

pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, que no ano de 2015 viria a ser atualizada pela REN nº 687/2015 [14, 15]. A regulamentação desta modalidade de geração foi um grande avanço para o desenvolvimento da energia fotovoltaica no país, já que por meio destas duas resoluções estabeleceu-se as condições gerais para o acesso de micro e de minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, além do que foi determinado o funcionamento do sistema de compensação de energia elétrica, ou *net metering* em inglês.

Destaca-se que a publicação da REN nº 687/2015 trouxe avanços para a micro e minigeração, a partir da regulamentação de novos mecanismos de compartilhamento de geração e o ajuste do limite de potência de menor ou igual a 100 kW para menor ou igual a 75 kW para microgeração e superior a 100 kW e menor ou igual a 3 MW para superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para minigeração [15]. Ainda, nesta mesma atualização, definiu-se o sistema de compensação de energia elétrica como sendo "O sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa", isto é, a energia elétrica ativa injetada na rede da distribuidora não é compensada com o recebimento financeiro, mas sim com o consumo de energia elétrica ativa pela(s) unidade(s) consumidora(s) que esteja(m) registrada(s) sob seu cadastro de pessoa física ou jurídica [15]. Em contraste a esta realidade brasileira, tem-se que na Alemanha, por meio das políticas de fontes de energia renováveis, diretrizes de interesse foram propostas a partir de 2017 [16], visando o incentivo e a restrição do crescimento de sistemas fotovoltaicos:

- A energia elétrica ativa auto-consumida é taxada a partir de uma potência nominal de aproximadamente 10 kW;
- Novos sistemas fotovoltaicos de até 100 kWp recebem tarifa (em moeda local) fixa;
- Novos sistemas fotovoltaicos entre 100 e 750 kWp devem vender sua energia ativa no mercado direto, não devendo utilizá-la para geração própria;

Um outro ponto que merece destaque a respeito do panorama histórico de energia fotovoltaica no Brasil é o grande aumento da participação desta fonte renovável a partir dos leilões promovidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME). O primeiro leilão a incluir a energia solar em sua contratação foi o 2º Leilão de Energia Nova A-5 de 2013, com o cadastramento de 152 projetos e uma oferta de 3.601 MW. Depois do ano de 2013, houve ainda quatro leilões que incluíram em suas chamadas a contratação de empreendimentos fotovoltaicos: o Leilão de Energia de Reserva de 2014, o Leilão de Energia Nova A-5 de 2014, o Leilão de Energia de Reserva de 2016 e o Leilão de Energia Nova A-4 de 2017 [17]. A partir da publicação da Portaria MME nº 465 de 30 de novembro de 2017 e da Portaria MME nº 44 de 14 de fevereiro de 2018 no Diário Oficial da

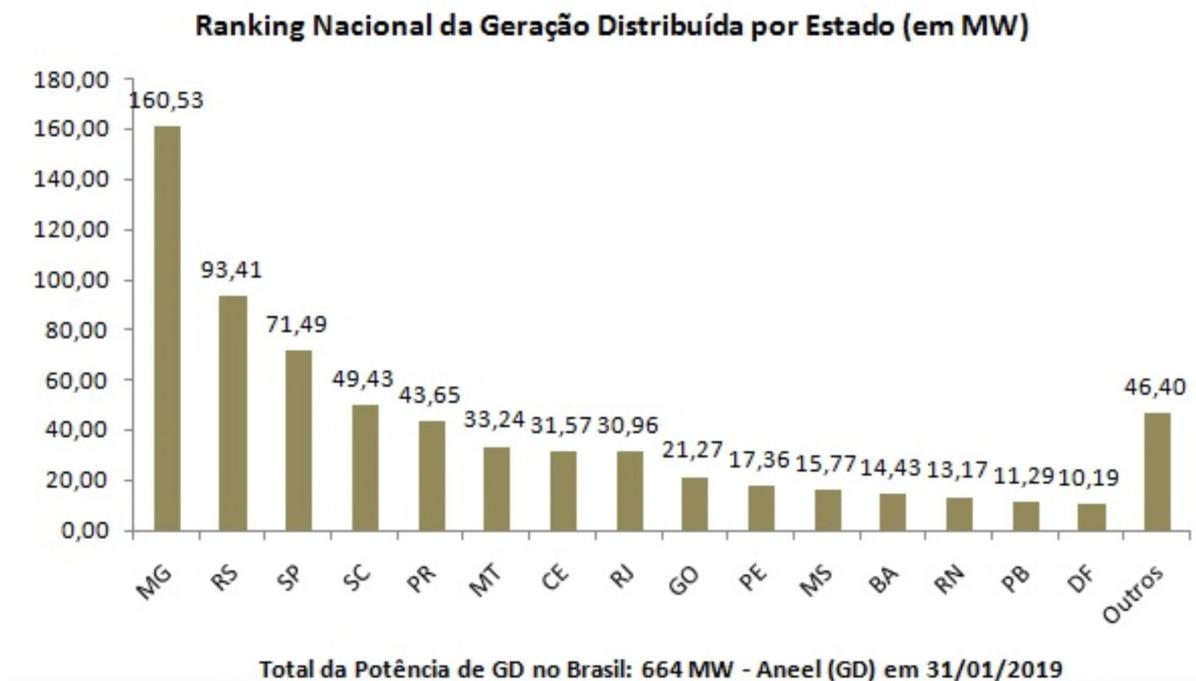


Figura 7: Ranking nacional de geração distribuída para o mês de setembro de 2018[23].

União, foi prevista a realização de dois Leilões de Energia Nova no ano de 2018 [18, 19]. Um destes, o Leilão de Energia Nova A-4 de 2018, é referente à contratação de energia proveniente de empreendimentos de fontes hidrelétrica, termelétrica, eólica e solar [20].

Hoje, a energia solar fotovoltaica participa da matriz energética brasileira com um total de 2.254 usinas, totalizando uma potência instalada de 1.322.173 kW, que equivale a 0,7851% do total da capacidade instalada no país [21]. Em janeiro de 2018, a ANEEL divulgou que o número de conexões de micro e minigeração no Brasil ultrapassou a marca de 20 mil instalações, atendendo a 30 mil unidades consumidoras. Deste total, 58,71% correspondem à classe de consumo residencial, sendo que a classe comercial contribui com 35,25% das instalações. Estas instalações fotovoltaicas respondem por 20.666 das adesões de micro e minigeração [22].

Em termos de geração distribuída regional, a figura 7 traz, para o mês de setembro de 2018, a distribuição de potência instalada por cada estado brasileiro. Observa-se que Goiás encontra-se na nona colocação. O estado tem aumentado de forma constante a potência oriunda de geração distribuída, tal como pode-se verificar por meio da figura 8. Destaca-se o acelerado aumento da potência instalada depois de fevereiro de 2017, ano da implantação do Programa Goiás Solar, cujos eixos de atuação envolvem ações para tributações mais brandas, financiamentos mais acessíveis, melhor infraestrutura e desburocratização dos processos de habilitação dos empreendimentos [23].

Como considerações finais, pode-se citar a nota técnica nº 0056/2017 emitida pela ANEEL [24] em maio de 2017. Neste documento, a Agência traz projeções acerca do aumento da potência instalada advinda da modalidade de microgeração distribuída residencial e comercial, representada pela figura 9, bem como do aumento do número de unidades consumidoras a adotarem esta

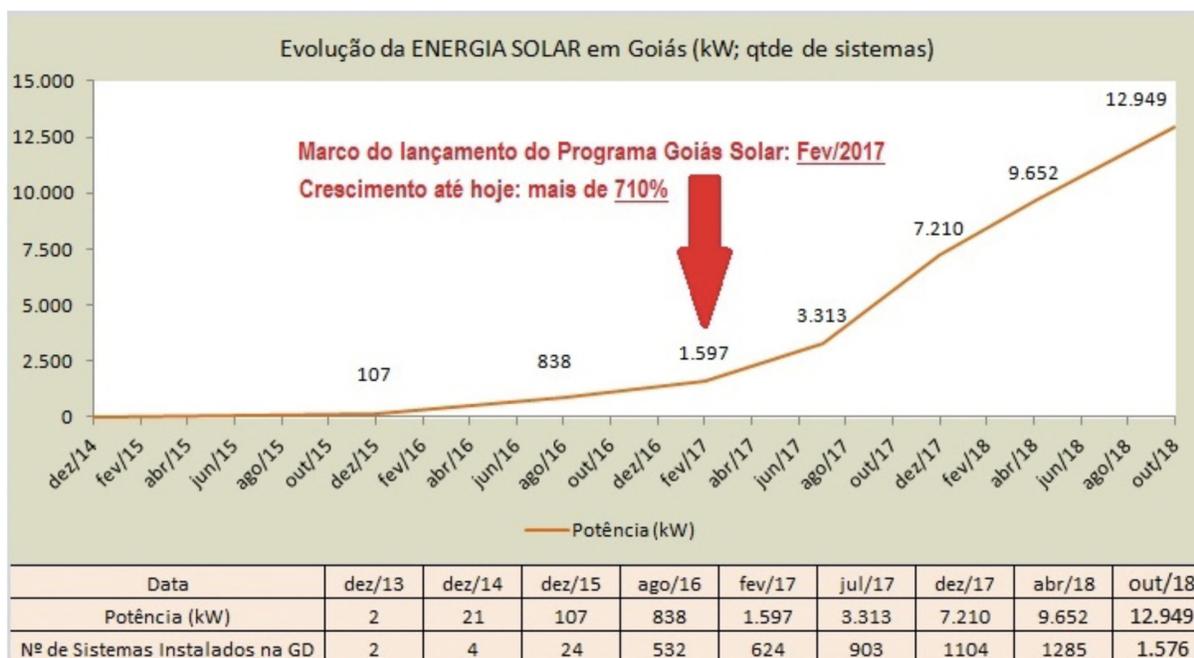


Figura 8: Histórico da potência oriunda de geração distribuída instalada no estado de Goiás [23].

modalidade, representada pela figura 10. Observa-se um horizonte favorável ao aumento deste tipo de geração de energia elétrica, sendo fundamental a contribuição de avanços tecnológicos e da pesquisa científica para a garantia de uma matriz energética brasileira diversificada e robusta.

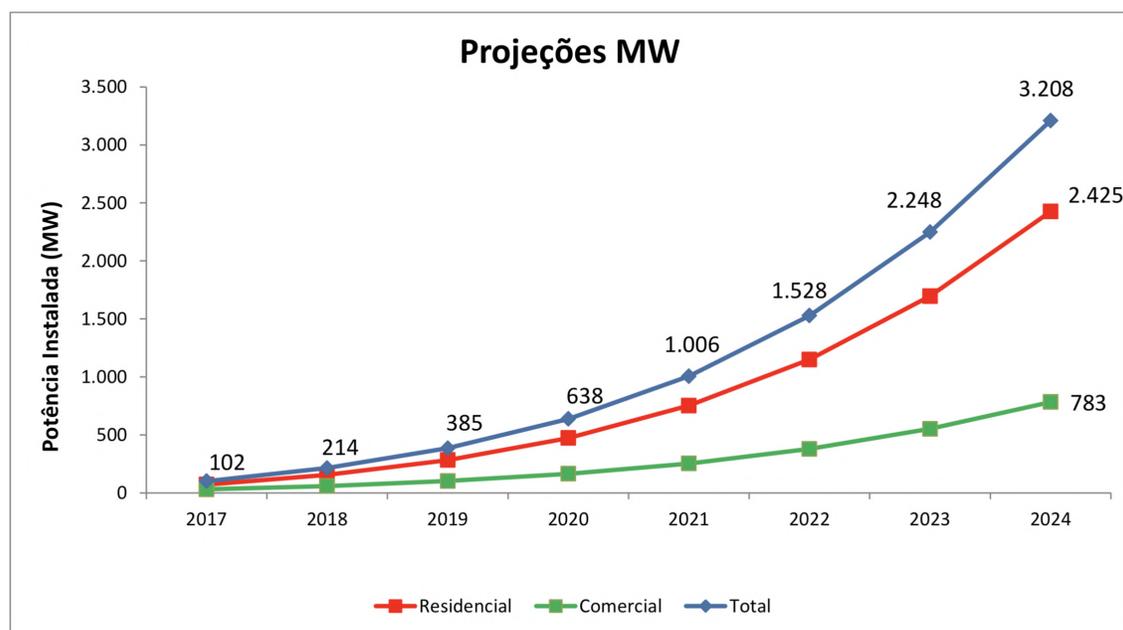


Figura 9: Previsão anual do aumento da potência de microgeração residencial e comercial instalada [24].

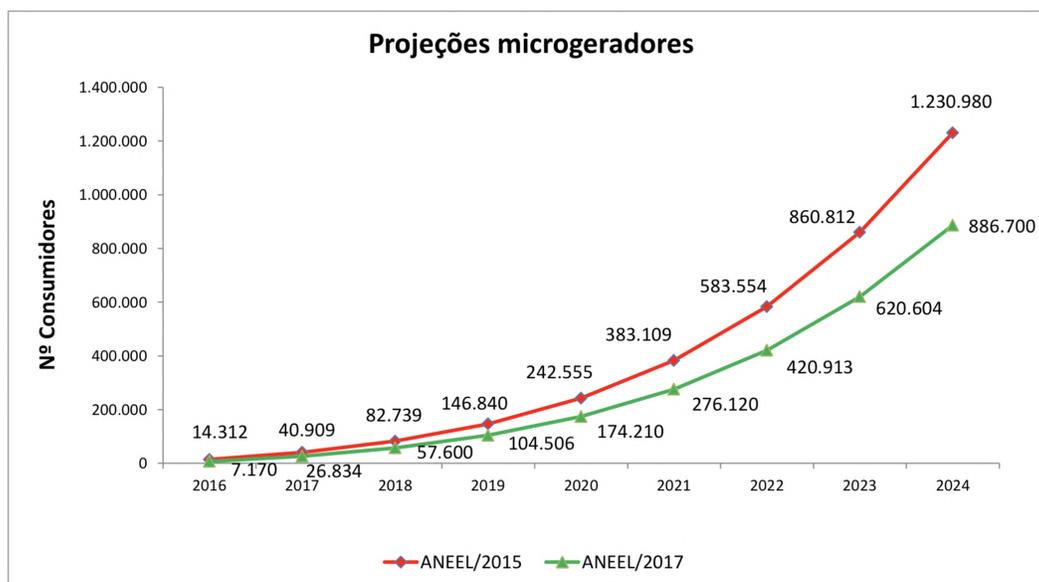


Figura 10: Projeção de unidades consumidoras a adotarem a modalidade de microgeração distribuída [24].

1.4 Metodologia

A seção anterior deste trabalho apresentou uma justificativa a respeito do porquê estudar sistemas fotovoltaicos, a partir de uma lente focada em aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos. Uma vez explorados os diversos fatores que favorecem a implementação destes sistemas, e tendo em vista que se trata de uma área ainda em crescimento e com grande potencial de participação na matriz energética brasileira, este trabalho fornece contribuições de aspectos técnicos e operacionais para a literatura de sistemas fotovoltaicos. O recorte adotado neste estudo trata dos impactos da deposição de sujidade na superfície de módulos fotovoltaicos de silício policristalino, sendo estas consequências analisadas em função do desempenho e operação do sistema.

Em virtude da natureza da investigação proposta, este trabalho apresenta duas áreas de análise que merecem ser tratadas individualmente: a identidade química e as propriedades físico-químicas da sujidade e o desempenho do sistema frente a presença deste interferente. Desta forma, duas abordagens serão utilizadas especificamente para a exploração de cada uma destas áreas de análise.

Uma abordagem é dedicada ao estudo específico da sujidade, a partir de análises físico-químicas, voltada para a identificação da composição elementar e estrutural da sujidade que se deposita nos módulos fotovoltaicos. As seguintes técnicas instrumentais foram utilizadas nas análises: Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva, Difração de Raios-X, Termogravimetria com Análise Térmica Diferencial, Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado e Espectrometria na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier, sendo cada uma responsável por fornecer informações específicas. Ao final, os dados obtidos foram interpretados à luz da literatura e pôde-se caracterizar a sujidade estudada.

Uma outra abordagem destina-se à análise do desempenho do sistema, que preocupou-se em mostrar o comportamento da produção de energia e do rendimento global do sistema, frente ao depósito da sujidade nos módulos fotovoltaicos ao longo de um ano. Por meio desta análise, pôde-se identificar o nível de eficiência no qual o sistema operou durante o período de estudo.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é apresentada na forma de 6 capítulos, sendo o último dedicado às conclusões finais do trabalho desenvolvido.

- **CAPÍTULO 1:** Este capítulo traz uma introdução do trabalho, discutindo os objetivos e as justificativas do estudo. Além disso, são apresentados diversos aspectos relevantes da energia fotovoltaica no mundo, no Brasil e em Goiás.
- **CAPÍTULO 2:** Neste capítulo, são apresentados os principais estudos acerca dos impactos da sujidade em sistemas fotovoltaicos. Discute-se os principais parâmetros analisados, tais como a transmitância da superfície transparente dos módulos fotovoltaicos e as perdas na produção de energia acarretadas pela cobertura dos módulos pela sujidade.
- **CAPÍTULO 3:** Neste capítulo é apresentado o sistema fotovoltaico da EMC/UFG, abrangendo seus componentes, características de instalação e de geração. Ainda, são expostos alguns dados importantes da região na qual o SFV está instalado.
- **CAPÍTULO 4:** No capítulo 4 são apresentadas as diversas análises físico-químicas e microbiológicas utilizadas na caracterização da sujidade presente no SFV da EMC/UFG.
- **CAPÍTULO 5:** Neste último capítulo, são apresentados e discutidos os impactos causados pela sujidade na operação do SFV da EMC/UFG.
- **CAPÍTULO 6:** São expostas as conclusões finais em face dos objetivos propostos no capítulo introdutório.

CAPÍTULO 2: SUJIDADE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: HISTÓRICO, ESTADO DA ARTE, DESAFIOS E PERSPECTIVAS.

O objetivo deste capítulo é uma retrospectiva histórica do desenvolvimento das pesquisas acerca dos impactos da sujidade na geração de energia elétrica e na operação de sistemas fotovoltaicos. São apresentados estudos pioneiros nesta área, bem como o estado da arte e os desafios e perspectivas futuras para as pesquisas e avanços tecnológicos.

2.1 Estudos Pioneiros

Os primeiros estudos acerca dos efeitos da presença da sujidade em superfícies planas utilizadas para conversão da energia solar datam de várias décadas. Entre as primeiras contribuições nesta área, pode-se citar o notável trabalho desenvolvido nos anos 40 em Boston, nos Estados Unidos, por Hottel e Woertz [25]. Neste estudo, um arranjo de 3 coletores solares térmicos planos foi acompanhado durante um período de 3 meses. Observou-se que o desempenho do sistema sofreu uma queda de até 4,7% com uma perda da radiação solar incidente de 1% devido à deposição de sujidade sobre a superfície dos coletores instalados em uma inclinação de 30° em relação ao plano horizontal. Estes resultados abriram portas para diversos novos estudos que viriam a ser realizados nos próximos anos.

Seguindo a metodologia utilizada por Hottel e Woertz, Dietz [26] nos anos 60 realizou um estudo na região nordeste dos Estados Unidos, onde foi observado que amostras de vidro instaladas em ângulos de inclinação variando de 0° a 50° apresentaram uma redução de até 5% para a radiação solar coletada. Esta perda foi atribuída ao acúmulo de sujidade na superfície dos coletores solares.

Alguns anos depois, na década de 70, Sayigh [27] publicou um estudo realizado na Arábia Saudita, onde seis coletores planos foram analisados aos pares. Cada par de coletores foi instalado em uma inclinação específica, sendo um par instalado em uma inclinação de zero graus em relação ao plano horizontal, outro par em 30 graus e o último em 60 graus. Em cada par, um dos coletores foi submetido a limpeza diária enquanto o outro não foi submetido a qualquer processo de limpeza. Realizou-se, então, um estudo comparativo para a energia absorvida por cada coletor, onde os dados obtidos para o coletor sujo foram comparados aos dados do respectivo coletor limpo daquele par. Os resultados mostraram um acúmulo de sujidade diário próximo a 2,5 g.m⁻² entre os meses de abril e junho de 1978. Sayigh conclui, então, que o efeito da sujidade era predominante e acarretava uma perda de um terço para a energia solar absorvida no sistema instalado na Arábia Saudita. Como pontuado por Ghazi et al. [28], os estudos realizados por Sayigh destacaram o quão severos eram os efeitos do acúmulo da sujidade na superfície de coletores solares na região do Golfo Árabe. A partir disto, grande interesse foi despertado para a investigação da sujidade que atinge sistemas fotovoltaicos em regiões de clima desértico, semiárido e mediterrâneo.

A explicação do porquê regiões com climas desérticos, semiáridos e mediterrâneos atraíram o interesse de pesquisadores está no fato de que tais regiões comumente apresentam grande potencial solar disponível para exploração. Esta observação é justificada pela irradiação solar que atinge estas regiões, o que pode ser observado por meio da figura 11, que ilustra a irradiação global no plano horizontal recebida por cada região do Planeta.

Avançando nesta linha de pesquisa, pode-se citar outro estudo realizado na década de 70 cuja contribuição foi de grande valia. Publicado por Garg [30], na Índia, este estudo analisou o efeito da sujidade depositada em diferentes superfícies transparentes de coletores solares térmicos planos. Neste trabalho, superfícies de vidro e plástico foram comparadas.

Os resultados obtidos mostraram que a superfície de plástico sofreu uma maior perda na transmitância da radiação solar, comparada com a perda para uma superfície de vidro, devido ao maior acúmulo de sujidade. A figura 12(a) ilustra as perdas para uma superfície de vidro enquanto que a figura 12(b) representa estas perdas para uma superfície de plástico. O eixo vertical destas duas figuras representa o fator de correção atribuído à sujidade, ou seja, representa o quociente entre a transmitância para uma superfície suja e aquela para uma superfície limpa ($TRANSMITÂNCIA_{SUPERFÍCIE\ SUJA} / TRANSMITÂNCIA_{SUPERFÍCIE\ LIMPA}$). O eixo horizontal representa a inclinação em relação ao plano horizontal na qual a superfície foi instalada.

Analisando ambas as figuras, pode-se verificar que, de fato, o fator de correção para a superfície de vidro traduz uma menor perda da transmitância, enquanto que para a superfície de plástico observa-se uma maior perda. Além disto, pode-se verificar que as maiores perdas ocorrem para inclinações mais próximas do plano horizontal, enquanto que para uma instalação em um plano perpendicular ao horizontal tem-se as menores perdas.

O maior acúmulo de sujidade e, conseqüentemente, a maior perda na transmitância para uma superfície de plástico foi atribuída à superfície mais rugosa e menos regular do polímero quando comparada à do vidro, possibilitando uma maior adesão e penetração de partículas.

As conclusões do trabalho de Garg foram fundamentais, pois verificou-se que o tipo de material utilizado para a fabricação da superfície transparente de um módulo fotovoltaico afeta diretamente a absorção da radiação solar, já que suas características físicas e químicas estão diretamente ligadas ao fenômeno da deposição de sujidade.

Naturalmente, os estudos realizados acerca da deposição de sujidade na superfície de módulos fotovoltaicos não podem ser generalizados para todos os locais do mundo, visto que as condições climáticas e geográficas em que os sistemas se inserem mudam drasticamente conforme o local de instalação. A figura 13 ilustra uma comparação do desempenho de módulos inseridos em diferentes condições climáticas, peculiares a três países: Estados Unidos, Oman e Egito.

Analisando os dados apresentados, pode-se observar que os efeitos da sujidade afetam visivelmente mais os sistemas instalados em Oman e no Egito, sendo que para os Estados Unidos a queda da potência produzida devido ao acúmulo de sujidade é comparativamente muito pequena. Estes resultados são atribuídos aos climas e biomas destes países. O Egito apresenta bioma desértico, com clima árido, contando com pouca precipitação anual que pode chegar a 2 mm em intervalos

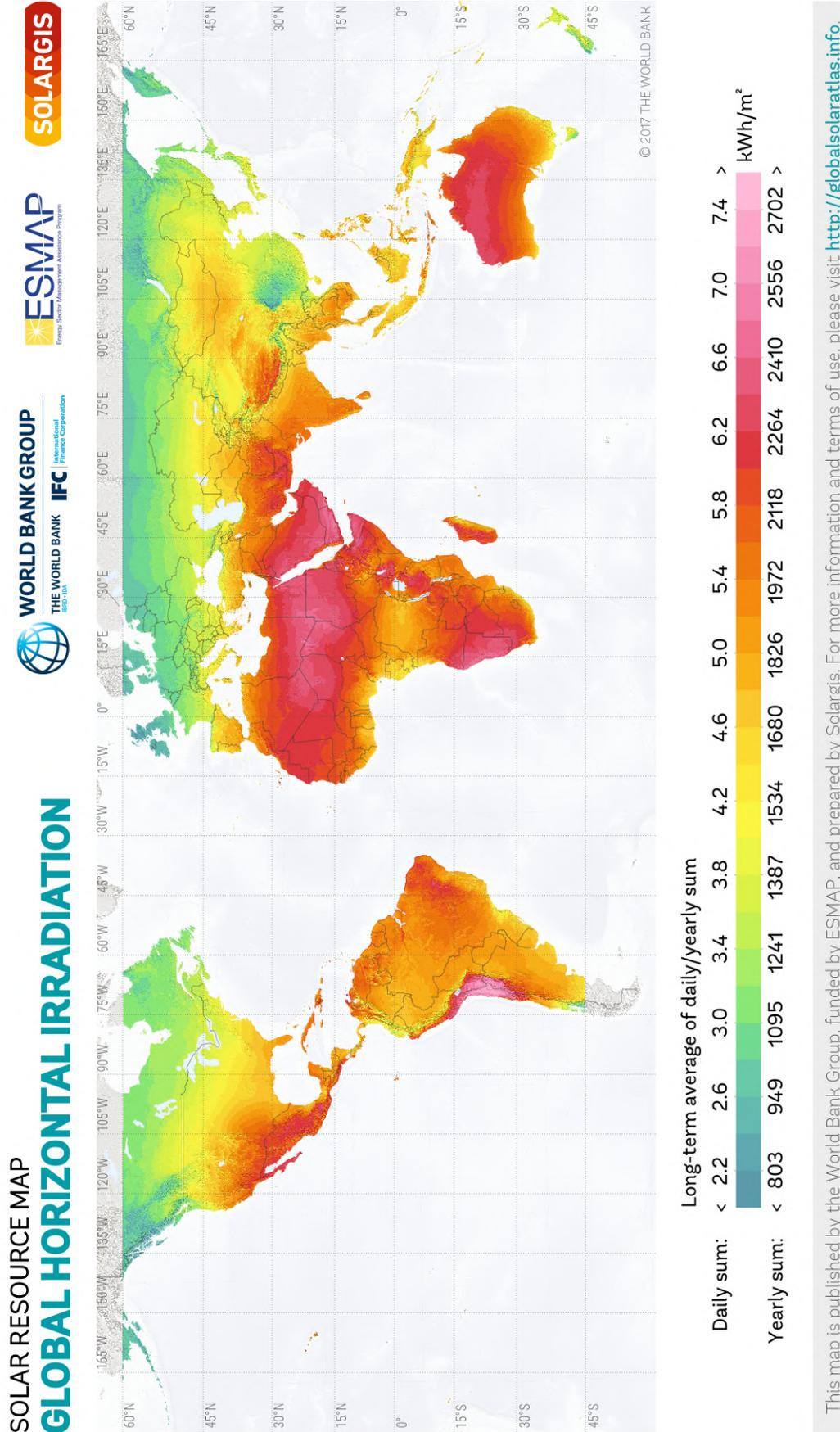


Figura 11: Irradiação global no plano horizontal em escala mundial [29].

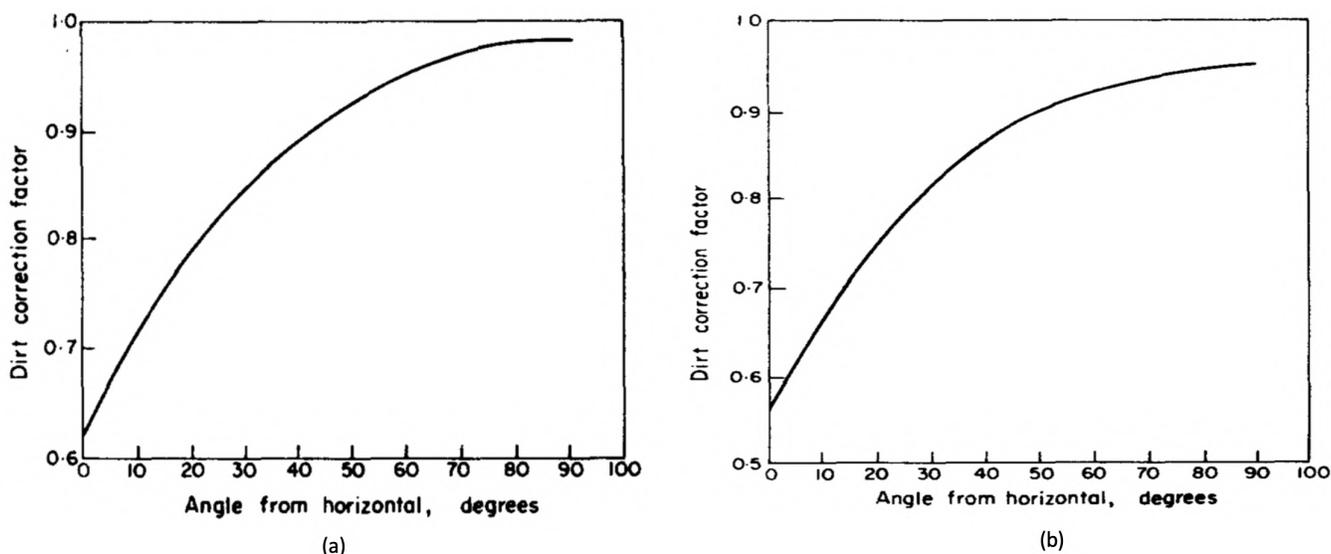


Figura 12: Correção da transmitância da radiação solar normal à superfície de uma lâmina (a) de vidro (b) de plástico [30].

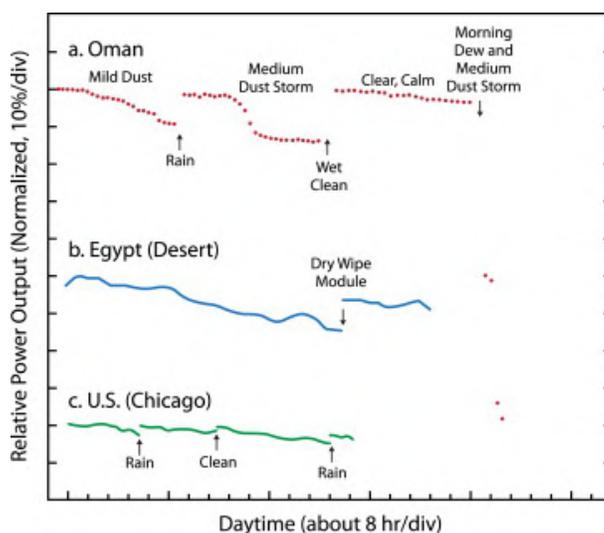


Figura 13: Desempenho de módulos fotovoltaicos instalados em (a) Oman (b) Egito (c) EUA.[31]

de muitos anos [32]. Oman, localizado no Golfo Persa, possui clima árido e altas temperaturas durante o ano, sendo ainda submetido a constantes tempestades de areia. A precipitação média anual é próxima de 100 mm [33], o que, embora pouco, pode contribuir para a limpeza dos módulos fotovoltaicos instalados, conforme pode ser observado via figura 13.

Com relação à natureza química e física da sujidade, os primeiros estudos realizados reportaram informações acerca da geometria e tamanho das partículas depositadas. Os recursos e métodos experimentais utilizados nestes estudos limitavam-se a microscopia ótica. Nos estudos teóricos,

os pesquisadores se baseavam na teoria matemática de espalhamento, onde as partículas eram consideradas perfeitamente esféricas e de mesmo tamanho, para prever a relação entre a transmissão da radiação e o ângulo de incidência [31, 34].

Os estudos até aqui discutidos são considerados pioneiros na pesquisa sobre sujidade em sistemas fotovoltaicos, visto que a partir dos métodos e análises por eles utilizados foram desenvolvidas novas tecnologias e um avanço ímpar na pesquisa e produção de módulos e sistemas fotovoltaicos foi promovido.

2.2 Desenvolvimento e Fases dos Estudos

Os estudos até aqui citados foram realizados até o final de 1970. A quantidade de trabalhos direcionados aos efeitos da sujidade em sistemas fotovoltaicos era escassa até então, o que é justificado pela ausência de barreiras econômicas apreciáveis no uso de combustíveis fósseis nesta época. Consequentemente, pouco interesse era destinado para os estudos deste tipo de sistema, o que limitou o crescimento e o desenvolvimento científico e tecnológico na área de recursos renováveis.

No entanto, com o episódio histórico do embargo do petróleo na década de 70¹, houve um aumento significativo no interesse pela utilização de recursos renováveis [35, 36].

Neste contexto, com base nas características das investigações realizadas a respeito do impacto causado pela presença de sujidade em sistemas fotovoltaicos, Mani e Pillai [37] categorizaram as pesquisas em duas fases – Fase-I e II.

A Fase-I foi compreendida como aquela contendo os estudos realizados entre as décadas de 40 e 90, onde o principal foco de interesse era o impacto causado pelo ângulo de inclinação em que os coletores solares foram instalados e a superfície transparente dos módulos.

A Fase-II, por sua vez, foi caracterizada pelas pesquisas conduzidas a partir de 1990, onde os estudos realizados apresentaram métodos de coleta e análise de dados mais sofisticados e robustos. Em seu estudo, Mani e Pillai ainda apontam algumas críticas a respeito das pesquisas da Fase-I, sendo algumas delas:

- Poucos estudos acerca dos níveis de poluição foram realizados, bem como a respeito da composição da poluição local;
- Grande parte dos estudos desconsideravam a velocidade e direção dos ventos, bem como a orientação dos coletores solares;
- Estudos preocupados com a caracterização físico-química da sujidade eram escassos nesta Fase, contribuindo para um conhecimento mais limitado acerca do fenômeno de deposição da sujidade em superfícies.

¹Houve outros momentos na história em que verificou-se elevação do preço do petróleo, como o colapso de 1986 e o *boom* decorrido nos anos 2000, sendo o primeiro associado à guerra do Golfo de 1990 e o segundo relacionado à guerra do Iraque, em 2003.

A partir dos anos 90, início da Fase-II, foi observado o surgimento e o crescimento de pesquisas caracterizadas por um maior rigor experimental e por uma maior variedade de temas estudados, principalmente daqueles temas ausentes na Fase-I, conforme apontado pelas críticas de Mani e Pillai.

2.3 Estudos Contemporâneos

Como discutido anteriormente, a Fase-II das pesquisas se caracteriza por um maior rigor nos experimentos, produzindo uma maior confiabilidade e abrangência dos resultados e análises. Considerados como pioneiros desta fase, cita-se o estudo realizado por El-Shobokshy e Hussein [38]. Neste trabalho, conduzido em laboratório, foram utilizados um simulador solar e tipos diferentes de sujidade, cujas características físicas foram determinadas via uso de um microscópio ótico.

O simulador solar consistiu em lâmpadas halógenas, cuja irradiância fornecida à superfície do módulo era de 195 W.m^{-2} . Os tipos de sujidade utilizadas foram três – calcário, cimento e carbono particulado. Por meio da microscopia, foi possível determinar a distribuição de tamanho das partículas de cada sujidade, sendo possível separar subtipos via granulometria.

Um resultado de grande importância obtido a partir deste experimento foi relativo ao comportamento da intensidade solar captada pelas células fotovoltaicas frente à densidade de sujidade acumulada na superfície dos módulos. Este resultado é ilustrado por meio da figura 14.

Observa-se que o efeito da redução do desempenho do módulo fotovoltaico é mais crítico para a sujidade composta por partículas menores, independente do tipo, mostrando que os efeitos da sujidade em sistemas fotovoltaicos não eram correlacionados apenas ao tempo de exposição, mas que a natureza das partículas influenciava muito nas perdas de geração de energia elétrica.

Esta observação vai ao encontro do que é esperado, já que partículas pequenas possuem maior superfície específica de contato, favorecendo fenômenos de nucleação, agregação e crescimento cristalino. Com isto, a radiação solar encontra maior impedimento para ser absorvida pelo material semicondutor responsável pelo efeito fotovoltaico.

Ainda, foi observado que, a sujidade composta por carbono absorvia mais prontamente a radiação solar que a sujidade composta por cimento e calcário, contribuindo para uma menor captura da luz incidente pela célula fotovoltaica, acarretando um aumento de temperatura no dispositivo.

Com o objetivo de investigar os efeitos do vento e da orientação dos módulos fotovoltaicos na deposição de sujidade, Goossens et al. [39] conduziram experimentos *in situ* no deserto de Negev, em Israel. O estudo considerou a velocidade e direção dos ventos, bem como a rotação dos coletores solares, a qual foi determinada de modo que os coletores acompanhassem a posição do sol durante o dia.

Os dados do sistema foram obtidos com frequência definida – alvorecida, durante a manhã, meio dia solar, durante a tarde e no pôr do sol. Goossens et al. observaram que altas velocidades do vento acarretavam uma maior deposição de sujidade na superfície dos coletores solares, o que

pode ser justificado por um maior fluxo de partículas e por uma maior turbulência sob os quais os coletores solares estariam submetidos. Tais observações são indicadas pela tabela 1, onde as colunas da esquerda destacadas em vermelho indicam a velocidade do vento e o ângulo de inclinação do coletor solar naquele instante, e as colunas da direita, também destacadas em vermelho, indicam a densidade de sujidade na superfície do coletor.

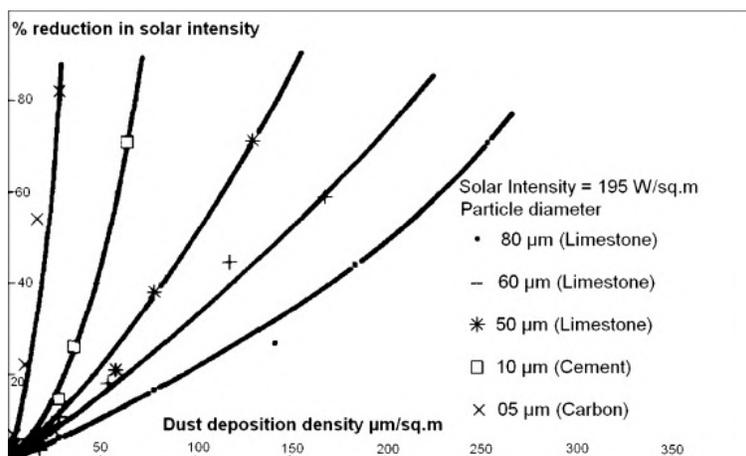


Figura 14: Redução da intensidade solar captada por célula fotovoltaicas em função da densidade de sujidade acumulada por tipo de sujidade [38].

Tabela 1: Deposição de sujidade em função da inclinação do módulo fotovoltaico e da velocidade e direção dos ventos [39]

Air velocity (m/s)	Inclination angle of photovoltaic panel	Dust deposition on solar collector															
		Dust deposition on horizontal reference surface				Dust deposition on western mirror ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				Dust deposition on eastern mirror ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				Dust deposition on photovoltaic panel ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)			
		N10° E	NW10° N	W10° N	SW10° W	N10° E	NW10° N	W10° N	SW10° W	N10° E	NW10° N	W10° N	SW10° W	N10° E	NW10° N	W10° N	SW10° W
0.57	58° (morning)	0.473	0.318	0.445	0.383	15	18	30	12	1541	852	1128	1021	814	734	1090	899
	29° (forenoon)	0.624	0.564	0.471	0.540	383	76	207	137	1420	1872	1042	1709	1334	868	1125	852
	0° (noon)	0.724	0.737	0.558	0.712	1166	413	310	407	972	1642	1762	1813	1489	1653	704	1350
	29° (afternoon)	0.624	0.685	0.761	0.733	1589	1076	726	935	295	559	740	687	1230	1818	2399	2086
0.72	58° (evening)	0.459	0.607	0.645	0.620	1602	1850	2055	1918	15	6	11	6	654	1170	1144	1165
	58° (morning)	0.462	0.360	0.469	0.366	10	8	41	23	1432	1003	1087	1025	873	799	1237	788
	29° (forenoon)	0.590	0.544	0.429	0.569	376	73	189	133	1315	1825	911	1799	1268	810	1057	905
	0° (noon)	0.683	0.708	0.526	0.703	1098	350	255	407	914	1596	1742	1721	1400	1609	616	1391
0.95	29° (afternoon)	0.572	0.674	0.732	0.701	1431	988	641	909	293	653	760	707	1128	1748	2310	1918
	58° (evening)	0.428	0.551	0.629	0.591	1487	1784	2017	1840	13	2	0	2	615	949	1105	1095
	58° (morning)	0.450	0.315	0.439	0.335	19	31	69	51	3453	2015	2175	2183	2022	1826	3190	1878
	29° (forenoon)	0.575	0.487	0.372	0.478	886	144	431	247	3156	4171	1780	3826	2995	1604	2365	1741
0.95	0° (noon)	0.644	0.646	0.407	0.651	2507	528	368	703	2026	4346	3689	4424	3329	3013	858	2814
	29° (afternoon)	0.539	0.603	0.777	0.678	3382	1772	1072	1529	535	1206	1778	1449	2639	4465	6814	5419
	58° (evening)	0.395	0.581	0.729	0.609	3382	4466	5446	4591	20	9	13	9	1359	2563	3389	2786

Outra observação muito importante foi que a maior deposição de sujidade ocorreu para o meio dia solar (i.e., para o instante em que a inclinação dos coletores em relação ao plano horizontal é a

menor), e a menor deposição ocorreu para a alvorada e o pôr do sol (instantes em que a inclinação dos coletores é máxima).

Goossens e Kerschaefer [40] observaram um fenômeno importante relacionado à interação entre a camada anti-reflexo do módulo fotovoltaico e a natureza da sujidade depositada. Os pesquisadores reportaram que partículas muito pequenas interagem intensamente com a camada anti-reflexo causando danos irreversíveis para o dispositivo. Por outro lado, Hammond et al. [41] observaram que dejetos de pássaros na superfície dos módulos ocasionavam perdas mais significantes que aquelas relacionadas a poeira e matéria particulada. Além disso, reportaram que o processo de limpeza dos dejetos de pássaros requeria intervenção mecânica, já que nem chuvas ou ventos eram capazes de limpar este tipo de sujidade.

A relação entre o acúmulo de sujidade e o desempenho de sistemas fotovoltaicos também pode ser analisada por meio do estudo da transmitância da radiação solar através da superfície transparente do módulo fotovoltaico. Objetivando compreender esta relação, Al-Hasan [42] conduziu um estudo teórico-prático para investigar os efeitos da deposição de sujidade na transmitância da radiação solar. Neste trabalho, canhões de areia foram utilizados juntamente com um difusor, onde as partículas de areia eram dispersadas dentro de uma caixa de madeira compensada. Dentro da caixa, foram colocadas diversas amostras de vidro cortadas em diferentes tamanhos.

O sistema foi projetado de maneira a se aproximar da mecânica da deposição de partículas em superfícies. Cada amostra foi submetida a um acúmulo diferente de sujidade, sendo posteriormente enviada para análise de transmitância via técnica de espectroscopia de absorção UV-Vis para diferentes comprimentos de onda. Os resultados obtidos podem ser observados via figura 15, onde a transmitância é medida para o intervalo entre o infravermelho próximo e o início do ultravioleta, contendo toda a região do espectro eletromagnético visível (390 - 700 nm). Observa-se que cada espectro é fornecido para uma densidade de sujidade acumulada, dada em mg.cm^{-2} .

Neste mesmo estudo, Al-Hasan ainda conclui que o efeito da luz incidente na região visível é insignificante para a transmitância, já que o tamanho das partículas da sujidade é muito maior que o comprimento de onda da radiação visível. Entretanto, foi observado que conforme a camada de sujidade se torna mais espessa, a refletância da luz incidente se torna mais pronunciada para ondas de maior comprimento quando comparada àquela para ondas de menor comprimento.

Um último estudo de importância fundamental para o desenvolvimento da área de pesquisa aqui discutida foi o publicado por Elminir et al. [31, 43], realizado entre os anos de 2004 e 2005 no Cairo, Egito. Em seu estudo, foram examinados os efeitos da deposição de sujidade, e conseqüentemente na geração de energia do sistema, a partir do ângulo de instalação dos módulos, do clima local, da densidade de sujidade depositada e das características mineralógicas das partículas.

Para a realização de seu trabalho, Elminir et al. montaram o aparato experimental ilustrado via figura 16, onde células fotovoltaicas foram instaladas detrás de amostras de vidro e posicionadas em oito diferentes orientações e sete diferentes ângulos em relação ao plano horizontal.

Duas conclusões interessantes obtidas por estes pesquisadores foram que grandes diferenças de temperatura favorecem a formação de orvalho durante a alvorada quando se tem uma alta umidade

relativa do ar, e que a densidade de sujidade acumulada na superfície dos vidros diminuía com o aumento do ângulo de instalação.

A primeira conclusão está diretamente ligada com a deposição de sujidade, visto que a formação de orvalho promove o acúmulo de partículas em superfícies planas, e que a evaporação desta água interfere construtivamente na adesão das partículas à superfície do vidro, formando compostos de estrutura semelhante ao cimento. A segunda conclusão é justificada pela atuação da força gravitacional, a partir da qual as partículas tendem a rolar e cair da superfície dos vidros instalados em maiores ângulos.

Os efeitos da deposição de sujidade na produtividade do sistema são ilustrados via figura 17, onde os gráficos mostram a perda na potência de saída das células fotovoltaicas, instaladas conforme figura 16, ao longo de vários meses. É importante salientar que os autores deste estudo reportaram que apenas os arranjos fotovoltaicos orientados na direção sul produziram resultados significativamente conclusivos para a correlação entre a densidade de sujidade acumulada e as perdas na produtividade do sistema. Esta observação é coerente com o fato de que o máximo aproveitamento do recurso solar disponível neste estudo ocorria para as células orientadas na direção sul. Para os outros arranjos, os autores indicaram que a geometria e a instalação poderiam exercer um impacto maior que a sujidade nas perdas de geração de energia.

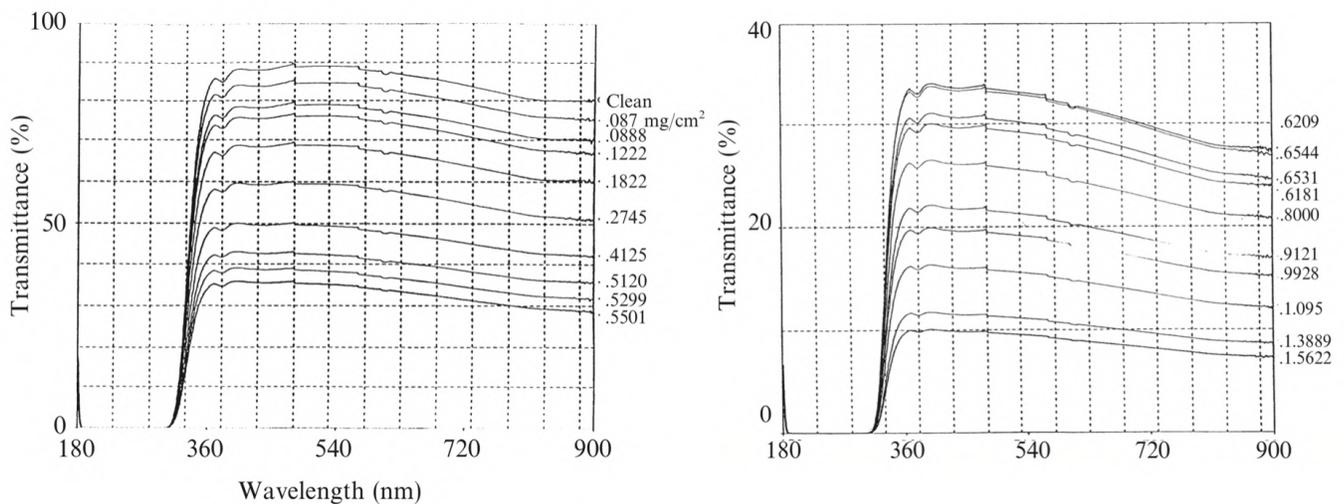


Figura 15: Transmitância da radiação em função da densidade de sujidade acumulada em lâminas de vidro [42].

2.4 Estado da Arte e Desafios

O interesse pelo tema da sujidade em sistemas fotovoltaicos apresenta crescimento constante, indicado pelo número de trabalhos publicados, desde o ano de 2010, conforme ilustrado via figura

18. Nesta figura é possível observar que as primeiras pesquisas realizadas a respeito do efeito da sujidade em coletores solares eram concentradas em sistemas solares térmicos, sendo que apenas a



Figura 16: Arranjo fotovoltaico utilizado para o estudo no Cairo [31].

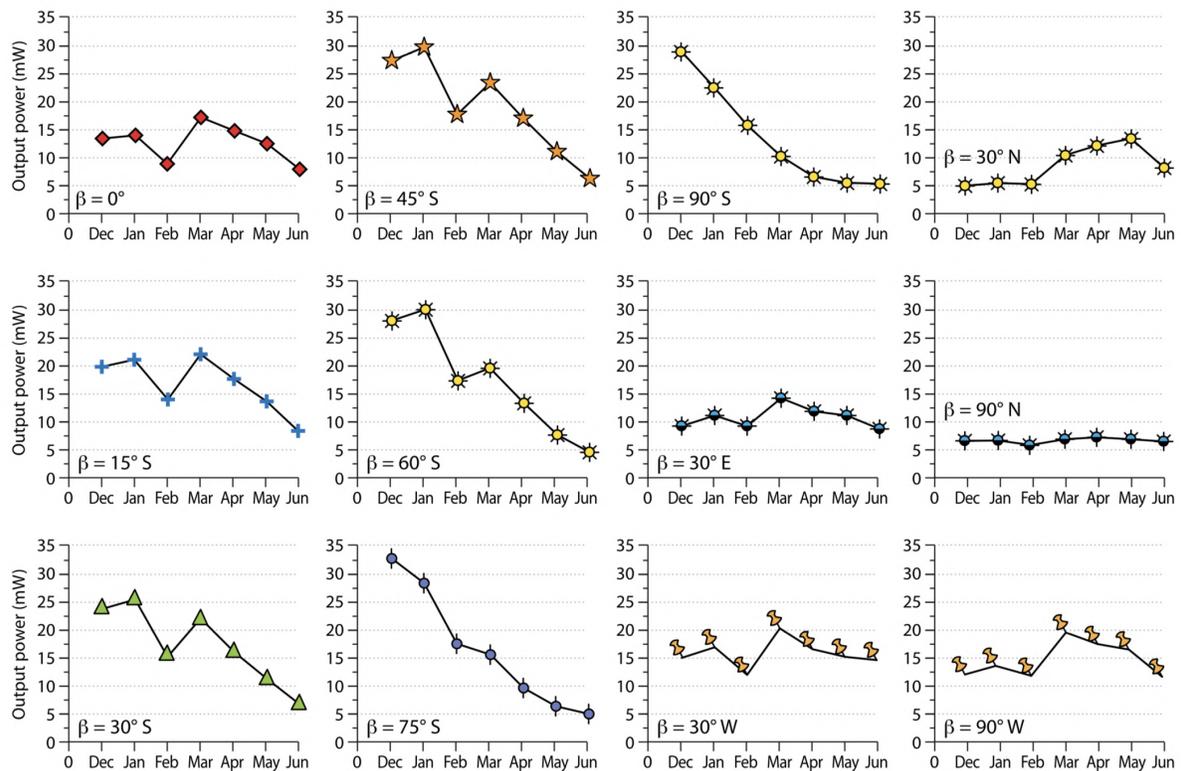


Figura 17: Perdas na potência de saída dos arranjos fotovoltaicos ao longo do tempo [31].

partir de 2008 o foco dos estudos se concentrou em sistemas fotovoltaicos. A justificativa para o crescimento do número de trabalhos dedicados primariamente a sistemas fotovoltaicos é principalmente relacionada ao crescimento do mercado de módulos fotovoltaicos e a redução dos preços, o que também pode ser visualizado via figura 18 [44].

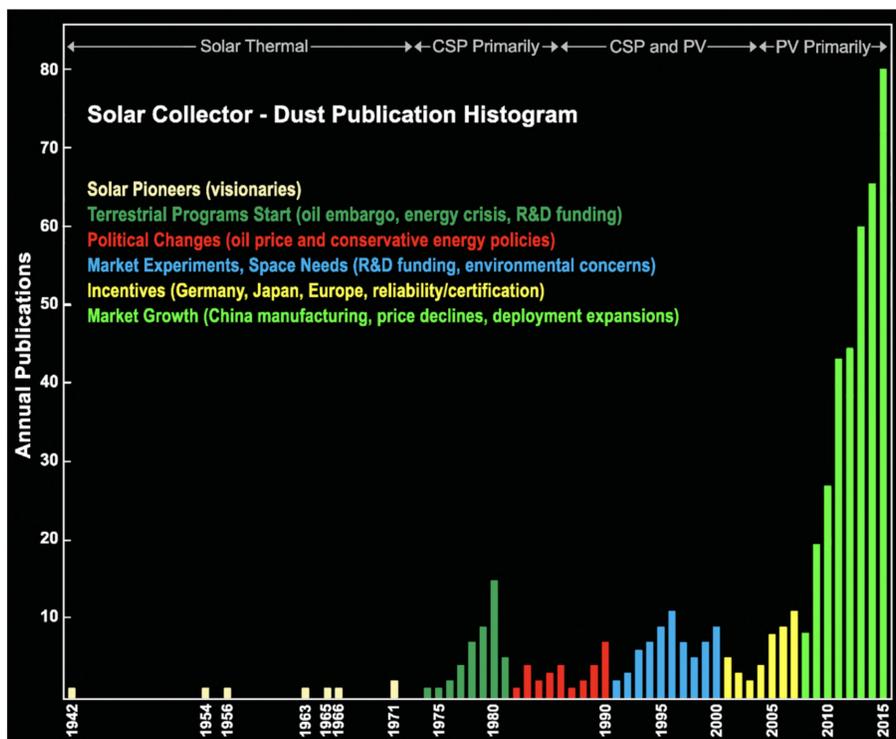


Figura 18: Ocorrência de publicações sobre sujidade em sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo [44].

Em um estudo mais recente, Costa et. al. indicam que embora até 2010 80% dos estudos relatassem apenas o monitoramento e as perdas de energia ocasionadas pelo acúmulo de sujidade, a partir de então as pesquisas adotaram um maior rigor científico, tratando diretamente do fenômeno da deposição de sujidade, buscando compreender os mecanismos por meio dos quais a deposição ocorre. Além disto, pesquisadores passaram a propor e desenvolver métodos e soluções direcionadas à prevenção e eliminação da sujidade da superfície de módulos fotovoltaicos [45].

A figura 19 traz a distribuição, por tema analisado, das pesquisas publicadas no ano de 2016 acerca dos efeitos da sujidade em sistemas fotovoltaicos. Verifica-se que os principais temas são relacionados à análise físico-química das partículas que compõem a sujidade, propostas de soluções para mitigação de efeitos e limpeza dos sistemas fotovoltaicos, modelagem e simulação das perdas a partir da deposição das partículas, e características climáticas e geográficas nas quais sistemas fotovoltaicos estão inseridos.

Diversas contribuições foram realizadas para o avanço de tecnologias voltadas para a mitigação dos efeitos da sujidade, tais como o desenvolvimento de filmes e películas, utilizadas na cobertura da superfície transparente dos módulos, dotadas de propriedades hidrofóbicas, autolimpantes e com atividade potencial para otimizar a captação da luz solar e reduzir sua refletância [46, 47, 48, 49].

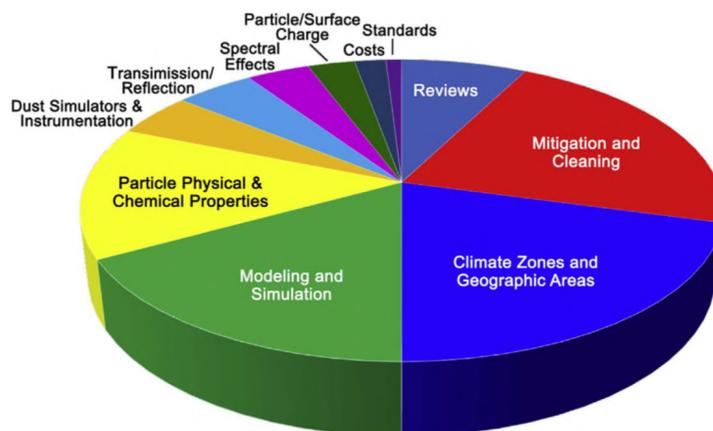


Figura 19: Distribuição dos estudos publicados em 2016 acerca dos efeitos da sujidade em sistemas fotovoltaicos [45].

Entretanto, diversos avanços ainda são necessários para que se compreenda melhor os fenômenos que controlam a deposição e a interação da sujidade com a superfície dos módulos fotovoltaicos. Entre os principais desafios a serem enfrentados pode-se destacar alguns principais:

- Uma melhor elucidação dos tipos de forças que mantêm as partículas ligadas à superfície dos módulos fotovoltaicos, bem como as interações que permitem a agregação das partículas e o aumento da densidade de sujidade depositada;
- É necessária uma melhor modelagem dos fenômenos climáticos, objetivando compreender melhor a taxa de deposição da sujidade ao longo do tempo;
- Novas abordagens tecnológicas são necessárias para realizar a limpeza dos módulos de acordo com as características regionais de seu local de instalação, principalmente para lugares cujo fornecimento de água e mão de obra sejam de difícil manejo.

2.5 Considerações finais

Neste segundo capítulo foram apresentados os estudos pioneiros sobre o efeito da sujidade em sistemas fotovoltaicos. Diversos fatores de impacto foram discutidos, como a influência da região onde o sistema está inserido, parâmetros de instalação, composição da sujidade, entre outros. Por tratar-se de um assunto que tem atraído muito interesse e gerado um grande volume de artigos científicos, os estudos mais recentes foram citados em uma menor quantidade, privilegiando-se aqueles cujo impacto foi maior e que abriram portas para novas abordagens. Para mais informações, sugere-se uma leitura preliminar do artigo de revisão publicado por Sarver et al. [31] e o acompanhamento dos trabalhos de revisão periódicos publicados por Costa et al. [44, 45].

No próximo capítulo será apresentado e discutido o sistema fotovoltaico utilizado como caso de estudo.

CAPÍTULO 3: APRESENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DA EMC/UFG

Este capítulo é dedicado à apresentação do SFV da EMC/UFG, objeto de estudo deste trabalho. São discutidas as características do sistema, bem como das condições climáticas da região em que está inserido.

3.1 Goiânia

O sistema fotovoltaico analisado neste trabalho está instalado na cidade de Goiânia, capital do estado de Goiás. Sua localização geográfica é dada pelas coordenadas -16.68° (sul) e -49.24° (oeste) [50]. Assim, é fundamental a discussão das características desta região, que influenciam diretamente o funcionamento do sistema.

A cidade de Goiânia apresenta relevo composto majoritariamente por planaltos com pequenos declives, estando situada em uma região onde a vegetação predominante é o Cerrado [51, 52]. Segundo a classificação climática Köppen-Geiger, Goiânia apresenta clima tropical com estação seca [53].

Segundo as Normais Climatológicas disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 1981-2010 [54], a precipitação acumulada e a temperatura média compensada² mensais comportam-se como ilustrado via figura 20, sendo o inverno goianiense um período seco.

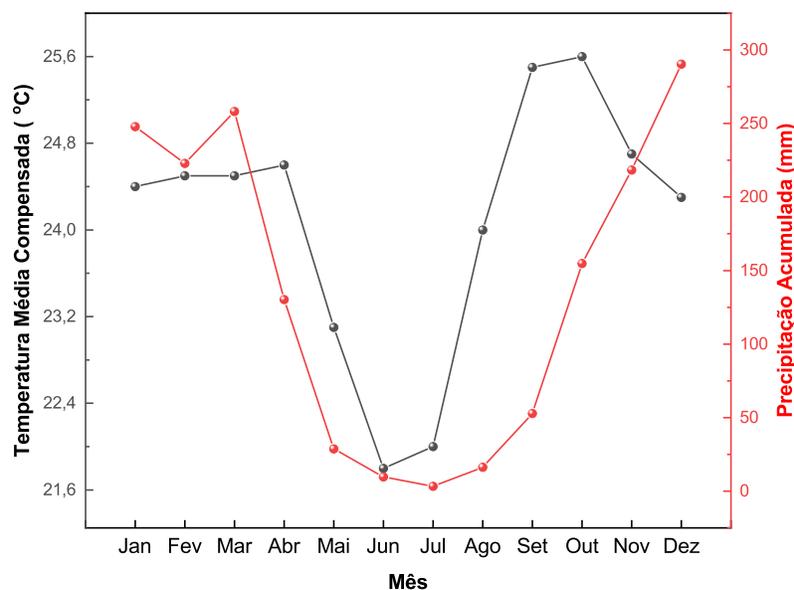


Figura 20: Temperatura e precipitação mensal para a cidade de Goiânia [54].

²A temperatura média compensada diária (T_1) é dada por $((T_9)+2(T_{21})+T_{máx}+T_{mín})/5$, onde T_9 é a temperatura do ar às 9h, T_{21} é a temperatura do ar às 21h e $T_{máx}$ e $T_{mín}$ são a temperatura máxima e mínima do ar do dia em questão, respectivamente.

A análise do comportamento da temperatura ao longo do ano é essencial para o estudo de um SFV. Muito embora o aumento da temperatura de funcionamento de uma célula fotovoltaica acarrete um ligeiro aumento da corrente de curto-circuito (0,05% - 0,07%/°C para células de silício monocristalino e 0,02% para silício amorfo [55]), tem-se que o impacto maior é a redução da tensão de circuito aberto da célula. Neste caso, a redução da tensão de saída traz como consequência uma perda de potência elétrica. Para células de silício, adota-se um valor comum igual a -2,3 mV/°C para a redução da tensão de circuito aberto relacionada ao aumento da temperatura de funcionamento [56]. Este valor é utilizado para cálculos aproximados tanto para o silício monocristalino quanto para o policristalino.

Conforme pode-se observar via figuras 21(a) e 21(b), embora o estado de Goiás não possua, a 50 metros do solo, ventos com velocidade média superior a 8 m.s^{-1} , considerados ideais para a exploração do potencial eólico de uma região, o estado possui alta média anual de irradiação solar,

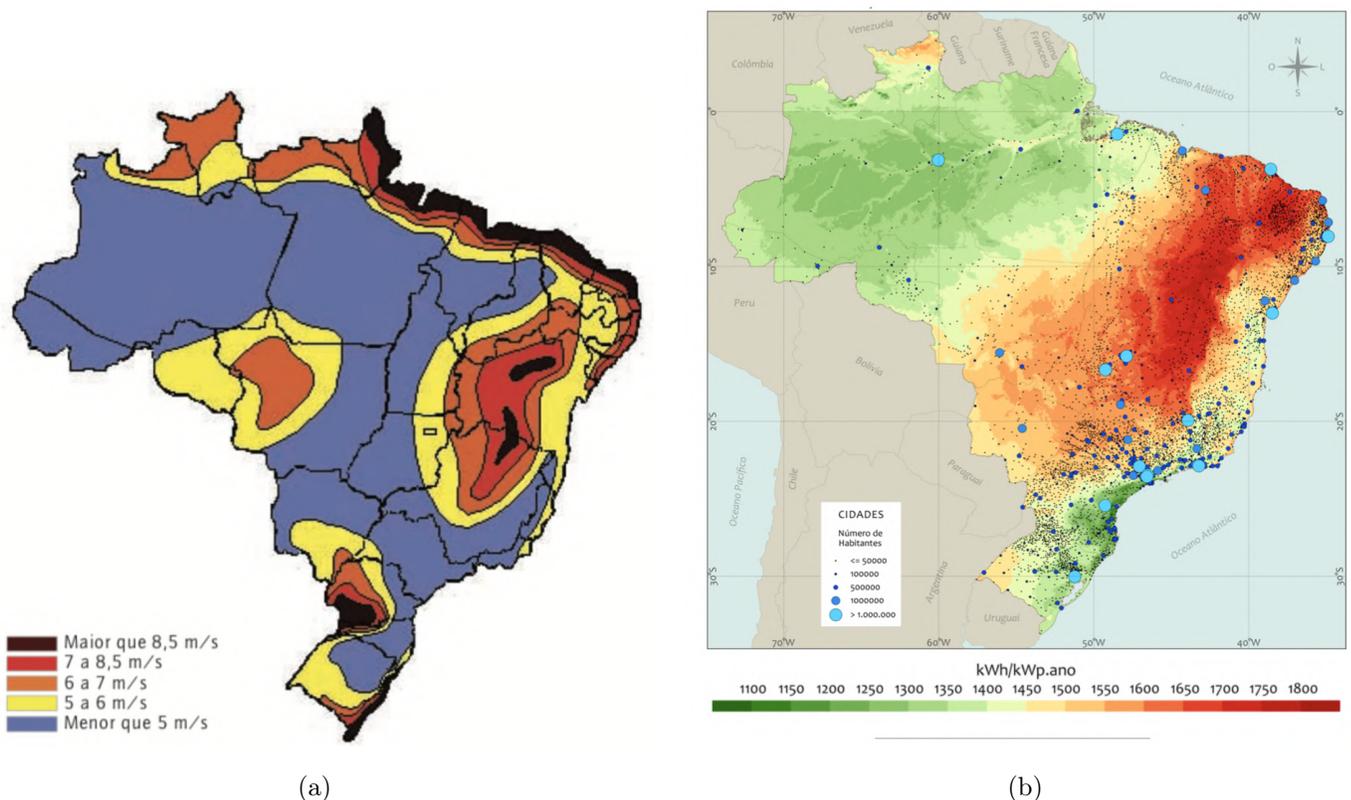


Figura 21: (a): Velocidade média anual dos ventos a 50 metros do solo [57]. (b): Potencial de Geração Solar Fotovoltaica no Brasil [58]

3.2 O Sistema Fotovoltaico da EMC/UFG

O sistema de geração fotovoltaica da EMC/UFG (SFV-EMC/UFG) foi instalado no ano de 2016, sendo monitorado continuamente desde o dia 14 de outubro do mesmo ano. O acompanhamento é realizado a partir dos inversores, por meio do sistema de monitoramento fornecido pelo fabricante

ELTEK. A grandeza de maior interesse disponibilizada como dado é a energia gerada na saída de cada inversor.

O SFV-EMC/UFG é composto por 145 módulos fotovoltaicos de silício policristalino da marca SUN EARTH®. A máxima potência de saída de cada módulo é 235 W, sendo a eficiência de conversão fotovoltaica igual a 14,4%. O Anexo A deste trabalho traz informações adicionais dos módulos fotovoltaicos e o Anexo B dos inversores.

Os 145 módulos estão instalados no telhado do bloco de aulas B da EMC/UFG. Um diagrama ilustrativo da instalação dos módulos, bem como algumas fotografias do SFV, são mostrados via Apêndice A. O Apêndice B traz um diagrama unifilar da instalação dos inversores.

Devido à queima do inversor 8 (vide Apêndices A e B), este trabalho somente irá tratar dos dados coletados a partir dos inversores 1-7.

Ainda, na mesma área onde estão instalados os módulos fotovoltaicos, encontra-se uma central meteorológica capaz de mensurar e armazenar os valores para a velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, índice pluviométrico, irradiância solar e pressão atmosférica. Uma foto desta central pode ser visualizada por meio da figura 22.



Figura 22: Estação meteorológica da EMC/UFG.

Os instrumentos que compõem a central meteorológica são:

- Piranômetro da marca Hukseflux (modelo LP02). Este piranômetro trabalha na faixa espectral compreendida entre 285 a 3000 nm, com faixa de medição igual a $0-2000 \text{ W.m}^{-2}$;

- Sensor de temperatura e umidade relativa da marca Campbell (modelo CS2). O sensor possui resolução e precisão iguais a 0,01 e $\pm 0,4$ °C para medidas de temperatura na faixa de 5-40 °C, respectivamente. A resolução e a precisão para as medidas de umidade são 0,03 e $\pm 4\%$, respectivamente;
- Pluviômetro da marca Texas Electronics (modelo TR25I). O sensor possui resolução igual a 0,2 mm e precisão de 1% para medidas de até 50 mm.h^{-1} ;
- Anemômetro da marca R M Young (modelo 03002-5). As medidas de velocidade do vento possuem precisão igual a $\pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$;
- Sensor de pressão atmosférica da marca Texas Electronics (modelo TB-2012M). Suas medidas possuem precisão de $\pm 1,3$ mBar.

A central meteorológica realiza aquisição de dados a cada 1 minuto, sendo estes dados armazenados em um data logger e subsequentemente disponibilizados ao público por meio da página <http://sites.google.com/site/sfvemcufg>.

3.3 Considerações Finais

Neste breve capítulo foram discutidas algumas características naturais da região onde o SFV da EMC/UFG está instalado, tais como clima e relevo. Esta apresentação é importante para se compreender a disponibilidade do recurso solar, bem como a origem da sujidade depositada sobre os módulos fotovoltaicos. Por último, o sistema fotovoltaico foi apresentado, destacando-se seus principais componentes e sua configuração e instalação.

O próximo capítulo é dedicado ao estudo sobre a sujidade depositada sobre os módulos do SFV da EMC/UFG, apresentando os métodos de coleta de amostra e os métodos e técnicas de análise.

CAPÍTULO 4: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DA SUJIDADE

Este capítulo tem como objetivo explorar as características físico-químicas da sujidade depositada sobre os módulos fotovoltaicos do SFV da EMC/UFG. Para isto, são apresentados os métodos de coleta e análise desta substância, bem como são discutidas as diversas caracterizações físico-químicas realizadas. Ao final, ainda são apresentadas as análises microbiológicas realizadas com amostras da sujidade.

4.1 Análises preliminares

Como apresentado no capítulo 2 deste trabalho, a presença da sujidade em sistemas fotovoltaicos acarreta diversas consequências, desde a perda da potência de saída até o mau funcionamento do SFV, chegando a danos irreparáveis em casos extremos. A partir destas observações, compreende-se a considerável importância de se analisar a sujidade presente em um SFV, objetivando-se caracterizá-la e, a partir disto, propor mecanismos de limpeza e manutenção para prevenir o funcionamento do SFV sob condições de baixa eficiência e evitar possíveis prejuízos.

O SFV da EMC/UFG foi instalado no ano de 2016, sendo que desta data até a primeira intervenção deste trabalho os módulos fotovoltaicos não haviam sido submetidos a qualquer processo de limpeza, com a exceção de chuvas. A figura 23 ilustra algumas marcações (indicadas pelas setas em vermelho) realizadas em dois módulos fotovoltaicos instalados na água sul do telhado. Estas marcações esporádicas serviram para visualizar o grau de poluição da superfície dos módulos.

Partindo desta análise qualitativa da camada de sujidade, realizou-se uma coleta preliminar do material depositado. Esta coleta foi planejada a partir da verificação de sujidades com características distintas espalhadas por todos os módulos do SFV. Desta forma, coletou-se localmente estas amostras, que foram rotuladas de acordo com sua característica dominante, conforme o quadro exposto pela figura 24.

A coleta do material foi realizada por meio de raspagem com o auxílio de *swabs* de algodão (bastonetes de algodão). Uma vez coletadas, as amostras foram isoladas em embalagens plásticas e encaminhadas para análise junto ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), localizado na UFG. Para a investigação, as amostras foram fixadas em fita adesiva de carbono sobre porta amostras de alumínio e recobertas com carbono, como material condutor. Foram realizadas análises morfológicas e composicional.

As análises morfológicas foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Jeol, modelo JSM-IT300, em baixo vácuo no modo detecção de elétrons retroespalhados (BED-C). A inspeção composicional foi realizada pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), com um detector de raios-X Oxford Instruments X-MaxN.

Os resultados das análises morfológicas são apresentados em microfotografias, sendo que a análise da composição química é mostrada via espectro EDS. As figuras 25(a) e 25(b) mostram os resultados obtidos para a amostra 1. Destaca-se que as fibras, de algodão, que podem ser visualizadas nas microfotografias são oriundas dos bastonetes utilizados na coleta da sujidade.



Figura 23: Poluição da superfície dos módulos do SFV da EMC/UFG.

Amostra	Característica Dominante
1	Sujidade de coloração branca e com ausência de relevo
2	Sujidade de coloração escura e com ausência de relevo
3	Sujidade uniforme, sem relevo e presente em todos os módulos
4	Sujidade macia e com presença de relevo
5	Sujidade dura e sedimentada, com presença de relevo

Figura 24: Características dominantes das amostras coletadas.

Observa-se que a sujidade representada pela amostra 1 se apresenta aglomerada, dificultando a estimativa do tamanho das partículas que a compõem. Uma possível explicação para a aglomeração apresentada é dada por Cabanillas e Munguía [59], onde os pesquisadores mostram que materiais orgânicos de origem urbana e da agricultura agem como substâncias "colantes", mantendo as partículas da sujidade unidas.

Por meio do espectro EDS é possível analisar a composição química da amostra. A alta concentração de silício, alumínio e magnésio traz indícios da presença de minerais como quartzo e

caulinita. O estudo desenvolvido por Costa et al. [60] no estado de Minas Gerais traz resultados semelhantes aos observados para o sistema aqui estudado.

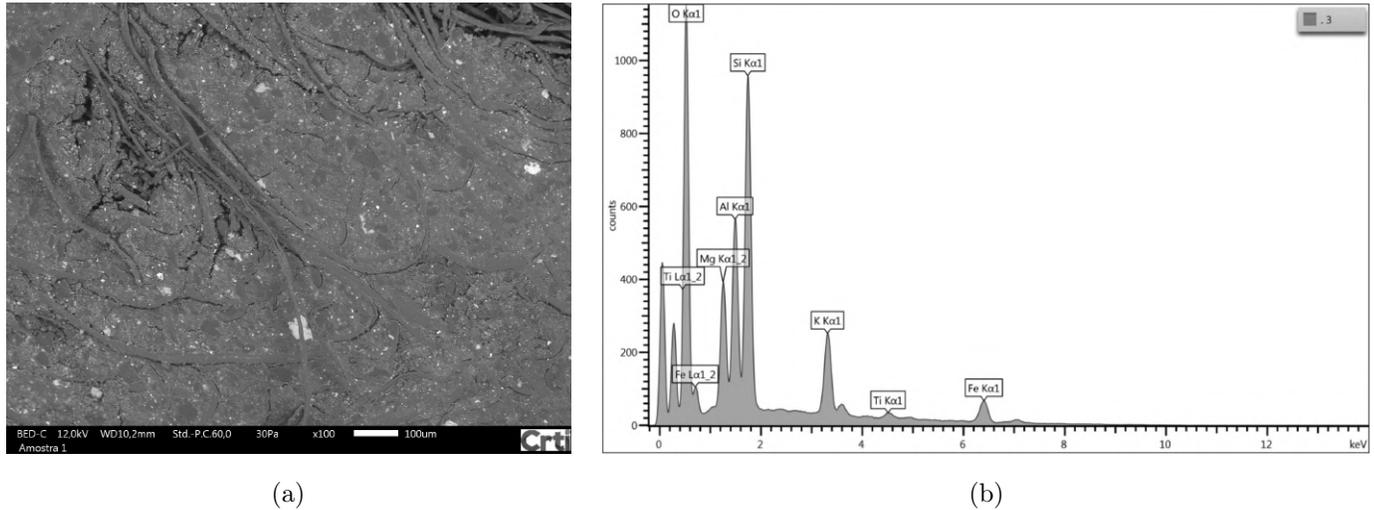


Figura 25: (a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 1, respectivamente.

As figuras 26(a) e 26(b) mostram os resultados obtidos para a amostra 2. Diferentemente da amostra 1, a sujidade representada pela amostra 2 se mostra distribuída, de modo que é possível observar que o tamanho médio das partículas é menor que $10\ \mu\text{m}$. Partículas muito pequenas apresentam grande dificuldade em sua remoção. Como mostrado por Cuddihy [61, 62, 63], para partículas menores que $10\ \mu\text{m}$, as forças de atração destas aumentam com a diminuição de seus tamanhos, fazendo com que ventos de até $150\ \text{m/s}$ sejam ineficazes em sua remoção. Appels et al. [64] mostrou que partículas com diâmetro menor que $10\ \mu\text{m}$ não foram removidas na presença de chuva.

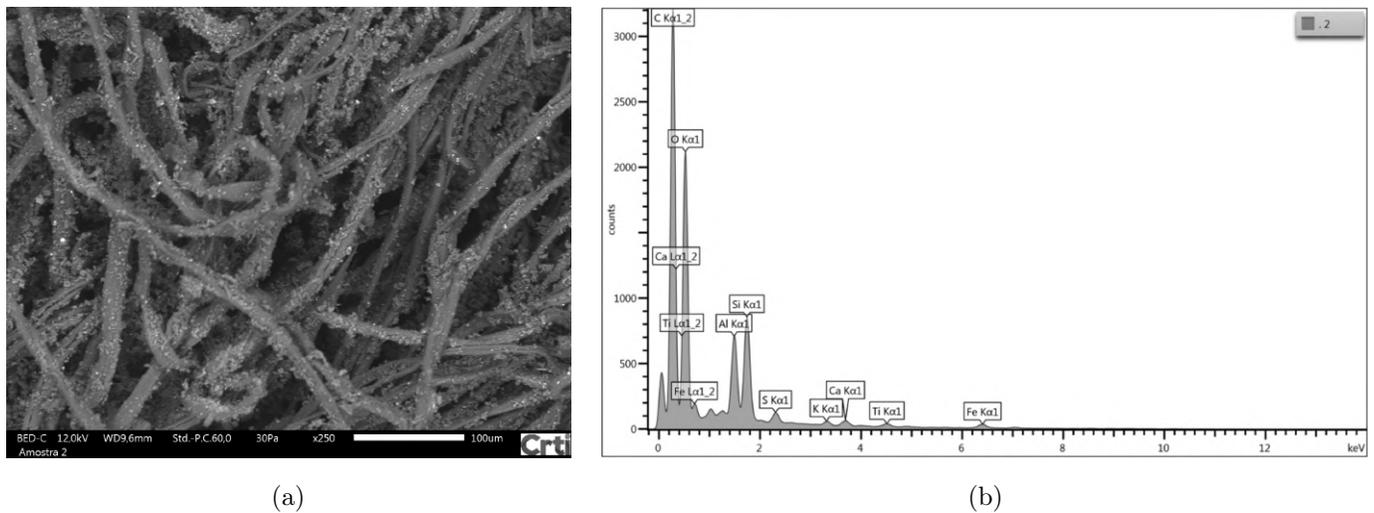


Figura 26: (a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 2, respectivamente.

As figuras 27(a) e 27(b) mostram os resultados obtidos para a amostra 3. Esta amostra se assemelha muito à amostra 2, tanto morfológicamente quanto em sua composição química. As

altas concentrações de cálcio, carbono e oxigênio encontradas são indícios da presença de carbonato de cálcio (calcita). A calcita foi identificada no estudo de sujidade realizado por Costa et al. [60].

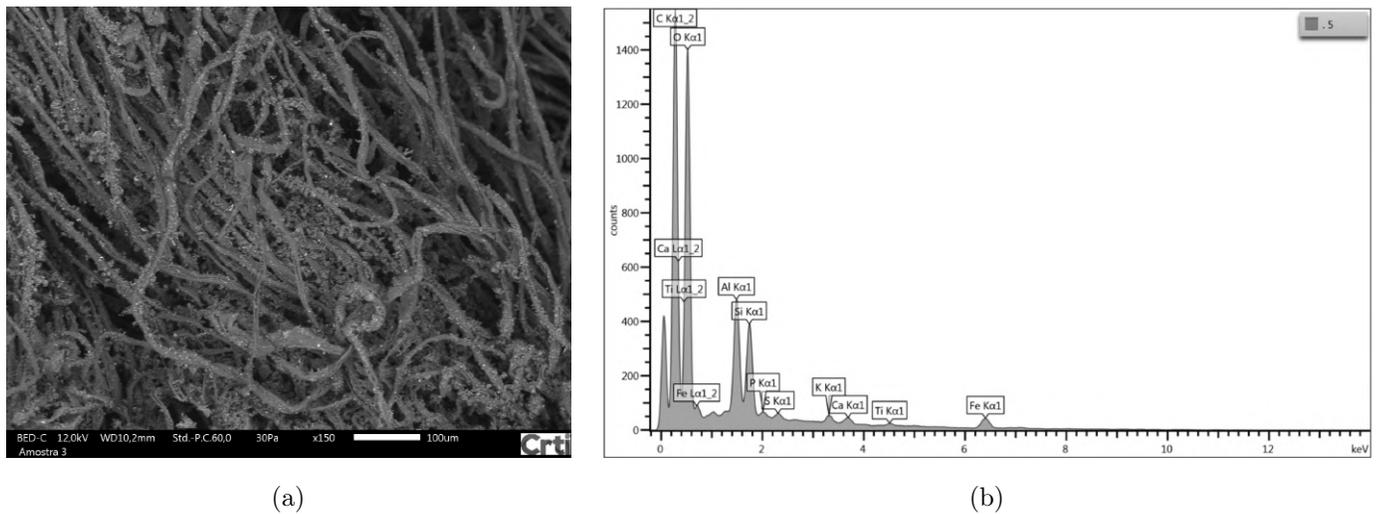


Figura 27: (a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 3, respectivamente.

As figuras 28(a) e 28(b) mostram os resultados obtidos para a amostra 4. O espectro EDS desta amostra apresenta importante concentração de enxofre e oxigênio, indícios da presença de ânions sulfato e/ou óxido de enxofre, produzidos a partir da queima de combustíveis fósseis. Dincer [65] mostra que o enxofre liberado na queima deste tipo de combustível pode se depositar a seco nos módulos, na forma de dióxido de enxofre, ou por via úmida, onde o dióxido de enxofre se oxida formando ácido sulfúrico e, em seguida, se dissocia e é depositado sobre a superfície como o íon sulfato. Embora a amostra 4 não apresentasse as mesmas características físicas da amostra 5, é possível que dejetos de pássaros façam parte da composição da primeira, conforme discutido no próximo parágrafo.

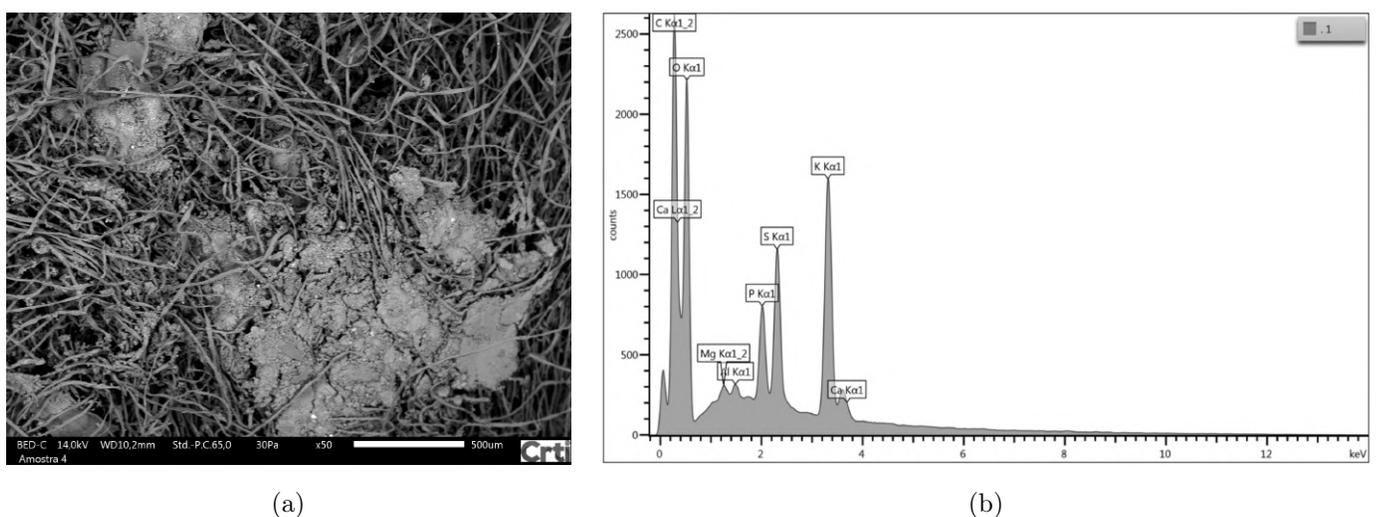


Figura 28: (a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 4, respectivamente.

As figuras 29(a) e 29(b) mostram os resultados obtidos para a amostra 5. Diferentemente das

outras quatro amostras, a coleta da amostra 5 não foi feita a partir de bastonete de algodão, mas sim retirando-se uma porção do material sedimentado sobre o módulo por raspagem. Como pode ser observado a partir da Fig. 29(a), esta amostra apresenta grãos muito maiores que os observados nas Fig. 25(a)-28(a). Inicialmente, suspeitou-se que a sujidade representada por esta amostra seria originária de dejetos de pássaros. Esta suspeita vai ao encontro do espectro EDS, o qual apresenta altas concentrações de carbono, oxigênio, enxofre e nitrogênio. Ainda, o resultado pode ser comparado aos obtidos pelo estudo apresentado por Fujita e Koike [66], onde os autores identificam altas concentrações de carbono, nitrogênio e fósforo nos dejetos de pássaros.

Hammond et al. [67] mostra em seu estudo que o impacto de dejetos de pássaros sobre módulos fotovoltaicos é muito maior que o causado pela deposição de poeira e sujeira comum. Maghami et al. [68] mostra que a deposição destes dejetos sobre os módulos pode provocar danos severos ao dispositivo, visto que a presença deste tipo de sujidade acarreta facilmente o aparecimento de *hot spots*, diminuindo a produção do sistema e podendo até mesmo causar danos irreversíveis. Além disto, os dejetos de pássaros são ricos em ácido úrico, substância capaz de danificar o vidro dos módulos fotovoltaicos.

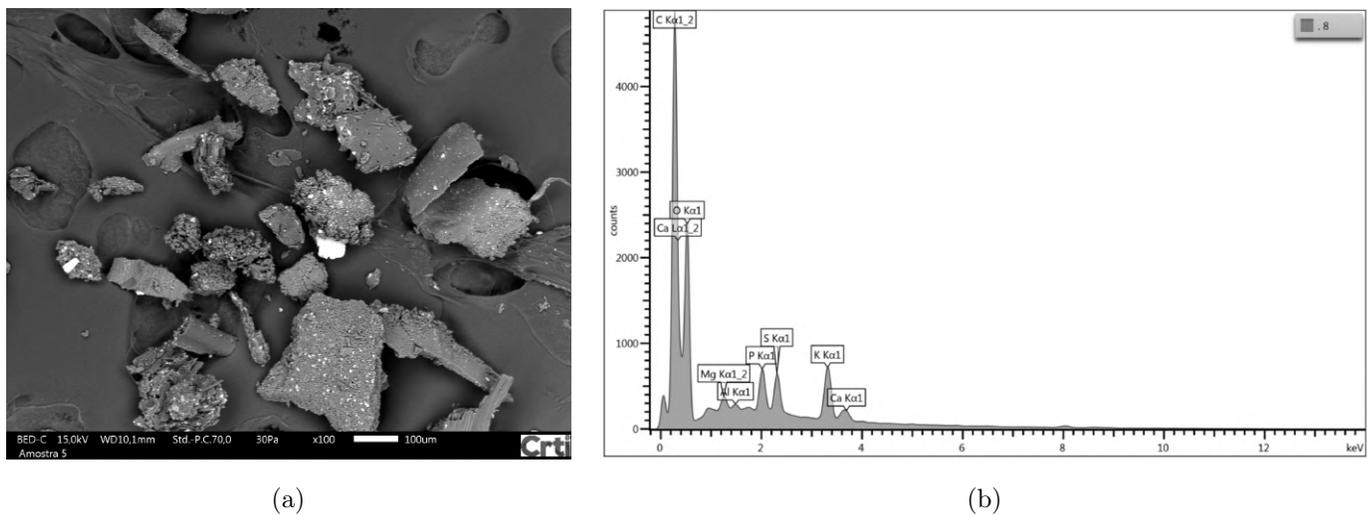


Figura 29: (a) e (b): microfotografia e espectro de EDS da amostra 5, respectivamente.

4.2 Caracterização físico-química da sujidade

Uma vez realizado o estudo preliminar com amostras da sujidade depositada sobre os módulos do SFV da EMC/UFG, executou-se análises físico-químicas complementares com o intuito de se caracterizar de forma mais ampla a sujidade. Para este estudo, amostras do material depositado na superfície dos módulos foram retiradas por meio de raspagem com o auxílio de uma espátula de plástico. O material coletado, em forma de pó fino, foi armazenado em um frasco plástico e encaminhado para o CRTI, onde as análises de difração de raios-X, termogravimetria e análise térmica diferencial, espectroscopia de infravermelho e espectrometria de emissão óptica com plasma

indutivamente acoplado foram realizadas.

4.2.1 Caracterização via DRX

Para a execução da análise de difração de raios-x, a amostra foi pulverizada em almofariz de ágata, com o objetivo de se obter homogeneidade e uma menor granulometria. Em seguida, a amostra foi posicionada em um porta amostras do tipo *backload* e levada ao equipamento para a realização da medida.

A medida de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro Bruker D8 Discover. Utilizou-se radiação monocromática de um tubo com ânodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$ operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano θ - 2θ e detector unidimensional Lynxeye®. O intervalo 2θ de medida adotado foi de 5° a 80° , com passo de $0,05^\circ.s^{-1}$. A amostra foi mantida em rotação de 15 rpm.

Para realizar a quantificação do material de baixa cristalinidade, ou amorfo, foi preparada uma mistura homogênea na proporção de 10% de Al_2O_3 (padrão interno) e 90% de amostra. Em seguida, a mistura foi posicionada em porta amostras do tipo *backload* e levada ao equipamento para a coleta do difratograma.

Para a identificação e quantificação das fases cristalinas e para a quantificação da fase amorfa, executou-se o método de refinamento de Rietveld, conforme pode ser verificado no Anexo C, com o auxílio do *software* Topas 4.2. O parâmetro de qualidade de ajuste (GOF) do refinamento foi igual a 1,88.

O resultado da análise de difração de raios-X pode ser conferido pelo difratograma ilustrado via figura 30, com a proporção modal da mineralogia exibida na tabela 2. Fases minerais minoritárias presentes em concentrações da ordem de 0,5%, ou menores, estão abaixo do limite de quantificação (LQ) da técnica utilizada. Não é possível identificar a fase amorfa por esta técnica, podendo tratar-se de material orgânico, vidro ou material amorfo.

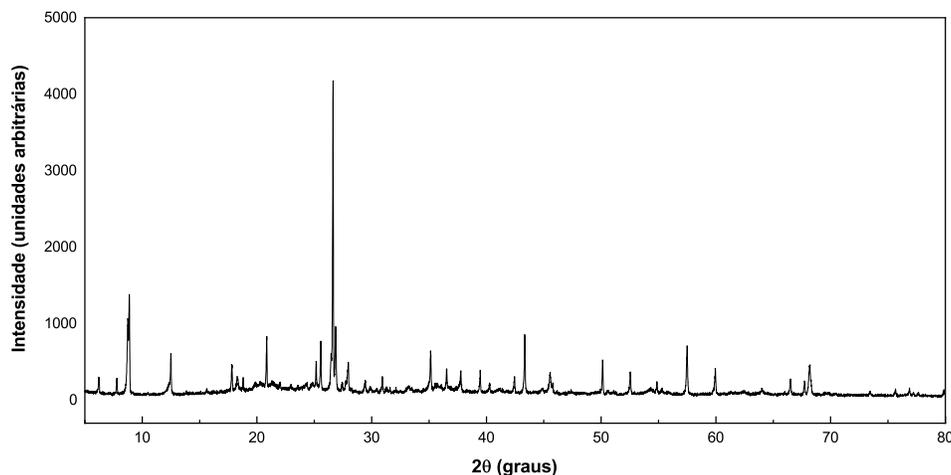


Figura 30: Difratograma da amostra de sujidade.

Tabela 2: Composição quantitativa da sujidade via método de refinamento de Rietveld.

Mineral	Teor (%)
Gibbsita	10,33
Ilmenita	1,37
Goethita	<LQ
Hematita	1,59
Magnetita	<LQ
Ortoclásio	1,76
Anatásio	<LQ
Rutilo	<LQ
Muscovita	2,66
Clorita Clinocloro	2,02
Caulinita	10,81
Biotita	1,21
Quartzo	21,38
Oligoclásio	4,81
Calcita	0,65
Dolomita	0,82
Apatita	<LQ
Material de baixa cristalinidade	39,88

A figura 31 exibe o difratograma com o método de refinamento de Rietveld, onde a curva em preto, sobreposta à curva em vermelho, representa o difratograma medido, a curva em vermelho representa o difratograma calculado a partir do modelo teórico, e a curva em cinza, abaixo das curvas vermelha e preta, representa a diferença entre os difratogramas calculado e medido.

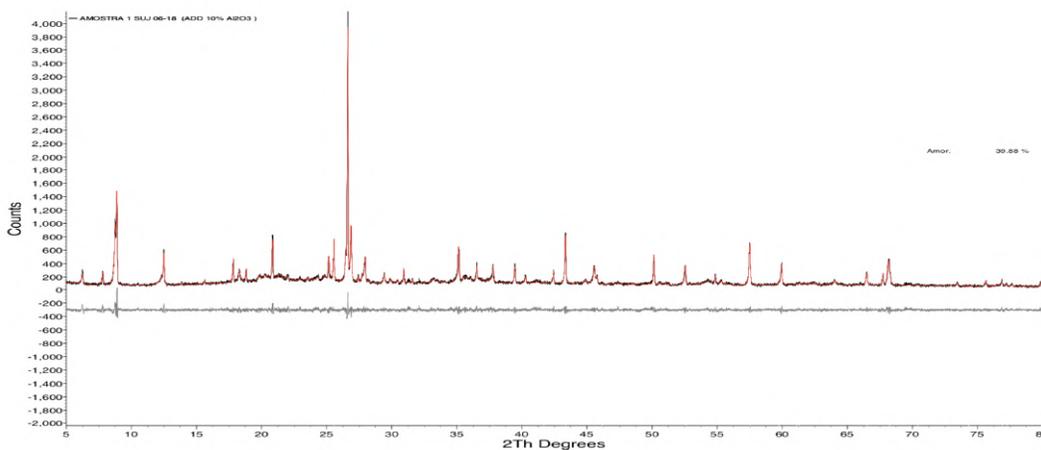


Figura 31: Difratograma da amostra de sujidade com refinamento de Rietveld.

Conforme pode-se observar via figura 31, o refinamento executado apresenta qualidade satisfatória, já que a diferença entre o difratograma calculado e o medido é pequena. Além disso, o parâmetro GOF apresenta um valor adequado para que se possa considerar a identificação e a quantificação de fases válidas [69].

Os minerais identificados pelo refinamento de Rietveld são compatíveis com aqueles encontrados no Estado de Goiás e na cidade de Goiânia, visto que os solos destas regiões são ricos em quartzitos, caulinitas e óxidos de ferro [70]. Como pontuado por Ghazi [28], as superfícies de módulos fotovoltaicos são submetidas às ações dos ventos e das chuvas, sendo que a sujidade se deposita pela evaporação de líquidos (chuvas, neblinas e orvalho) e pela dinâmica dos ventos, onde sólidos orgânicos e inorgânicos são transportados pelas correntes de ar e se assentam nas superfícies dos módulos.

4.2.2 Caracterização via ICP-OES

Para a execução da análise de espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), a amostra foi inicialmente seca em estufa a 105°C por 12 horas. Para determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI), as amostras foram calcinadas a 1000°C por 5 horas. Em seguida, uma alíquota de 100 mg de amostra calcinada foi fundida com 900 mg de tetraborato de lítio. A pérola resultante desta fusão foi macerada em almofariz de ágata até se obter um pó fino. O pó resultante foi dissolvido em solução de HNO_3 5%. Subsequentemente, a solução resultante foi diluída de modo a se obter um teor de sólidos dissolvidos de 1% para a análise.

A técnica de ICP-OES foi utilizada para se determinar as concentrações dos principais elementos encontrados pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva, discutida na seção 4.1 deste trabalho. As medidas foram realizadas em um espectrômetro modelo PerkinElmer Optima 8300. A análise foi conduzida empregando-se uma potência de indução do plasma de 1500 W com fluxo de argônio de 15 $L.min^{-1}$, utilizando visualização axial. Para realizar a calibração, utilizou-se 11 diferentes padrões de rocha certificados, os quais foram preparados e solubilizados nas mesmas condições empregadas na abertura da amostra. A curva de calibração foi ajustada para cada elemento de modo a se obter um coeficiente de correlação não menor que 0,999.

Os resultados da análise podem ser conferidos via tabela 3, onde a partir das curvas de calibração obtidas para cada óxido padrão foi possível avaliar o teor de cada elemento de interesse na amostra calcinada a 1000°C. Nesta tabela, pode-se verificar que a perda na ignição foi de 49,93%, ou seja, durante a calcinação da amostra esta parcela foi perdida na forma de produtos gasosos, restando apenas os óxidos analisados. Destes óxidos, verifica-se que o silício, o alumínio e o ferro compõem a maior parte da amostra.

A temperatura e a duração utilizadas na etapa de calcinação garantem que toda a matéria orgânica presente na amostra foi decomposta, bem como compostos de enxofre, carbonatos e águas não eliminadas durante a secagem em estufa [71]. Parte dos compostos eliminados durante

Tabela 3: Quantificação elementar via técnica de ICP-OES.

Óxidos Analisados	λ (nm)	Teor (%)
<i>SiO₂</i>	251,611	23,61
<i>TiO₂</i>	334,940	0,90
<i>Al₂O₃</i>	396,153	11,68
<i>Fe₂O₃</i>	259,939	7,52
<i>MnO</i>	257,610	0,05
<i>MgO</i>	280,271	1,26
<i>CaO</i>	317,933	2,60
<i>Na₂O</i>	589,592	0,44
<i>K₂O</i>	766,490	1,57
<i>P₂O₅</i>	213,617	0,54
LOI		49,93
Total		100,10

λ = comprimento de onda da emissão eletromagnética característica de cada elemento analisado.

a calcinação da amostra são equivalentes às substâncias de baixa cristalinidade identificadas pelo refinamento de Rietveld, que é o caso da matéria orgânica.

4.2.3 Caracterização via DTA-TG

Com o objetivo de se explorar a etapa de calcinação da amostra de sujidade, realizou-se uma análise térmica diferencial e termogravimétrica (DTA-TG). Para o estudo, 3,42 mg de amostra foram submetidos a esta técnica analítica, onde um equipamento Shimadzu DTG-60H foi utilizado. A medida foi realizada no intervalo de temperatura de 25 a 1000 °C, usando taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, fluxo de nitrogênio de 100 mL.min⁻¹ (gás de purga) e ar sintético (gás de reação) de 100 mL.min⁻¹ em cadinhos de platina de 70 μ L.

O termograma obtido é ilustrado via figura 32, onde a curva em azul representa o resultado da análise termogravimétrica, e a curva em vermelho o resultado da análise térmica diferencial. Pode-se notar uma pequena perda de massa próxima aos 100 °C, referente à eliminação de água na amostra. Em sequência, na região compreendida entre 200 e 650 °C, pode-se observar uma perda de massa próxima a 50%. Nesta mesma região, verifica-se o aparecimento de dois picos exotérmicos, um em 224 °C e outro em 321 °C.

A presença dos picos exotérmicos nas referidas temperaturas é referente à combustão das espécies orgânicas contidas na amostra de sujidade, o que pode ser confirmado pelo comportamento decrescente do sinal de DTA a partir da temperatura próxima a 400 °C.

Por fim, a perda de massa ao final da medida, na temperatura de 1000 °C, se aproxima de 50%. Este valor é compatível com a perda por ignição (49,93%) discutida na seção 4.2.2. Ou seja, a

maior parte da matéria eliminada neste intervalo de temperatura é de origem orgânica.

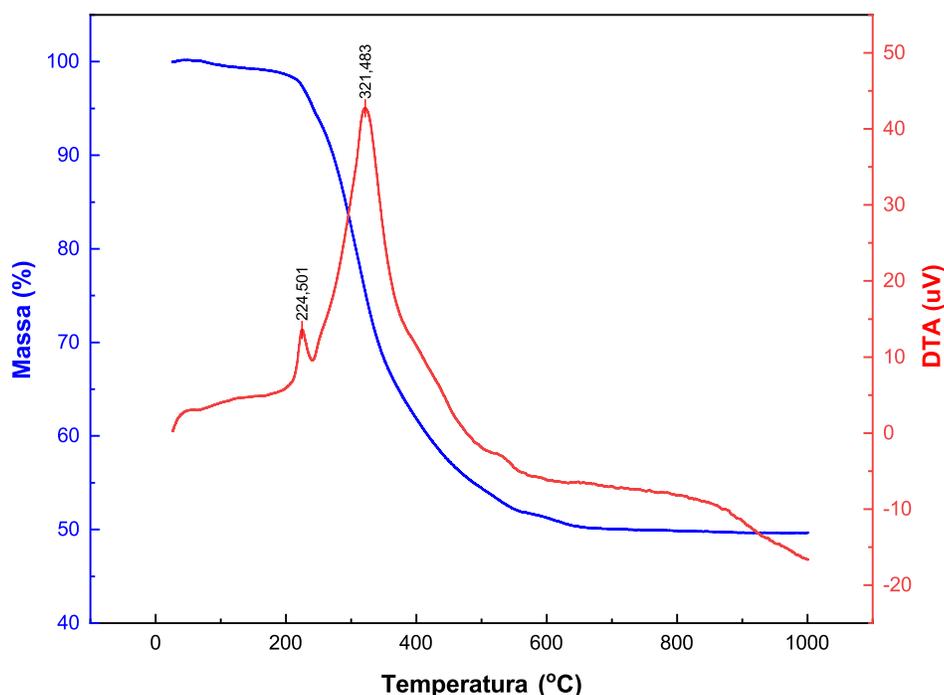


Figura 32: Termograma da amostra de sujidade.

4.2.4 Caracterização via FTIR

Com o objetivo de se explorar a matéria orgânica presente na amostra de sujidade, foi realizada uma análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de fourier (FTIR).

Para a análise, a amostra foi seca em estufa por 24 horas a 105 °C e preparada em pastilha de KBr com concentração igual a 0,5%. O espectro foi adquirido pelo espectrômetro de absorção no infravermelho Bruker Vertex 70, na faixa espectral de 400 – 4000 cm^{-1} , com uma resolução de 4 cm^{-1} , sendo o resultado a média de 64 medidas. Por meio do uso *do software* de análise de dados que acompanha o equipamento Vertex 70, foram subtraídos os sinais de dióxido de carbono e vapor d'água presentes na atmosfera.

O espectro obtido é ilustrado por meio da figura 33, onde os picos são indexados com suas respectivas frequências (número de onda). Os picos encontrados para frequências na região de 3620-3445 cm^{-1} são correspondentes aos modos de estiramento das ligações de hidrogênio do tipo O-H, região esta característica do mineral Gibbsita, ($\text{Al}(\text{OH})_3$). O mineral Caulinita, ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), possui picos característicos referentes ao estiramento das ligações O-H dos grupos hidroxilas na região de frequência de 3694-3652 cm^{-1} , onde pode-se observar um pico em 3697 cm^{-1} no espectro [72]. O pico mais intenso, localizado na frequência 1032 cm^{-1} , é possivelmente referente ao estiramento assimétrico do tipo Si-O-Si do mineral quartzo [73], cuja participação na composição da

amostra de sujidade é predominante, conforme indicado pela tabela 2. O pico de frequência igual a 2924 cm^{-1} indica a presença de carbono orgânico na amostra [74]. Os picos na região de $1641\text{--}1553\text{ cm}^{-1}$ podem ser referentes à vibração de estiramento de grupos carbonilados comumente presentes em matéria orgânica [74, 75]. O pico em 1383 cm^{-1} traz indício da presença do estiramento do tipo N-O, o que sugere a existência de nitratos na amostra de sujidade [74, 75].

A identidade dos outros picos localizados em frequências menores é inconclusiva devido ao fato da amostra de sujidade conter uma matriz com uma grande diversidade de compostos. Entretanto, especula-se que estes sejam oriundos da combinação de picos de múltiplas substâncias presentes na amostra.

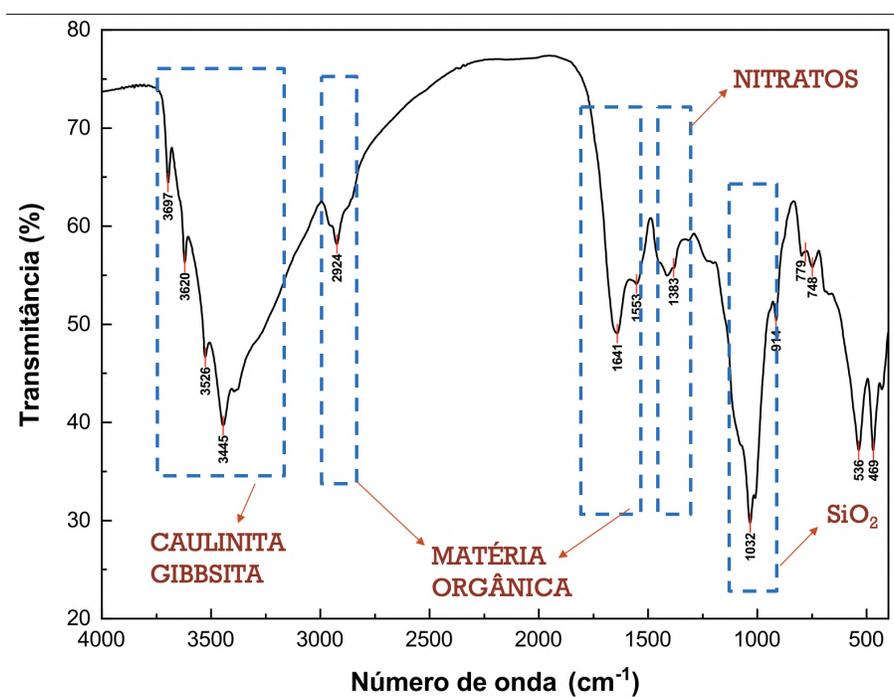


Figura 33: Espectro de FTIR.

4.3 Caracterização microbiológica

Como citado por Gorbushina [76], qualquer superfície exposta ao ar está propensa a ser coberta por biofilmes, ou colônias microbianas características de superfícies sólidas. Estas comunidades, altamente resistentes a condições climáticas extremas tais como secas severas, altas temperaturas e escassez de nutrientes, são capazes de produzir secreções ricas em polissacarídeos (comumente polissacarídeos ácidos, agentes complexantes e ácidos orgânicos). Estas secreções facilitam o processo de captura e fixação de material particulado (presente na atmosfera) em superfícies, tais como aquelas de módulos fotovoltaicas. Além disso, estas substâncias secretadas podem degradar a superfície dos módulos, reduzindo seu tempo de vida útil [77, 78].

Tabela 4: Resultados das análises microbiológicas.

Parâmetros	Resultados	Unidade	LQ	Método
Bolores e Leveduras	40*, 190**, 10***	<i>UFC/cm²</i>	1,0	SMWW 9215
Coliformes termotolerantes	Ausentes	<i>NMP/cm²</i>	1,8	SMWW 9221E
Coliformes totais	Ausentes	<i>NMP/cm²</i>	1,8	SMWW 9221C
<i>Estafilococos aureus</i>	Ausentes	<i>UFC/cm²</i>	1,0	MAPA
Mesófilos	10*, 800**, < 1***	<i>UFC/cm²</i>	1,0	MAPA

*Amostra 1; ** Amostra 2; *** Amostra 3.

Com o objetivo de identificar possíveis microorganismos, amostras da sujidade depositada sobre os módulos fotovoltaicos da EMC/UFG foram coletadas com o auxílio de bastonetes de algodão estéreis e armazenadas em meio conservante. Em seguida, o material coletado foi encaminhado para a empresa Aqualit, onde foram realizadas análises para identificação e quantificação de bolores e leveduras, coliformes termotolerantes, coliformes totais, *estafilococos aureus* e mesófilos. A escolha dos parâmetros de análise foi baseada no trabalho de Alves [79].

Para o estudo, foram coletadas três amostras de regiões distintas dos módulos fotovoltaicos. Os resultados obtidos são apresentados via tabela 4.

A presença dos microorganismos identificados vai ao encontro da matéria orgânica detectada pelas análises físico-químicas discutidas na seção 4.2 deste trabalho. Além disto, estas espécies contribuem dificultando a eliminação da sujidade acumulada na superfície dos módulos, o que será discutido no capítulo 5.

4.4 Considerações finais

Como previsto na introdução desta dissertação, este capítulo foi dedicado ao estudo da sujidade presente no SFV da EMC/UFG. A abordagem adotada foi a da caracterização físico-química e microbiológica, apresentando-se os métodos utilizados para a coleta de amostras e os métodos e técnicas instrumentais de análise utilizadas. Ao final de cada seção, pôde-se discutir a composição química e estrutural da sujidade, identificando-se seus principais componentes e relacionando-os às substâncias comumente presentes na região de estudo.

Como material de referência, os laudos técnicos emitidos a partir das análises química e microbiológica podem ser conferidos no Anexo C deste trabalho.

O próximo capítulo será destinado ao estudo dos impactos da sujidade no sistema fotovoltaico estudado, utilizando-se como abordagem principal as perdas na geração de energia elétrica resultantes da obstrução da superfície de vidro pela deposição desta substância.

CAPÍTULO 5: IMPACTOS DA SUJIDADE NO SFV DA EMC/UFG

Este capítulo tem como objetivo analisar os impactos causados pela deposição da sujidade na superfície dos módulos do SFV da EMC/UFG. Para este fim, três abordagens são utilizadas. A primeira traz um estudo sobre a perda da transmitância da luz solar através da superfície de vidro dos módulos ao longo de um ano. A segunda abordagem traz uma análise sobre os efeitos térmicos causados pela sujidade na operação dos módulos. A terceira abordagem traz o perfil de produção de energia do SFV sob os efeitos da sujidade ao longo de 6 meses. Ao final do capítulo, é apresentada uma seção dedicada a algumas sugestões de critérios de limpeza dos módulos.

5.1 Efeitos da sujidade na transmitância da radiação solar

Como introduzido no capítulo 2 deste trabalho, a sujidade em sistemas fotovoltaicos acarreta a redução da transmitância da radiação solar através da superfície transparente dos módulos. Como consequência, os dispositivos produzem uma potência de saída reduzida.

A partir de uma revisão de estudos acerca da perda da transmitância devido ao acúmulo de sujidade [42, 80, 81, 82], definiu-se um método de análise a ser aplicado no SFV da EMC/UFG.

A estratégia utilizada consistiu na fixação de 24 lâminas de microscopia da marca Perfecta na estrutura de alumínio de dois módulos fotovoltaicos, de modo que 12 lâminas foram fixadas em um módulo cuja face está direcionada ao norte e as outras 12 em um módulo direcionado ao sul. As lâminas utilizadas foram de padrão não lapidado, formato liso, tamanho $25,4 \times 76,2$ mm e 1,0-1,2 mm de espessura. A fixação foi executada com auxílio de fita dupla face. A figura 34 traz uma ilustração do arranjo experimental executado em um módulo fotovoltaico.

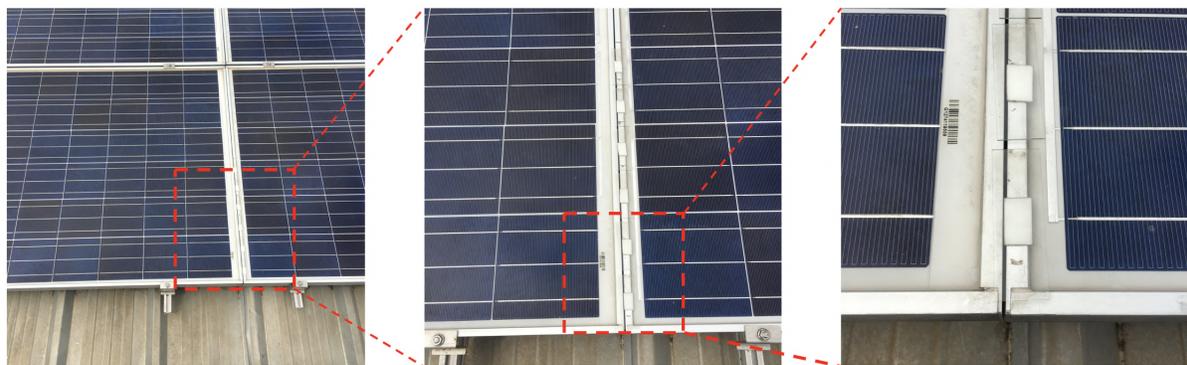


Figura 34: Arranjo utilizado na coleta mensal da sujidade.

As lâminas foram instaladas no dia 20 de julho de 2017. A cada mês decorrido, um par de lâminas foi retirado e isolado em um recipiente plástico próprio para o transporte de lâminas de microscopia, sendo uma lâmina do lado sul do telhado e a outra do lado norte. Cada par, mensalmente recolhido, foi encaminhado para o CRTI, onde foram realizadas análises de MEV, EDS e espectroscopia de absorção na região ultravioleta-visível-infravermelho-próximo (UV-VIS).

Os espectros de transmissão com incidência normal à superfície das lâminas foram adquiridos em um equipamento Perkin Elmer Lambda 1050. Os espectros foram obtidos no intervalo espectral de 250 a 1800 nm, com incremento de 1 nm, e são ilustrados via figura 35. Este intervalo espectral contempla a faixa da luz visível (380 a 740 nm).

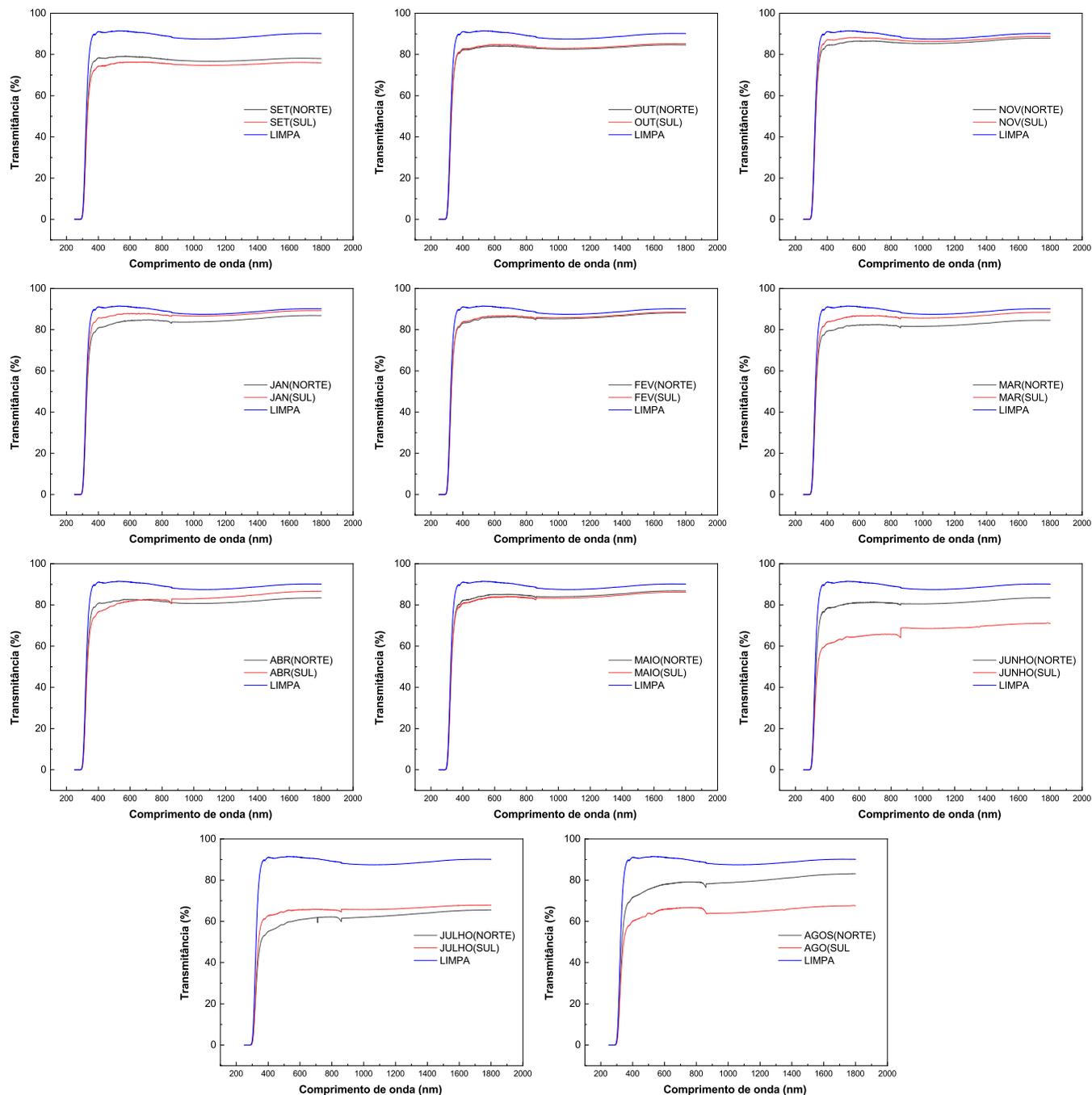


Figura 35: Espectros de transmissão UV-VIS das lâminas.

A figura 35 ilustra os espectros UV-VIS para todas as amostras coletadas, onde em cada gráfico é traçado o perfil da transmitância para a lâmina instalada na direção sul e para aquela instalada na direção norte. Ainda, para fins comparativos, em cada gráfico está incluído o perfil de transmitância

para um lâmina limpa.

As medidas referentes aos meses de agosto e dezembro de 2017 foram excluídas deste trabalho devido às lâminas do primeiro mês terem sido danificadas e aquelas do segundo não terem sido retiradas no momento ideal. Desta forma, o período de análise deixou de ser agosto de 2017 a julho de 2018 e passou a ser setembro de 2017 a novembro de 2017 e janeiro de 2018 a agosto de 2018. Na figura 35, o mês indicado é referente ao mês no qual as lâminas foram retiradas. Logo, o espectro UV-VIS de setembro de 2017 refere-se às lâminas submetidas ao acúmulo de sujeidade transcorrido da data de instalação (julho de 2017) até a data de retirada das amostras (setembro de 2017).

As imagens obtidas via MEV são disponibilizadas no Apêndice C, bem como os respectivos espectros EDS e UV-VIS. As condições de medidas de MEV e EDS foram executadas conforme aquelas discutidas na seção 4.1. Para a análise, foram consideradas as regiões mais representativas da amostra.

A partir da figura 35, pode-se constatar a não linearidade da transmitância ao longo do período de análise. Para compreender o porquê da variação da transmitância ao longo do ano e da diferença observada entre as lâminas instaladas ao norte e ao sul, a precipitação acumulada mensal e a direção dos ventos são parâmetros essenciais.

5.1.1 Impactos da precipitação atmosférica no acúmulo da sujeidade

A figura 36(a) ilustra o perfil das chuvas no ano de 2017, e a figura 36(b) das chuvas em 2018. Diferentemente da figura 20, onde a precipitação acumulada foi obtida a partir do banco de dados do INMET, a figura 36 foi construída a partir dos dados obtidos da central meteorológica do SFV da EMC/UFG³.

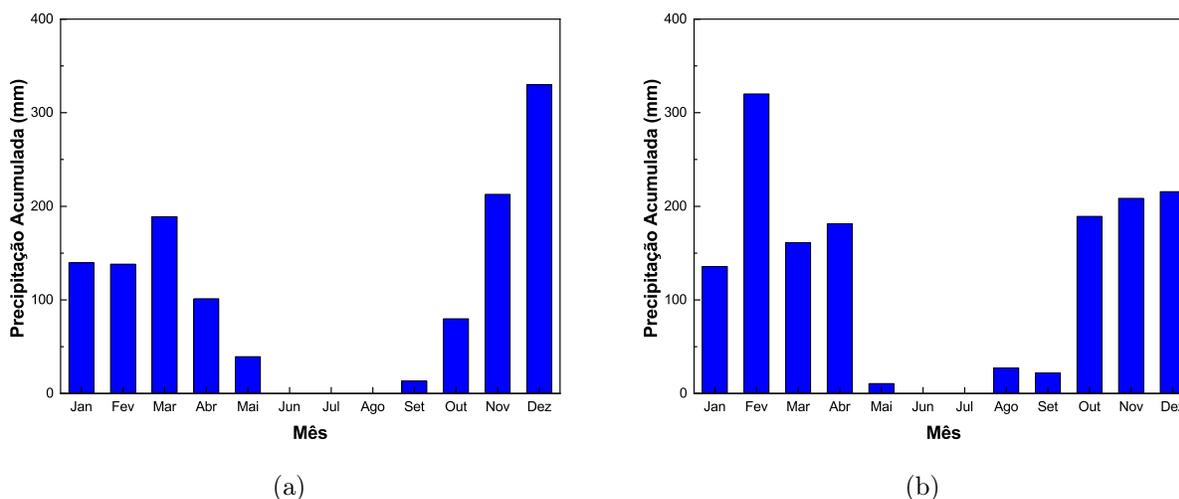


Figura 36: Precipitação acumulada. (a) Ano de 2017. (b) Ano de 2018.

³A aquisição de dados da central meteorológica ocorre com intervalos de 1 minuto, sendo os dados armazenados em um data logger.

Analisando conjuntamente as figuras 35 e 36, pode-se verificar que os meses nos quais a perda na transmitância foi menor coincidem com os meses mais chuvosos. De maneira análoga, os meses que apresentaram a maior perda na transmitância foram aqueles em que foram registradas as menores precipitações acumuladas. Especificamente nos meses de junho e julho de 2018, observa-se que houve uma completa ausência de chuvas, isto é, trata-se da estação seca. Este período do ano coincide com as maiores perdas na transmitância, indicando um grande acúmulo de sujeira na superfície das lâminas.

A relação entre as chuvas e o aumento da transmitância mostra o efeito de limpeza da precipitação atmosférica na superfície das lâminas analisadas. Este efeito pode ser confirmado por meio das micrografias obtidos via MEV, conforme pode ser observado via figura 37, onde a transmitância das lâminas instaladas na direção sul para os meses de setembro e outubro são relacionadas com suas respectivas imagens microscópicas. Como pode ser notado, as lâminas retiradas em setembro

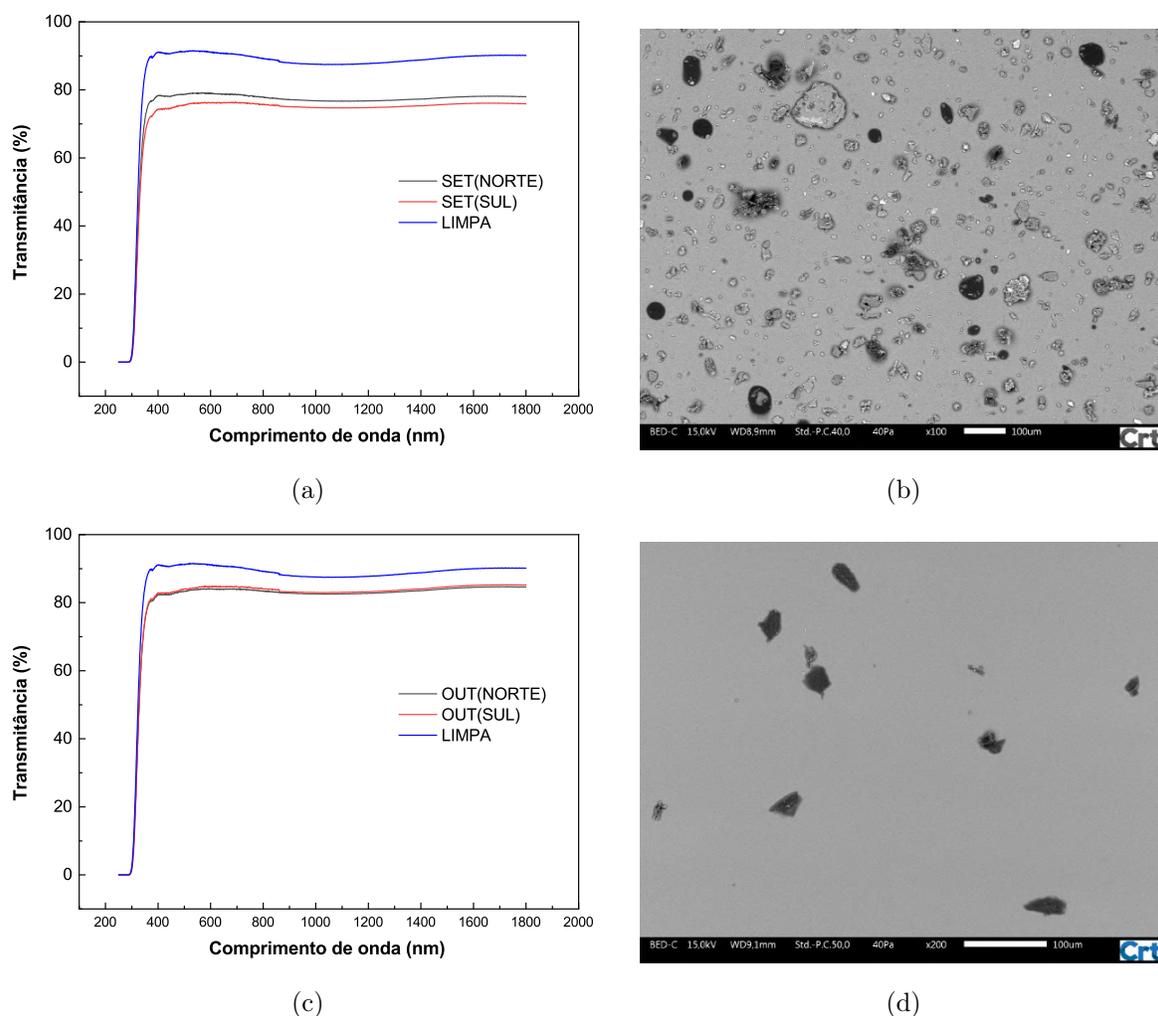


Figura 37: Efeito das chuvas na transmitância das lâminas instaladas na direção sul. (a) e (b) Espectro UV-VIS e micrografia da sujeira da lâmina retirada em setembro de 2017, respectivamente. (c) e (d) Espectro UV-VIS e micrografia da sujeira da lâmina retirada em outubro de 2017, respectivamente.

de 2017 não sofreram a ação das chuvas, visto que em agosto de 2017 não foi registrada nenhuma

precipitação atmosférica. Assim, justifica-se o fato de que a micrografia da figura 37(b) possui uma maior densidade de sujidade que aquele ilustrado pela figura 37(d). Esta observação vai novamente ao encontro da figura 36, onde registrou-se a presença de chuvas no mês de setembro. Conclui-se, então, que a ação das chuvas possui grande impacto na limpeza da superfície analisada, conforme a micrografia da figura 37(d) e o espectro da figura 37(c) mostram uma superfície mais limpa e com maior transmitância da luz para a amostra submetida à ação deste agente climático.

Embora as chuvas atuem de forma benéfica para a limpeza das superfícies analisadas, tem-se que o período chuvoso traz condições propícias para o aparecimento de microorganismos, que precisam de luz e umidade para se desenvolverem. Este fenômeno pode ser observado pela micrografia da figura 38(a), onde uma espécie de fungo foi detectada. De acordo com o estudo desenvolvido por Shirakawa [78] em um sistema fotovoltaico instalado em São Paulo, a presença de microorganismos, tais como os fungos, acarreta produção de biofilmes que possuem grande poder adsorvente sobre partículas em suspensão atmosférica. Esta aderência é especialmente forte para partículas muito pequenas (diâmetro menor que $10\ \mu\text{m}$), já que nestas condições nem mesmo chuvas torrenciais são capazes de eliminar este tipo de sujidade da superfície de módulos fotovoltaicos. Este tipo de aderência pode ser verificada pela micrografia da figura 38(b), onde novamente tem-se a detecção de fungos na lâmina e pode-se observar uma maior concentração de partículas sobre o microorganismo em contraste com a superfície lisa do vidro.

Ainda, pode-se verificar a presença de matéria orgânica em praticamente todas as amostras ao longo do ano, indicada pela grande quantidade de carbono identificada pelos espectros EDS. Além deste tipo de sujidade, verifica-se que o silício e o oxigênio estão presentes em grandes concentrações, indicando uma quantidade considerável de óxido de silício. Estas observação vão ao encontro das análises realizadas no capítulo 4, onde mostrou-se que a sujidade é majoritariamente composta por quartzo e matéria orgânica.

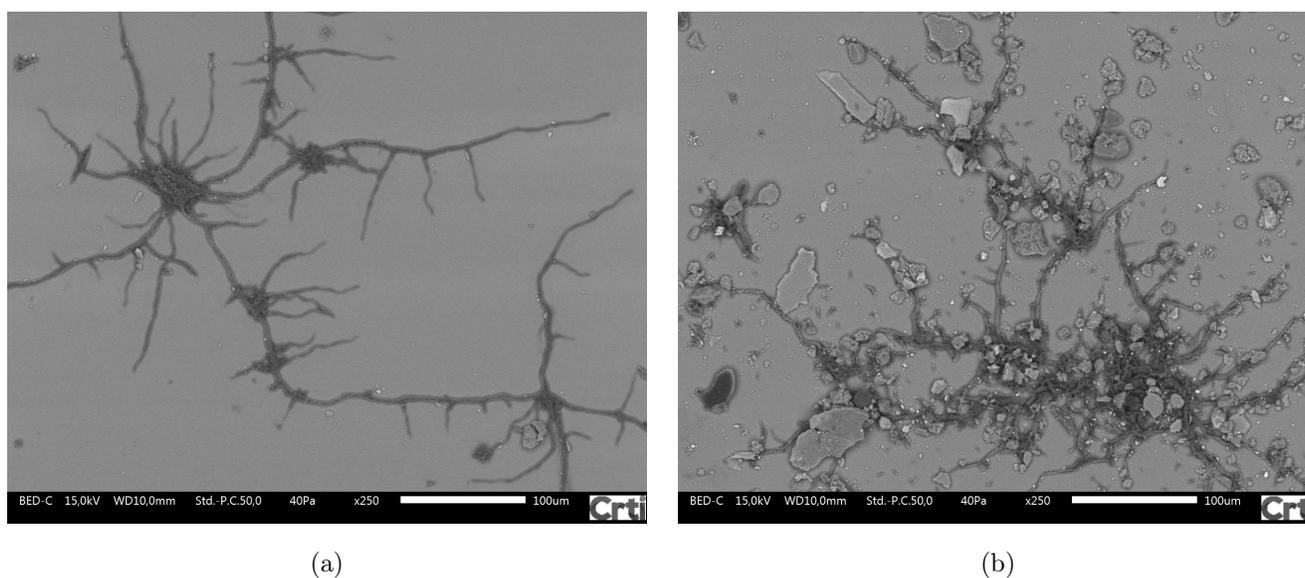


Figura 38: Impacto da presença de microorganismos na superfície da lâmina. (a) Amostra de março de 2018. (b) Amostra de abril de 2018.

5.1.2 Impactos da direção do vento no acúmulo da sujidade

Para a análise dos impactos causados pela ação dos ventos no acúmulo da sujidade na superfície das lâminas, foram obtidos os dados de velocidade e direção deste parâmetro para os meses de agosto a outubro de 2017 e dezembro de 2017 a julho de 2018, ou seja, os meses imediatamente anteriores àqueles nos quais cada par de lâminas foi retirado. Estes dados foram obtidos a partir da central meteorológica do SFV da EMC/UFG. A partir destas informações, foram construídos gráficos de rosas dos ventos para cada mês, sendo estes disponibilizados no Apêndice D.

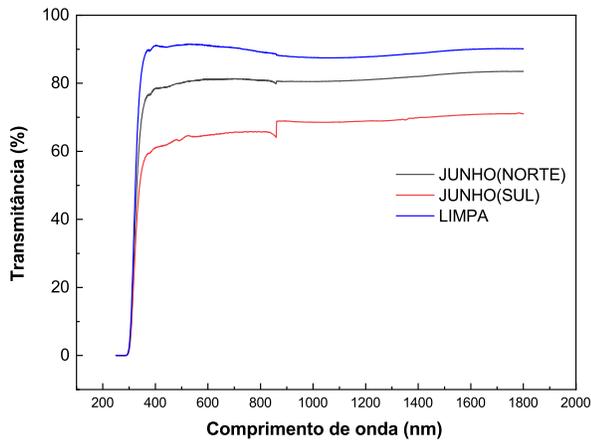
A partir dos gráficos traçados, verifica-se uma ocorrência preferencial de ventos nas direções nordeste, leste e sudeste para a estação seca, e ventos distribuídos em todas as direções durante a estação chuvosa. Pode-se relacionar a direção dos ventos com o depósito de partículas na superfície das lâminas, de modo que observa-se um efeito de deposição de sujidade pela ação deste agente. A figura 39 traz uma comparação entre os espectros UV-VIS dos pares de lâminas retirados nos meses de junho e agosto de 2018 com os gráficos de rosa dos ventos para os meses imediatamente anteriores.

A escolha destes meses em específico foi baseada na estação seca, na qual observou-se a maior diferença entre o espectro de transmitância da luz para as lâminas fixadas ao sul e para aquelas ao norte. Ainda, a estação seca é ideal para analisar os efeitos da direção dos ventos na deposição de sujidade, já que os efeitos de limpeza das chuvas estão ausentes.

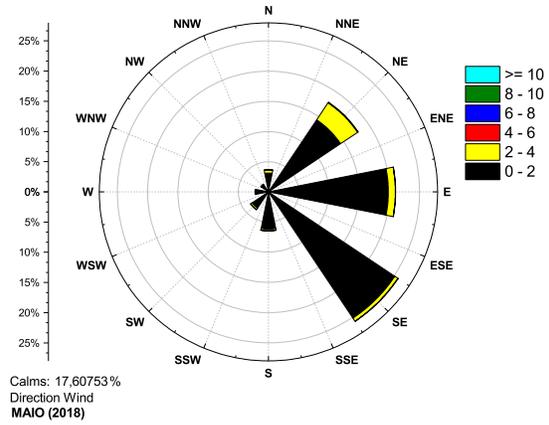
Observa-se que os ventos dos meses de maio e julho de 2018 ocorreram preferencialmente na direção sudeste, ou seja, os ventos sopraram da direção sudeste para a direção noroeste. Para as lâminas submetidas a estes ventos, e retiradas para análise no mês subsequente, observou-se uma redução significativa na transmitância da luz para as amostras instaladas ao sul. Ou seja, as lâminas fixadas nesta direção receberam maior impacto da frente da massa de ar direcionada do sudeste para o noroeste, enquanto que as lâminas instaladas ao norte sofreram menor impacto direto. O efeito resultante é que as lâminas posicionadas ao norte apresentaram uma menor perda de transmitância quando comparadas àquelas instaladas ao sul, cuja perda foi superior. Desta forma, verifica-se que a direção dos ventos acarreta efeito de poluição relevante para a superfície, corroborando as observações de Goossens et al. [40].

Associada à direção preferencial sudeste dos ventos na estação seca, tem-se a presença de uma grande concentração de árvores próximas ao lado sul do telhado, conforme ilustrado via figura 39(e). Os ventos direcionados do sudeste para o noroeste, ao atravessarem esta vegetação, transportam sujidade, como pólen e matéria orgânica, da copa das árvores diretamente para a superfície das lâminas instaladas ao sul. Visto que o lado norte do telhado não possui árvores em sua proximidade direta, tem-se que o efeito de transporte de sujidade pelos ventos é evidenciado para as lâminas com face ao sul.

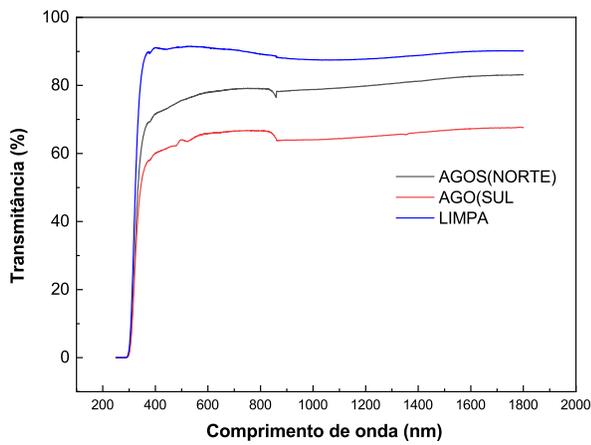
Além de informações acerca da direção, a figura 39 também ilustra a velocidade dos ventos. No entanto, este parâmetro raramente ultrapassou $4 m.s^{-1}$, atingindo valores entre 0 e $2 m.s^{-1}$ na maior parte do tempo. Verifica-se, então, que ventos, mesmo em baixas velocidades, são um fator



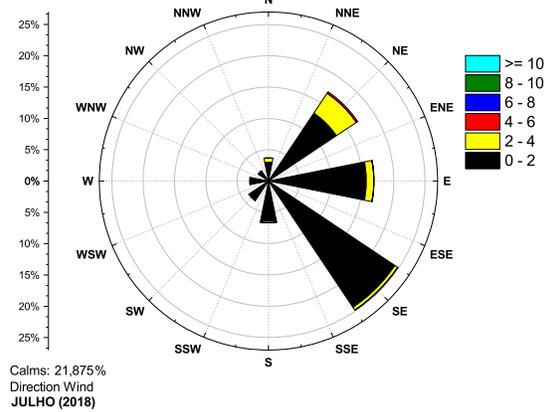
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 39: Efeito da direção dos ventos no acúmulo de sujidade na superfície das lâminas. (a) Espectro UV-VIS da amostra retirada em junho de 2018. (b) Rosa dos ventos para o mês de maio de 2018. (c) Espectro UV-VIS da amostra retirada em agosto de 2018. (d) Rosa dos ventos para o mês de julho de 2018. (e) Fotografia do SFV da EMC/UFV, destacando a presença de árvores próximas ao lado sul do telhado.

que contribui para o acúmulo de sujidade na superfície dos módulos fotovoltaicos.

5.2 Efeitos da sujidade na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos

Para a verificação dos efeitos da sujidade na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos do SFV da EMC/UFG, foi utilizada uma câmera termográfica. Dois tipos de situações foram analisadas. A primeira consistiu na análise de gradientes de temperatura ocasionados pela sujidade, e a segunda na comparação entre módulos limpos e aqueles cobertos pelo material particulado.

A figura 40 ilustra uma termografia obtida de uma região na superfície dos módulos fotovoltaicos onde detectou-se a presença de dejetos de pássaros.

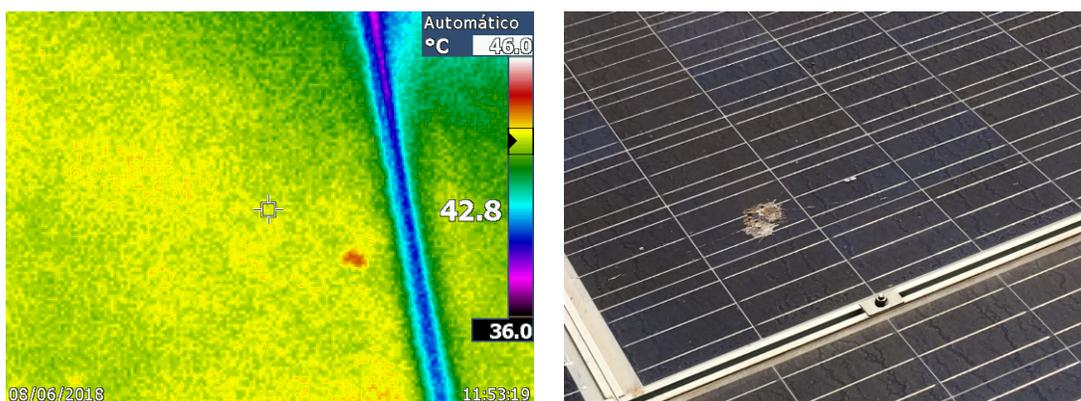


Figura 40: Impacto da sujidade na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos.

Verifica-se que, a temperatura no local coberto pelos dejetos é superior àquela das regiões vizinhas que não possuem este tipo de sujidade. Como informado por Maghami [68], dejetos de pássaros são o tipo de sujidade que possui o maior potencial para prejudicar o funcionamento de módulos fotovoltaicos, já que sua presença não é homogênea e acarreta facilmente o aparecimento de pontos de aquecimento no dispositivo.

A figura 41 ilustra a comparação entre a temperatura de módulos sujos e módulos limpos. O

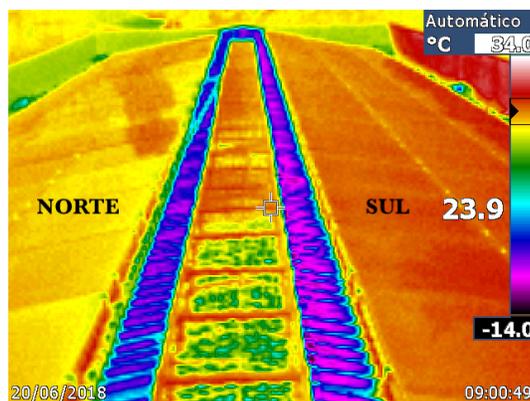


Figura 41: Comparativo entre a temperatura dos módulos limpos (esquerda) e dos módulos sujos (direita).

método de limpeza e demais considerações serão o foco de discussão da seção 5.3 deste trabalho. Nesta termografia, os módulos à esquerda são aqueles que foram submetidos a limpeza, sendo aqueles à direita os módulos cobertos pela sujidade. Observa-se que existe uma diferença de temperatura entre os dois conjuntos, sendo que aquele cuja sujidade não foi retirada apresenta uma temperatura superior àquela do conjunto limpo.

O mesmo tipo de comparação entre a temperatura de módulos limpos e sujos foi realizada pelo estudo de Rouholamini [83], onde verificou-se que os módulos cobertos por sujidade apresentam temperatura superior àquela dos dispositivos limpos. Entretanto, a partir da figura 41 pode-se verificar que a diferença de temperatura é em torno de $4^{\circ}C$ entre o conjunto limpo e o sujo.

5.3.1 Método de limpeza

Para a determinação dos impactos da presença da sujidade na geração de energia elétrica do sistema, realizou-se preliminarmente uma limpeza completa de todos os módulos do SFV da EMC/UFG. Novamente, o arranjo no qual os módulos estão dispostos é apresentado no Apêndice A. Esta limpeza foi realizada no dia 23 de junho de 2018. O método utilizado para despoluir a superfície dos módulos foi aplicado com o auxílio de uma esponja de fibra sintética, água e detergente neutro.

A primeira etapa da limpeza consistiu no enxágue da superfície dos módulos com jato d'água produzido por uma lavadora de alta pressão. Em seguida, foi adicionado à superfície o detergente neutro, o qual foi espalhado com o auxílio da esponja. Subsequentemente, os módulos foram enxaguados com água. A figura 42(a) apresenta uma fotografia obtida durante o processo de limpeza. Observa-se o grande contraste entre a superfície dos módulos despoluídos e aqueles cobertos pela sujidade.

Uma vez realizada a limpeza de todos os 145 módulos do SFV, aguardou-se o decorrer de 1 mês. Após este período, observou-se que a superfície dos módulos já havia novamente acumulado sujidade. Realizou-se, então, a limpeza, seguindo os mesmos artifícios, dos módulos conectados aos inversores 1, 2, 5 e 6. Os módulos conectados aos inversores 3 e 4 não foram limpos. O resultado desta ação é apresentado pela figura 42(b). O objetivo desta limpeza foi o de, ao longo do tempo, verificar o perfil de produção de energia dos módulos limpos quando comparados àqueles sujos. A escolha dos módulos mais próximos da cumeeira como aqueles submetidos ao acúmulo de sujidade foi baseada nos efeitos de sombreamento causados pela platibanda do edifício, já que os módulos conectados aos inversores 1 e 6 são os mais próximos desta estrutura. Com o efeito do sombreamento nos módulos, seria muito difícil estimar a parcela de contribuição da sujidade nas perdas de geração.

Os módulos conectados aos inversores 3 e 4 permaneceram sem qualquer intervenção manual de limpeza, apenas submetidos às ações do tempo. Os outros módulos, incluindo aqueles conectados aos inversores 7 e 8, continuaram a ser limpos mensalmente. O volume de água gasto, por módulo,

na limpeza foi igual a $3,11 \pm 0,51 L$, calculado a partir da média de consumo em cada limpeza.



Figura 42: Contraste entre módulos limpos e módulos sujos durante a limpeza. (a) Primeira limpeza realizada. (b) Limpeza dos módulos selecionados, apenas.

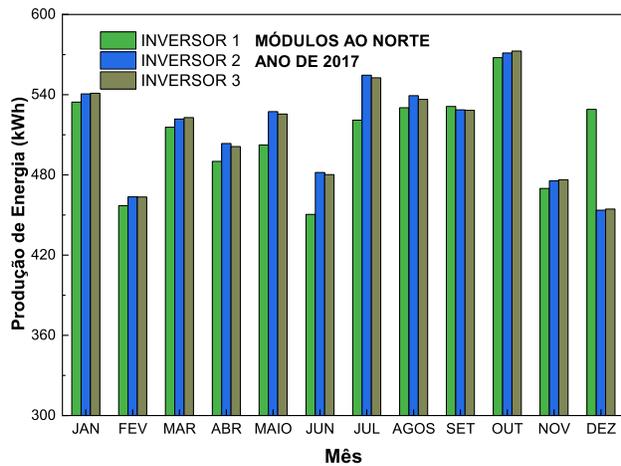
5.3.2 Análise da geração do SFV frente à limpeza dos módulos

A figura 43 ilustra a produção de energia elétrica mensal por inversor para os anos de 2017 e 2018. Pode-se verificar que todos os módulos apresentaram aumento considerável para a geração de energia após a realização da primeira limpeza. A tabela 5 traz o aumento percentual da geração de energia elétrica para o mês de julho de 2018 em relação ao mesmo mês do ano de 2017. O mês de julho é significativo, pois foi o mês de geração decorrido imediatamente após a limpeza de todos os módulos, realizada em 23 de junho de 2018.

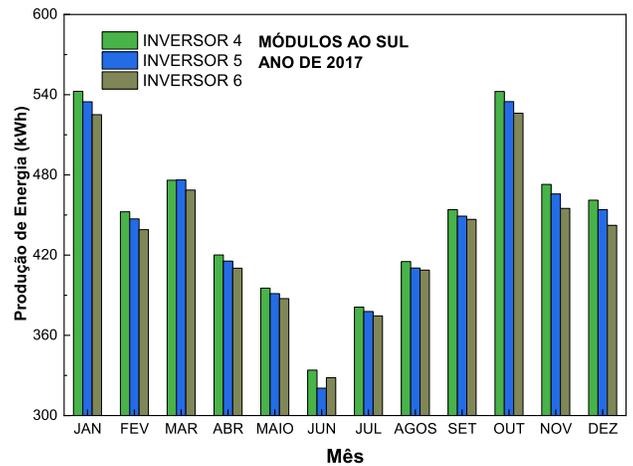
Uma observação pertinente em relação aos dados apresentados pela figura 43 refere-se à menor geração de energia durante a estação seca (maio a agosto) quando comparada à estação chuvosa, para os módulos conectados aos inversores 4-6. A estação seca na região Centro-Oeste coincide com o inverno do hemisfério sul, ou seja, período no qual a altura solar está mais baixa. Consequentemente, os módulos conectados aos inversores 4-6, que estão instalados com suas faces ao sul, recebem menos da radiação solar direta, o que resulta em uma menor geração de energia elétrica. Analogamente, para a estação chuvosa, que coincide com o verão do hemisfério sul, tem-se que a altura solar está mais alta. Consequentemente, os módulos ao sul recebem mais da radiação solar direta, resultando na pequena diferença observada para a geração de todos os seis inversores nos meses de outubro-fevereiro. Além disto, o número de horas de sol por dia é menor durante o inverno. Para uma melhor referência, no Anexo D está disponível uma carta solar para a localização geográfica do SFV da EMC/UFG, cujas coordenadas de latitude e longitude são -16.68° (sul) e -49.24° (oeste), respectivamente.

Tabela 5: Aumento percentual da geração para o mês de julho/2018 em comparação ao mesmo mês em 2017.

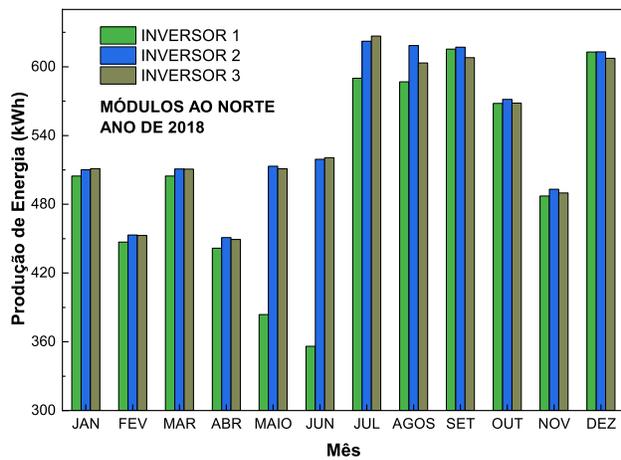
Inversor	Aumento percentual da geração (%)
1	13,25
2	12,20
3	13,44
4	19,62
5	18,61
6	20,38



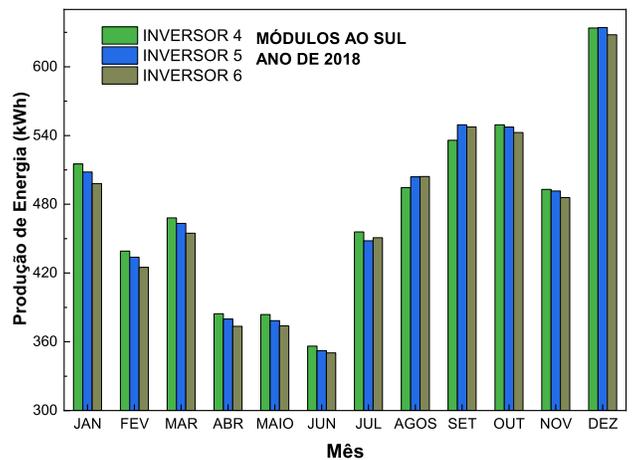
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 43: Geração de energia elétrica mensal por inversor. (a) e (b) Inversores 1-6 para o ano de 2017.(c) e (d) Inversores 1-6 para o ano de 2018.

Entretanto, comparar a geração de energia entre dois meses de anos diferentes não é a maneira mais adequada de se verificar o efeito da sujidade no sistema, visto que fatores climáticos tais como a irradiância⁴ e o índice de nebulosidade afetam a geração do sistema e são diferentes de um ano para o outro. Desta maneira, a forma mais apropriada para realizar esta comparação é por meio da figura de mérito rendimento global do sistema PR (em inglês, *production ratio*), ou também denominada taxa de desempenho.

5.3.3 Análise do desempenho global do SFV frente à limpeza dos módulos

Segundo Pinho [84], o conceito de rendimento global de um sistema (PR) traduz a relação entre o desempenho real do sistema e o desempenho teórico máximo disponível. O cálculo deste parâmetro é realizado segundo a equação 1.

$$PR = \frac{Y_F}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} G_{t,\beta}.dt}{G_{ref}}} \quad (1)$$

Onde, Y_F é a produtividade específica do sistema e é dada pela equação 2. A produtividade específica traduz a relação entre a energia entregue à carga e a potência nominal do gerador, isto é, durante quantas horas o sistema operou sob a irradiância padrão de 1000 W.m^{-2} .

$$Y_F = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{saida}.dt}{P_{FV}^0} \quad (2)$$

$G_{t,\beta}$ é a irradiância global no plano inclinado em que o gerador fotovoltaico está instalado.

G_{ref} é a irradiância padrão de referência (1000 W.m^{-2}).

P_{saida} é a potência fornecida pelo sistema fotovoltaico no instante t, em kW .

P_{FV}^0 é a potência nominal do sistema fotovoltaico em kWp sob irradiância padrão.

Os valores de rendimento global mensais do SFV da EMC/UFG foram calculados por SILVA [85] e são apresentados, por inversor, por meio das tabelas 6(a) e 6(b) para os anos de 2017 e 2018, respectivamente. Um exemplo de cálculo do rendimento global para o dia 30 de setembro de 2018 é apresentado no Apêndice E, para melhor entendimento.

É importante salientar que, os dados de irradiância medidos a partir do piranômetro da central meteorológica são obtidos na forma de irradiância no plano horizontal. No entanto, os módulos fotovoltaicos do SFV da EMC/UFG não estão instalados no plano horizontal, mas sim em um plano inclinado cujo ângulo β é igual a 10° e azimute igual a 15° oeste. Desta forma, para o cálculo da figura de mérito do rendimento global é necessário que se tenha a irradiância no plano inclinado dos módulos.

⁴Embora semelhantes, os termos irradiância e irradiação solar possuem significados distintos. Por irradiância entende-se a potência da radiação solar que incide sobre uma unidade de área, ou seja, trata-se de uma taxa medida em W.m^{-2} . Por irradiação entende-se a irradiância integrada ao longo de um intervalo de tempo, comumente igual a uma hora. É medida em Wh.m^{-2} .

Tabela 6: Rendimento global mensal do SFV da EMC/UFG. (a) Ano de 2017. (b) Ano de 2018.

PR por inversor (%)							PR por inversor (%)						
Mês	Inv 1	Inv 2	Inv 3	Inv 4	Inv 5	Inv 6	Mês	Inv 1	Inv 2	Inv 3	Inv 4	Inv 5	Inv 6
Jan	71,84	72,67	72,73	67,22	66,25	65,05	Jan	68,53	69,27	69,39	64,06	63,17	61,93
Fev	70,36	71,39	71,37	67,98	67,19	65,96	Fev	67,82	68,77	68,71	65,27	64,47	63,17
Mar	68,12	68,95	69,08	67,30	67,34	66,27	Mar	65,81	66,62	66,59	65,62	64,94	63,74
Abr	66,01	67,81	67,51	68,30	67,55	66,69	Abr	65,16	66,52	66,27	67,53	66,70	65,59
Mai	63,50	66,65	66,42	67,15	66,46	65,83	Mai	62,26	65,14	64,86	65,43	64,50	63,75
Jun	59,07	63,18	62,98	61,81	59,31	60,75	Jun	64,07	68,69	68,88	67,10	66,36	65,99
Jul	58,91	62,71	62,48	59,67	59,16	58,65	Jul	69,17	72,95	73,49	74,45	73,20	73,64
Ago	58,44	59,43	59,13	57,86	57,19	56,95	Ago	73,35	75,00	73,16	75,46	76,89	76,93
Set	61,46	61,16	61,13	57,62	57,00	56,70	Set	73,54	73,73	72,64	72,19	74,01	73,76
Out	65,85	66,24	66,41	63,79	62,89	61,88	Out	77,25	77,73	77,29	75,71	75,45	74,78
Nov	69,21	70,04	70,18	65,43	64,44	62,94	Nov	80,33	81,30	80,76	76,00	75,78	74,90
Dez	70,36	71,45	71,58	65,34	64,34	62,67	Dez	77,45	77,47	76,76	72,17	72,23	71,50

(a)

(b)

Para o cálculo da irradiância no plano inclinado a partir daquela no plano horizontal, foi utilizado o modelo proposto por Duffie e Beckman [86], sendo que todos os cálculos e tratamentos de dados foram realizados por SILVA [85], onde pode-se encontrar detalhadamente todo o método utilizado para a obtenção da irradiância no plano inclinado e, também, para o rendimento global do sistema aqui estudado.

O rendimento global e o índice pluviométrico permitem analisar o desempenho do sistema. Uma primeira análise é apresentada por meio das figuras 44 e 45. A primeira ilustração traz uma exposição gráfica dos parâmetros de interesse para os módulos conectados aos inversores 2 e 3, e a segunda traz informações sobre os dispositivos conectados aos inversores 4 e 5. Ambos os gráficos foram confeccionados a partir dos dados do ano de 2018.

A partir da figura 44 pode-se verificar que os rendimentos globais dos inversores 2 e 3 se mantêm muito próximos até o mês de junho, onde executou-se a limpeza da superfície de todos os módulos.

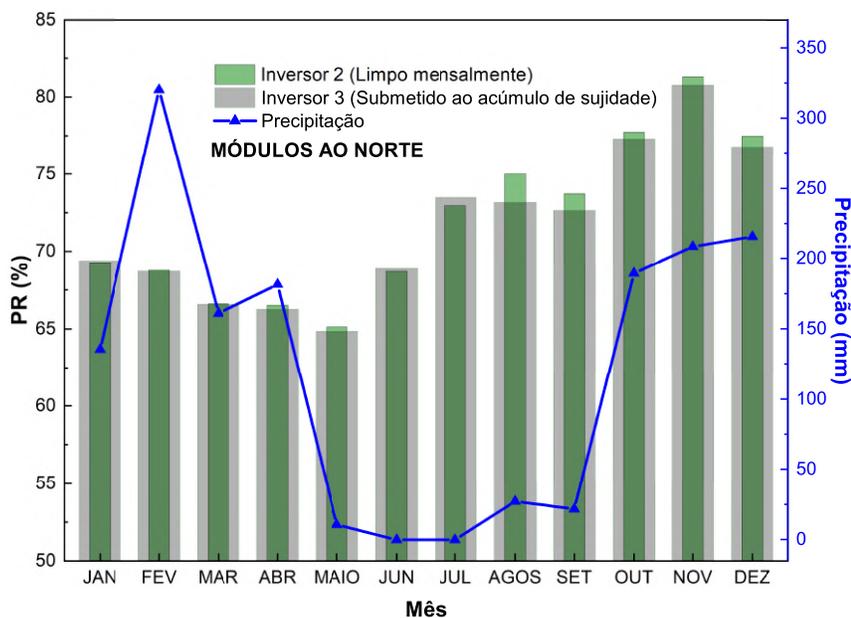


Figura 44: Impactos da limpeza, irradiação e chuvas no ano de 2018 para os módulos conectados aos inversores 2 e 3 (módulos ao norte).

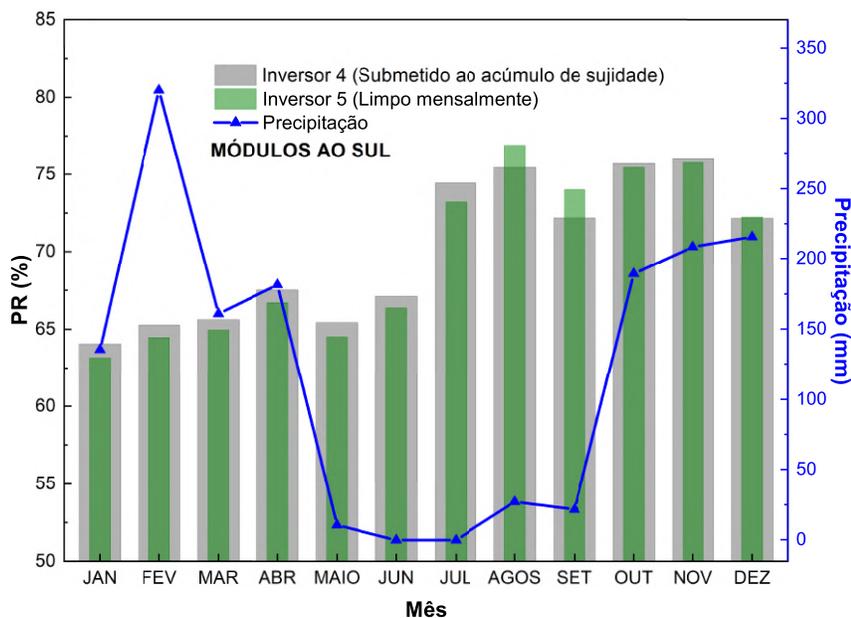


Figura 45: Impactos da limpeza, irradiação e chuvas no ano de 2018 para os módulos conectados aos inversores 4 e 5 (módulos ao sul).

Para o período compreendido entre os meses de julho e dezembro, observa-se que o rendimento global do inversor 2 mostrou-se superior àquele do inversor 3. Esta observação pode ser explicada por meio do acúmulo de sujidade a que os módulos conectados ao inversor 3 foram submetidos, já que apenas os dispositivos ligados ao inversor 2 foram mensalmente limpos. O mês de julho, no

entanto, indica um valor de PR do inversor 3 superior ao do inversor 2. Este episódio pode ser justificado pelo fato de que, para o mês de julho tanto os módulos conectados ao inversor 2 quanto 3 acumularam sujidade em suas superfícies pelo mesmo período de 1 mês, ao passo que no mês de setembro os módulos ligados ao inversor 3 haviam acumulado sujidade por um período de 2 meses e aqueles ligados ao inversor 2 haviam acumulado sujidade apenas durante o intervalo entre as limpezas. Por estarem posicionados em um local mais alto que os módulos ligados ao inversor 2, aqueles conectados ao inversor 3 são melhor ventilados e captam maior albedo.

A partir do mês de agosto, a maior diferença observada entre os rendimentos globais dos inversores 2 e 3 foi verificada para o mês de agosto, onde o PR do primeiro inversor apresentou valor 2,51% superior àquele do segundo. O menor valor observado foi para o mês de outubro, onde a mesma diferença considerada caiu para 0,57%, seguida de 0,67% e 0,92% para os meses de novembro e dezembro, respectivamente. As menores diferenças percentuais observadas para estes meses, em comparação àquela exibida em agosto, são justificadas pelo início das chuvas no mês de setembro. Logo, verifica-se que a precipitação atmosférica possui efeito de limpeza para todos os módulos.

As chuvas tropicais exercem uma relevante função de limpeza para os módulos do sistema, apesar de, a longo prazo, favorecerem o desenvolvimento de microorganismos, conforme foi discutido na seção 5.1.1.

A partir da figura 45 pode-se realizar as mesmas análises para os módulos conectados aos inversores 4 e 5, ou seja, aqueles instalados com faces ao sul. Neste caso, os dispositivos ligados ao inversor 5 são aqueles submetidos à limpeza mensal, e aqueles ligados ao inversor 4 estão sujeitos ao acúmulo de sujidade. Assim como observado para os dispositivos ao norte, para o mês de julho verifica-se um rendimento global superior para o inversor 4 quando comparado ao 5. Entretanto, para os meses secos de agosto e setembro, tem-se que o valor de PR do inversor 5 ultrapassa aquele do inversor 4 em 1,89 e 2,52%, respectivamente.

Uma última análise de grande pertinência é a comparação entre os parâmetros mensais de rendimento global e do índice pluviométrico dos anos de 2017 e 2018 para um mesmo inversor. Estes dados são fornecidos graficamente por meio das figuras 46, 47, 48 e 49, onde comparações entre os dois referidos anos são apresentadas para os inversores 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Além disso, a tabela 7 traz as diferenças percentuais entre os rendimentos globais de cada inversor para o ano de 2018 em relação ao ano anterior.

Como pode ser verificado pelas figuras 46-49 e pela tabela 7, a partir da limpeza realizada nos módulos em junho de 2018, os rendimentos globais dos inversores, quando comparados àqueles para o mesmo mês do ano de 2017, elevaram-se consideravelmente. Os maiores aumentos foram verificados para os meses de julho, agosto e setembro, devido a este período apresentar baixo índice pluviométrico e intenso acúmulo de sujidade na superfície dos módulos. Neste período, o efeito das limpezas mensais é mais relevante.

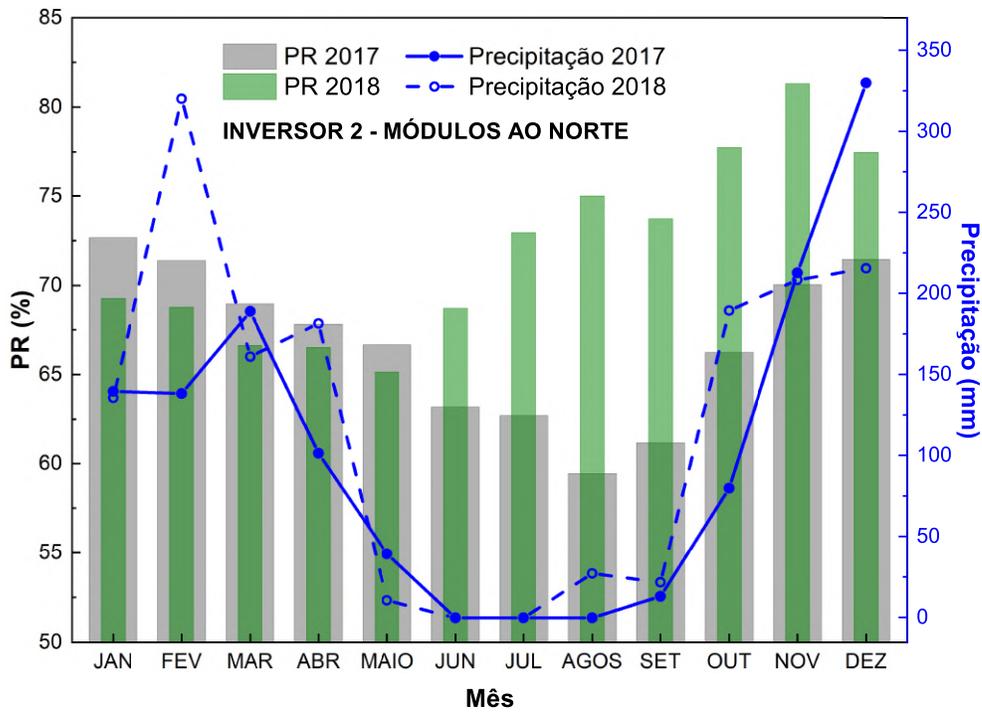


Figura 46: Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 2 entre os anos de 2017 e 2018.

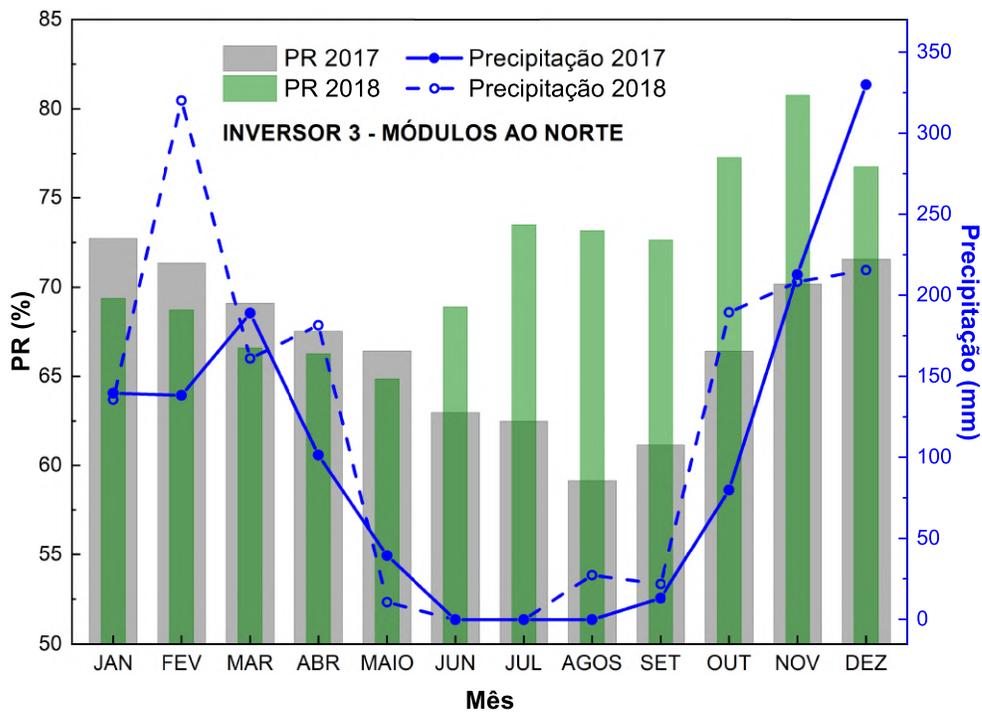


Figura 47: Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 3 entre os anos de 2017 e 2018.

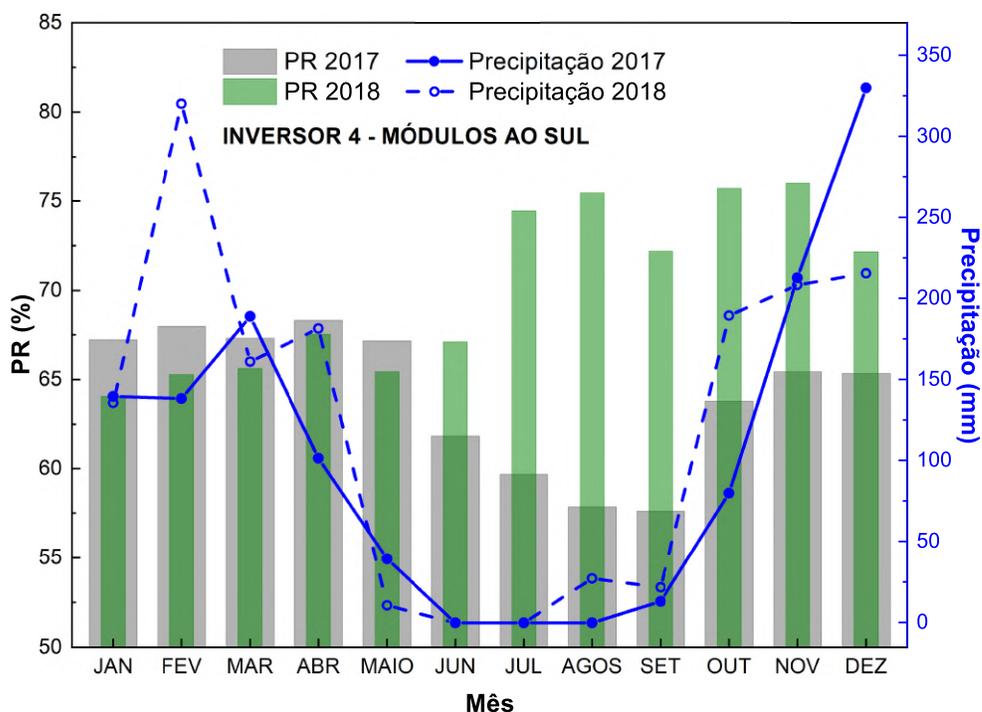


Figura 48: Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 4 entre os anos de 2017 e 2018.

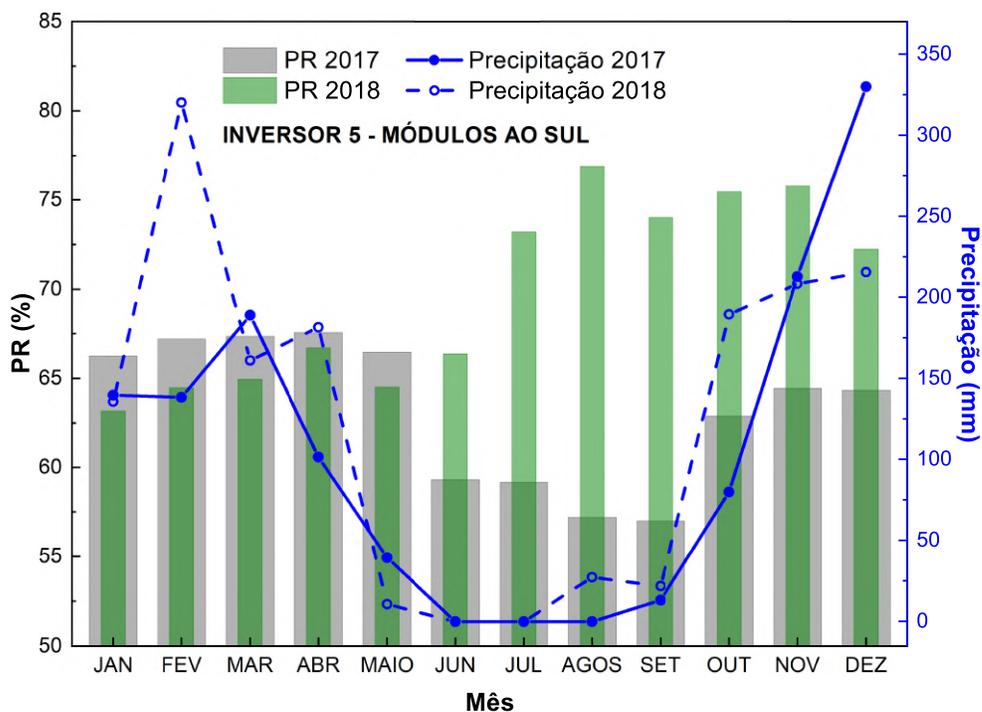


Figura 49: Comparação dos impactos da limpeza, irradiação e chuvas para os módulos conectados ao inversor 5 entre os anos de 2017 e 2018.

Tabela 7: Diferenças percentuais entre os rendimentos globais dos inversores para o ano de 2018 em relação ao ano de 2017.

Mês	Diferença percentual do PR de 2018 em relação a 2017			
	Inversor 2 (%)	Inversor 3 (%)	Inversor 4 (%)	Inversor 5 (%)
Jan	-4,68	-4,59	-4,70	-4,65
Fev	-3,67	-3,73	-3,99	-4,05
Mar	-3,38	-3,60	-2,50	-3,56
Abr	-1,90	-1,84	-1,13	-1,26
Maio	-2,27	-2,35	-2,56	-2,95
Jun	8,72	9,37	8,56	11,89
Jul	16,33	17,62	24,77	23,73
Ago	26,20	23,73	30,42	34,45
Set	20,55	18,83	25,29	29,84
Out	17,35	16,38	18,69	19,97
Nov	16,08	15,08	16,15	17,60
Dez	8,43	7,24	10,45	12,26

O mês de dezembro, em específico, apresentou menor melhora para o rendimento global. Como pode ser verificado pela figura 36(a), o mês de dezembro de 2017 apresentou alto índice pluviométrico, acarretando uma limpeza natural dos módulos fotovoltaicos. Logo, a limpeza mecânica realizada em 2018 resultou em uma menor melhora do rendimento global do mês de dezembro de 2018 em relação ao mesmo mês do ano anterior, quando comparada à melhora observada para os meses de seca.

Um último aspecto observado refere-se à melhoria superior do PR exibida pelos inversores 4 e 5 em contraste àquela apresentada pelos inversores 2 e 3, cujos módulos estão direcionados ao norte. Em vista das análises acerca dos efeitos da direção dos ventos e da ação das chuvas, e considerando que, anteriormente à limpeza realizada em junho de 2018, os módulos do SFV da EMC/UFG estiveram submetidos ao acúmulo de sujidade por aproximadamente 2 anos, tem-se que a direção preferencial das massas de ar que favorece a poluição dos módulos ao sul traz como consequência um acúmulo mais intenso de sujidade em suas superfícies. Por estarem mais sujos, a limpeza mecânica realizada nos módulos ao sul acarreta uma recuperação do rendimento global superior, ao passo que para os módulos ao norte observa-se uma melhoria comparativamente inferior para o PR.

5.4 Sugestões de limpeza

Em vista do que foi analisado e discutido neste capítulo, pode-se sugerir critérios a serem utilizados no planejamento e execução da limpeza de módulos fotovoltaicos instalados na região metropolitana de Goiânia. Estes critérios são:

- **Critério 1 - Manutenção básica**

Neste critério, é indispensável a execução de ao menos uma limpeza ao longo do ano, com o uso de esponja e detergente, sendo recomendável que sejam realizadas duas limpezas anuais. Uma limpeza anual é necessária para a remoção de microorganismos que podem favorecer a fixação de partículas de pequena dimensão ($\leq 10 \mu m$).

- **Critério 2 - Manutenção preventiva**

Neste critério, deve-se realizar a manutenção básica do Critério 1 e ainda limpezas adicionais. Nestas limpezas, adota-se um valor conservador, igual a $4 L/módulo$, para o volume de água utilizado na limpeza manual de cada módulo fotovoltaico. Sabendo que cada módulo possui uma área igual a $1,629 m^2$, e que cada milímetro de chuva corresponde a um volume de 1 L de água por metro quadrado, tem-se que é necessária uma precipitação atmosférica de ao menos 2,455 mm para que haja uma limpeza semelhante àquela manual. No entanto, em função da ausência do uso da esponja, adota-se um valor conservador igual ao dobro da precipitação calculada, isto é, sugere-se que 5 mm de chuva em um período de 24 horas sejam necessários para que uma nova limpeza manual não seja realizada nos 30 dias subsequentes.

Indica-se o uso do Critério 1 para sistemas fotovoltaicos localizadas em telhados e com potência instalada de até 10 kW. O Critério 2 deve ser utilizado para usinas localizadas em solo e com potência instalada superior a 10 kW. Uma vez que o Critério 2 seja utilizado, é importante salientar que, ao longo de um ano, caso o intervalo entre os dias com 5 mm de precipitação seja sempre inferior a 1 mês, uma limpeza manual deve ser executada no mínimo uma vez ao ano.

5.5 Considerações finais

Neste capítulo foram abordados os diversos impactos na operação do SFV da EMC/UFG causados pela presença da sujidade na superfície dos módulos fotovoltaicos. Destaca-se os efeitos da direção dos ventos e do índice pluviométrico no acúmulo de sujidade e consequente redução da transmitância da superfície transparente dos módulos, ocasionando perdas na geração de energia elétrica. Ainda, por meio da limpeza seletiva destes dispositivos, foi possível investigar as consequências do acúmulo deste agente no rendimento global dos inversores. Verificou-se, por fim, que a sujidade acarreta o comprometimento da operação ótima do sistema analisado, sendo necessária a realização de limpezas periódicas para a manutenção da qualidade do SFV.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, foi proposto o estudo dos impactos da sujidade no desempenho do sistema fotovoltaico instalado na EMC/UFG. Para isto, a sujidade depositada sobre os módulos foi coletada e submetida a análises físico-químicas e microbiológicas. Por meio de medidas de MEV, EDS, DRX, FTIR, DTA-TG, ICP-OES, e por análise microbiológica, foi possível caracterizar a sujidade. Identificou-se uma matriz complexa, composta por diversos tipos de minerais e uma alta concentração de matéria orgânica. Majoritariamente, concluiu-se que a sujidade é composta por quartzo, gibbsita, caulinita e substâncias orgânicas transportadas pelo vento e produzidas por microorganismos que se desenvolveram sob condições propícias.

Uma vez caracterizada, a sujidade teve seu impacto analisado por meio de sua deposição em lâminas de vidro. Por meio das análises mensais de espectroscopia na região do ultravioleta-visível, foi possível avaliar o comportamento da transmitância destas amostras de vidro face ao acúmulo de sujidade em sua superfície. Verificou-se que, o depósito deste material particulado acarreta perdas consideráveis na transmitância da superfície. Além disso, verificou-se que o fenômeno de deposição da sujidade está intimamente relacionado com a precipitação atmosférica e a direção dos ventos, de forma que as chuvas contribuem para a limpeza e os ventos para a poluição da superfície dos módulos. Por outro lado, a ocorrência de chuvas favorece o desenvolvimento de microorganismos que acarretam uma maior aderência de partículas no vidro.

De forma a analisar o desempenho do sistema, foram realizadas limpezas mensais de um arranjo de módulos fotovoltaicos e comparou-se a operação destes em relação a um segundo arranjo não submetido à despoluição da superfície. Verificou-se que a limpeza da superfície possibilita um aumento da geração de energia elétrica. Mais importante, foi observado que a avaliação conjunta do rendimento global do SFV com a precipitação atmosférica possibilitou a confirmação da grande importância da limpeza periódica dos módulos. Os resultados de maior impacto mostraram que a limpeza é eficiente na recuperação de rendimentos globais altamente deteriorados.

Por fim, foram sugeridos dois critérios de limpeza para módulos fotovoltaicos instalados na região metropolitana de Goiânia, sendo um pautado em uma ação que visa a manutenção básica do sistema, e o outro visando uma manutenção preventiva, onde mais limpezas devem ser realizadas ao longo do ano.

Como sugestões de trabalhos futuros, tem-se:

- Um estudo que incorpore a análise de transmitância da superfície dos módulos com os dados de geração, rendimento global, irradiação, precipitação atmosférica e direção dos ventos;
- Estudo da efetiva participação de microorganismos na produção de biofilmes e seu impacto no acúmulo da sujidade;

- Conduzir uma investigação mais longa e minuciosa para compreender os limites dos impactos causados pela direção e velocidade dos ventos no acúmulo de sujidade.

PUBLICAÇÕES REALIZADAS

Capítulo de Livro

ROMANHOLO, P. V. V.; ALVARENGA, B. P.; MARRA, E. G.; PIMENTEL, S. P. Sujidade Depositada sobre Módulos Fotovoltaicos Instalados em Goiânia: Morfologia e Composição Química. In: **Energia Solar e Eólica 2**. 1.ed. Editora Atena, 2019. cap. 20, p. 263-275.

Artigo Completo Publicado em Congresso

ROMANHOLO, P. V. V.; ALVARENGA, B. P.; MARRA, E. G.; PIMENTEL, S. P. **Sujidade Depositada sobre Módulos Fotovoltaicos Instalados em Goiânia: Morfologia e Composição Química**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado - RS. Anais do VII CBENS.

Resumo Publicado em Congresso

ROMANHOLO, P. V. V.; ALVARENGA, B. P.; MARRA, E. G.; PIMENTEL, S. P. **Caracterização Morfológica e Química da Sujidade Depositada sobre Painéis Fotovoltaicos**. In: 14º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão, 2017, Goiânia - GO. Anais 14º CONPEEX.

Referências

- [1] Lawrence Livermore National Laboratory. **Estimated U.S. Energy Consumption in 2017**. Disponível em: <<https://flowcharts.llnl.gov>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.
- [2] Lawrence Livermore National Laboratory. **Estimated U.S. Carbon Emission in 2014**. Disponível em: <<https://flowcharts.llnl.gov/commodities/carbon>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.
- [3] Union of Concerned Scientists. **Each Country's Share of CO₂ Emissions**. Disponível em: <<https://www.ucsusa.org>> . Acesso em 18 de setembro de 2018.
- [4] LAWRENCE, M. G. et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. **Nature Communications**. Volume 9, número 1, p. 3734, 2018.
- [5] SEARCHINGER, T. D. et al. Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. **Nature Communications**. Volume 9, número 1, p. 3741, 2018.
- [6] BEDDINGTON, J. et al. **Letter from scientists to the EU parliament regarding forest biomass**. Disponível em: <<http://empowerplants.files.wordpress.com/2018/01/scientist-letter-on-eu-forest-biomass-796-signatories-as-of-january-16-2018.pdf>>. Acesso em 19 de setembro de 2018.
- [7] LAGANIÈRE, J.; PARÉ, D.; THIFFAULT, E.; BERNIER, P. Y. Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from Canadian forests. **Bioenergy**. Volume 9, p. 358–369, 2017.
- [8] International Renewable Energy Agency. **Total Renewable Power Generation Capacity 2011-2017**. Disponível em: <<http://www.irena.org>>. Acesso em 19 de setembro de 2018.
- [9] KHAN, J.; ARSALAN, M. H. Solar power technologies for sustainable electricity generation - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 55, p. 414-425, 2016.
- [10] National Renewable Energy Laboratory. **Best Research-Cell Efficiency**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov>>. Acesso em 24 de setembro de 2018.
- [11] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. **Photovoltaics Report**. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em 24 de setembro de 2018.
- [12] National Renewable Energy Laboratory. **U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf>>. Acesso em 24 de setembro de 2018.
- [13] TOLMASQUIM, M. T. Solar. In: **Energia Renovável**. Rio de Janeiro: 2016. P. 310-412
- [14] ANEEL. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em 31 de outubro de 2018.
- [15] ANEEL. **Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [16] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. **Recent Facts about Photovoltaics in Germany**. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [17] Empresa de Pesquisa Energética. **Leilões**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [18] Ministério de Minas e Energia. **Portaria MME n° 465 de 30 de novembro de 2017**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/atprt2017465mme.pdf>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.

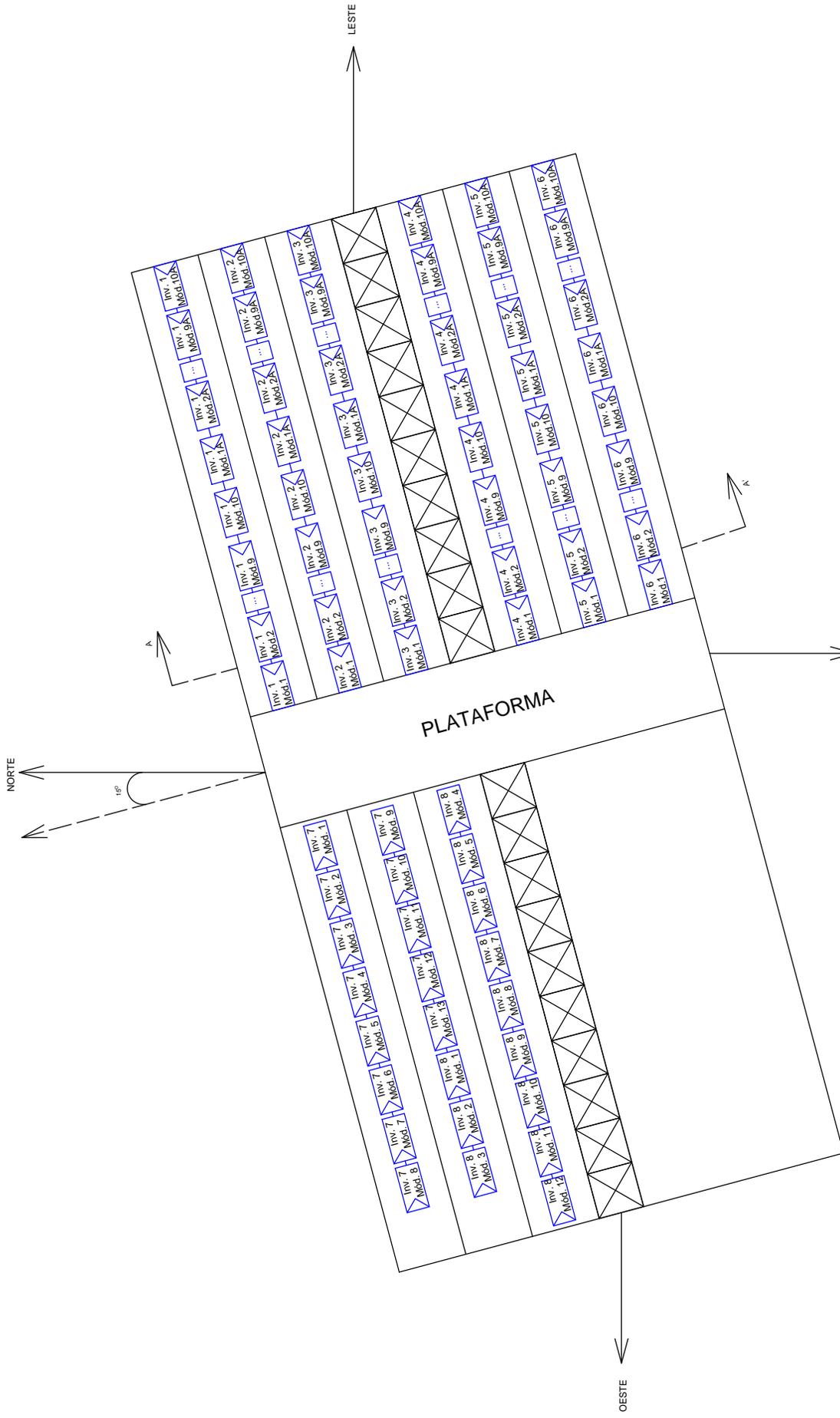
- [19] Ministério de Minas e Energia. **Portaria MME nº 44 de 14 de fevereiro de 2018**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3342640/Portaria_n_44-2018_LEN_A-6.pdf/e6573185-5fe3-4196-96ce-0740314f194d>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [20] Empresa de Pesquisa Energética. **Informe Técnico apresenta consolidação dos dados da Habilitação Técnica para o Leilão A-4 de 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/informe-tecnico-apresenta-consolidacao-dos-dados-da-habilitacao-tecnica-para-o-leilao-a-4-de-2018>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [21] ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [22] ANEEL. **Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [23] SECIMA. **Geração distribuída**. Disponível em: <http://goiassolar.secima.go.gov.br/?page_id=42>. Acesso em 14 de março de 2019.
- [24] ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9>. Acesso em 19 de outubro de 2018.
- [25] HOTTEL, H. C.; WOERTZ, B. B. The performance of flat plate solar heat collectors. **The American Society of Mechanical Engineers Transactions**. Volume 64, p. 91–104, 1942.
- [26] DIETZ, A.G.H. Introduction to the utilization of solar energy. In: **Diathermanous materials and properties of surfaces**. McGraw-Hill, 1963. P. 59–86.
- [27] SAYIGH, A. Effect of dust on flat plate collectors. **Sun: mankind's future source of energy**, Volume 2, p. 960–964, 1978.
- [28] GHAZI, S.; SAYIGH, A.; IP, K. Dust effect on flat surfaces - a review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 33, p. 742–751, 2014.
- [29] Global Solar Atlas. **Global Horizontal Irradiation**. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/downloads/world?c=11.523088,8.4375,2>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.
- [30] GARG, H. P. Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors. **Solar Energy**. Volume 15, p. 299–302, 1974.
- [31] SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 22, p.698–733, 2013.
- [32] SOLIMAN, K. H. Rainfall over egypt. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. Volume 79, p.389–397, 1953.
- [33] CHARABI, Y. Projection of future changes in rainfall and temperature patterns in Oman. **Journal of Earth Science & Climatic Change**. Volume 4, p. 1–8, 2013.
- [34] YOUNG, R. P. Low-scatter mirror degradation by particle contamination. **Optical Engineering**. Volume 15, p. 516–520, 1976.
- [35] BARSKY, R. B.; KILIAN, L. Oil and the macroeconomy since the 1970s. **Journal of Economic Perspectives**. Volume 18, p. 115–134, 2004.
- [36] COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L. L. Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 63, p. 33–61, 2016.

- [37] MANI, M.; PILLAI, R. Impact of dust on solar photovoltaic (pv) performance: Research status, challenges and recommendations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 14, p. 3124–3131, 2010.
- [38] EL-SHOBOKSHY, M. S.; HUSSEIN, F. M. Effect of the dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. **Solar Energy**. Volume 51, p. 505–511, 1993.
- [39] GOOSSENS, D.; OFFER, Z. Y.; ZANGVIL, A. Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors. **Solar Energy**. Volume 50, p. 75–84, 1993.
- [40] GOOSSENS, D.; VAN KERSCHAEVER, E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effect of wind velocity and airborne dust concentration cell performance. **Solar Energy**. Volume 66, p. 277–289, 1999.
- [41] HAMMOND, R.; SRINIVASAN, D.; HARRIS, A.; WHITFIELD, K.; WOHLGEMUTH, J. Effects of soiling on PV module performance and radiometer performance. In: **Proceedings of the 26th IEEE PVSC, Anaheim**. Nova Iorque, 1997. P. 1121–1124.
- [42] AL-HASAN, A. Y. A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface. **Solar Energy**. Volume 63, p. 323–333, 1998.
- [43] ELMINIR, H. K.; GHITAS, A. E.; HAMID, R. H.; EL-HUSSAINY, F.; BEHEARY, M. M.; ABDEL-MONEIM, K. M. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. **Energy Conservation and Management**. Volume 47, p. 3192–3203, 2006.
- [44] COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L.L. Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 63, p. 33–61, 2016.
- [45] COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L.L. Solar energy dust and soiling R & D progress: Literature review update for 2016. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 82, p. 2504–2536, 2018.
- [46] CHEN, J.; ZHANG, L.; ZENG, Z.; WANG, G.; LIU, G.; ZHAO, W.; REN, T.; XUE, Q. Facile fabrication of antifogging, antireflective, and self-cleaning transparent silica thin coatings. **Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp**. Volume 509, p. 149–157, 2016.
- [47] CHESTNUTT, J. K. W.; BING, G.; CHANG-YU, W. Assessment of power consumption of an electrodynamic dust shield to clean solar panels. In: **AIME Proceedings of power conference – renewables: solar, wind, hydro, and geo-thermal**. 2016.
- [48] KHOJASTEH, D.; KAZEROONI, M.; SAFARIAN, S.; KAMALI, R. Droplet impact on superhydrophobic surfaces: a review of recent developments. **REVIEW J Ind Eng Chem**. Volume 42, p. 1–14, 2016.
- [49] MEHMOOD, U.; FAHAD, A.; YILBAS, B. S.; SALHI, B.; AHMED, S. H. A.; HOSSAIN, M. K. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: a critical review. **REVIEW Sol Energy Mater Sol Cells**. Volume 157, p. 604–623, 2016.
- [50] EMC. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica de 34 kWp. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/sfvemcufg/home>>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.
- [51] FUNAPE. **Geomorfologia**. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/cap5/index.php>>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.
- [52] SEPLAN. Revisão e Detalhamento da Carta de Risco do Município de Goiânia. Disponível em: <http://www.goiania.go.gov.br/download/aprovnet/Carta_Risco/Relatorio_Carta_Risco_IA.pdf>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.
- [53] UFG. **Classificação Climática de Köppen-Geiger**. Disponível em: <https://portais.ufg.br/up/68/o/Classifica_____o_Clim__tica_Koppen.pdf>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.
- [54] INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.

- [55] ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. Dispositivos de Conversão Fotovoltaica. In: **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Oficina de Textos, 2012.
- [56] LUQUE, A.; HEGEDUS, S. The Physics of The Solar Cell. In: **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Wiley, 2003.
- [57] ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Primeira Edição, 2002.
- [58] INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Segunda Edição, 2017.
- [59] CABANILLAS, R. E.; MUNGUÍA, H. Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaics modules. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**. Volume 3, 2011.
- [60] COSTA, S.; ABREU, A. et al. Caracterização físico-química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em zonas climáticas de Minas Gerais. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte, 2016.
- [61] CUDDIHY, E. F. Theoretical considerations of soil retention. **Solar Energy Materials**. Volume 3, p. 21-33. 1980.
- [62] CUDDIHY, E. F. Surface soiling: theoretical mechanisms and evaluation of low-soiling coatings. In: **Proceedings of the flat-plate solar array project research forum on quantifying degradation**. P. 379-396. 1983.
- [63] CUDDIHY, E. F.; WILLIS, P. B. Antisoiling technology: theories of surface soiling and performance of anti-soiling surface coatings. **Jet propulsion laboratory report**. 1984.
- [64] APPELS, R. et al. Effect of soiling on photovoltaic modules. **Solar Energy**. Volume 96, p. 283-291, 2013.
- [65] DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 4, p.157- 175, 1999.
- [66] FUJITA, M.; KOIKE, F. Birds Transport Nutrients to Fragmented Forests in an Urban Landscape. **Ecological Applications**. Volume 17, p. 648-654, 2007.
- [67] HAMMOND, R.; SRINIVASAN, D.; HARRIS, A.; WHITFIELD, K.; WOHLGEMUTH, J. Effects of soiling on PV module performance and radiometer performance. In: **Proceedings of the 26th IEEE PVSC**, Anaheim. New York. P. 1121–1124. 1997.
- [68] MAGHAMI, M. R. et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 59, p.1307- 1316, 2016.
- [69] TOBY, B. H. R factors in Rietveld analysis: How good is good enough? **Powder Diffraction**. Volume 21, p. 67-70, 2006.
- [70] INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO CENTRO-OESTE. **Zooneamento Ecológico Econômico do Município de Goiânia**. Disponível em: <http://www.goiania.go.gov.br/download/aprovnet/zee/zee_Relatorio_tecnico.pdf>. Acesso em 14 de janeiro de 2019.
- [71] HOOGSTEN, M. J. J.; LANTINGA, E. A.; BAKKER, E. J.; GROOT, J. C. J.; TITTONELL, P. A. Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. **European Journal of Soil Science**. Volume 66, p. 320-328, 2015.
- [72] SCHROEDER, P. A. Infrared Spectroscopy in Clay Science. In: CMS Workshop Lectures, Volume 11, **Teaching Clay Science**. The Clay Mineral Society, 2002.
- [73] Institute of Chemistry-University of Tartu. **Database of ATR-FT-IR spectra of various materials**. Disponível em: <http://lisa.chem.ut.ee/IR_spectra/paint/fillers/quartz/>. Acesso em 16 de janeiro de 2019.
- [74] JEYAGEETHA, C.; KUMAR, S. P. Study of SEM/EDXS and FTIR for Fly Ash to Determine the Chemical Changes of Ash in Marine Environment. **International Journal of Science and Research**. Volume 5, p. 1688-1693, 2016.

- [75] SOCRATES, G. **Infrared and Raman characteristic group frequencies**. Terceira Edição, Editora Wiley and sons, 2001.
- [76] GORBUCHINA, A. A. Life on the rocks. **Environmental Microbiology**. Volume 9, p. 1613-1631, 2007
- [77] NOACK-SCHÖNMANN, S. et al. Sub-aerial biofilms as blockers of solar radiation: spectral properties as tools to characterise material-relevant microbial growth. **International Biodeterioration & Biodegradation**. Volume 86, p. 286-293, 2014.
- [78] SHIRAKAWA, M. A. et al. Microbial colonization affects the efficiency of photovoltaic panels in a tropical environment. **Journal of Environmental Management**. Volume 157, p. 160-167, 2015.
- [79] ALVES, F. R. R. **Estudo do Efeito da Sujidade na Eficiência de Módulos Fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia. 2018.
- [80] SAID, S. A. M.; WALWIL, H. M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. **Solar Energy**. Volume 107, p. 328-337, 2014.
- [81] SHEHRI, A. A.; PARROTT, B.; CARRASCO, P.; AL SAIARI, H.; TAIE, I. Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for PV modules applications. **Solar Energy**. Volume 135, p.317-324, 2016.
- [82] PAUDYAL, B. R.; SHAKYA, S. R.; PAUDYAL, D. P.; MULMI, D. D. Soiling-induced transmittance losses in solar PV modules installed in Kathmandu Valley. **Renewables: Wind, Water, and Solar**. Volume 4, 2017.
- [83] ROUHOLAMINI, A.; POURGHARIBSHAHI, H.; ABDOLZADEH, M.; FADAEINEDJAD, R. Temperature of a photovoltaic module under influence of different environmental conditions- experimental investigation. **International Journal of Ambient Energy**. Volume 37, p. 266-272, 2016.
- [84] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, março, 2014.
- [85] SILVA, J. A. A. Tratamento de Dados Meteorológicos e Análise de Desempenho do Sistema Fotovoltaico da EMC/UFG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2019. Em fase de pré-publicação.
- [86] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4 ed. Hoboken, New Jersey. Gear Team, 2013. 928 p.
- [87] Solar Radiation Monitoring Laboratory - University of Oregon. **Sun Path Chart Program**. Disponível em: <<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>>. Acesso em 28 de janeiro de 2019.

APÊNDICE A - Planta Fotovoltaica



Central de Geração Fotovoltaica	
Quantidade de módulos: 145	Potência de cada módulo: 235 W
Quantidade de inversores:	2 x 2,9 kW (Inv. 7 e Inv. 8) 6 x 4,4 kW (Inv. 1 ao Inv. 6)
Fator de dimensionamento (FDI):	Inversor de 2,9 kW (13 módulos) = 94,93%
	Inversor de 4,4 kW (12 módulos) = 102,80%
$P_G = 34,075 \text{ kW}$	Inversor de 4,4 kW = 93,62%
	$P_{CA} = 32,20 \text{ kVA}$



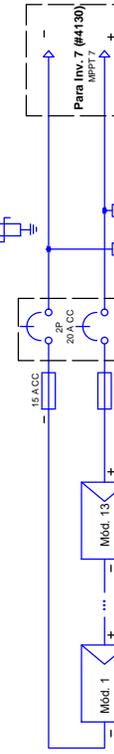
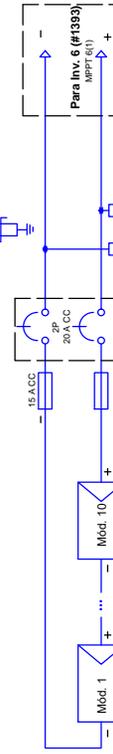
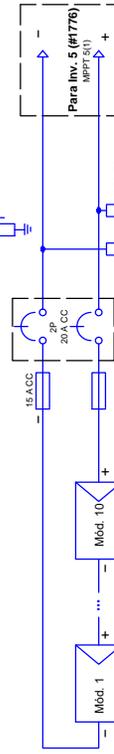
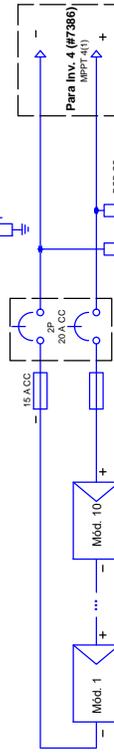
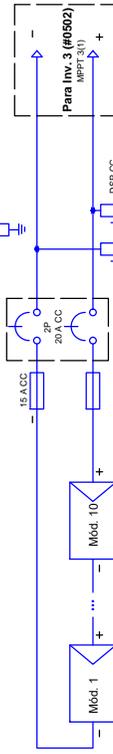
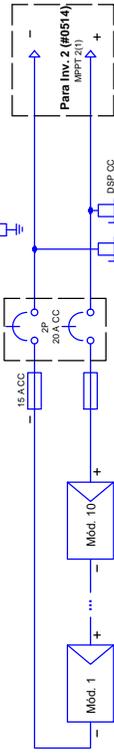
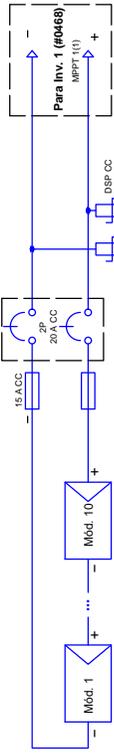
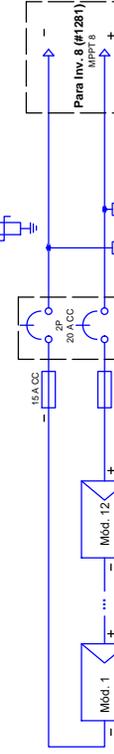
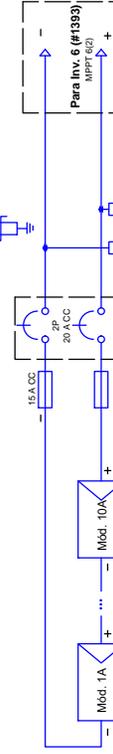
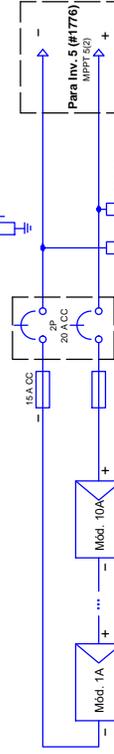
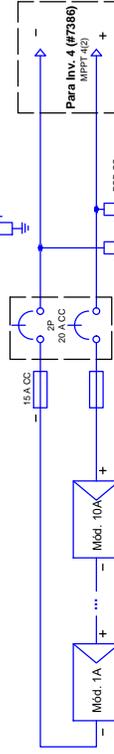
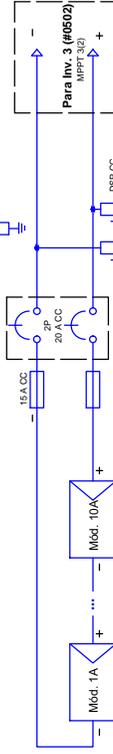
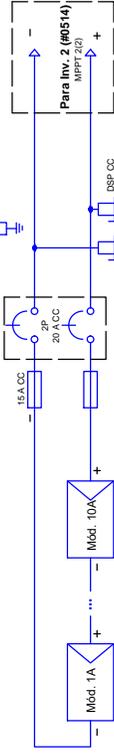
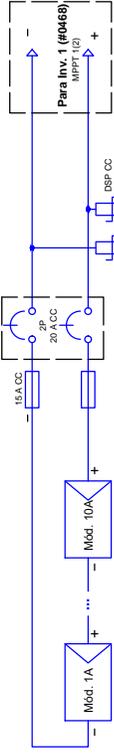
(a)



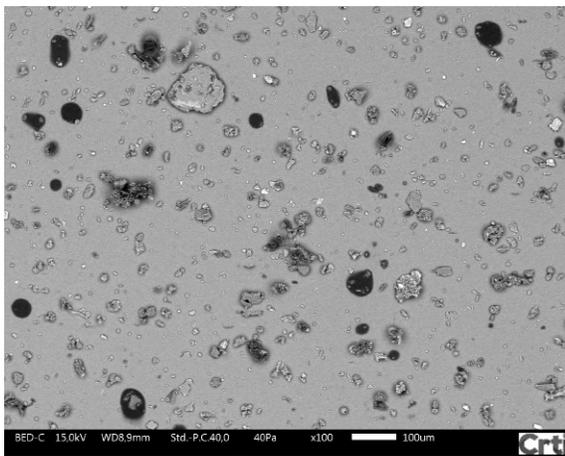
(b)

Figura 50: SFV da EMC/UFG. (a) Módulos instalados no lado leste do telhado. (b) Módulos instalados no lado oeste do telhado.

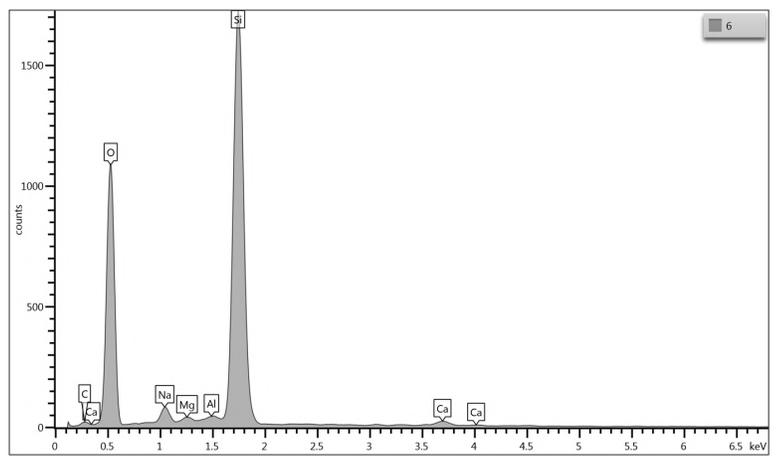
APÊNDICE B - Diagrama de Conexões dos Inversores



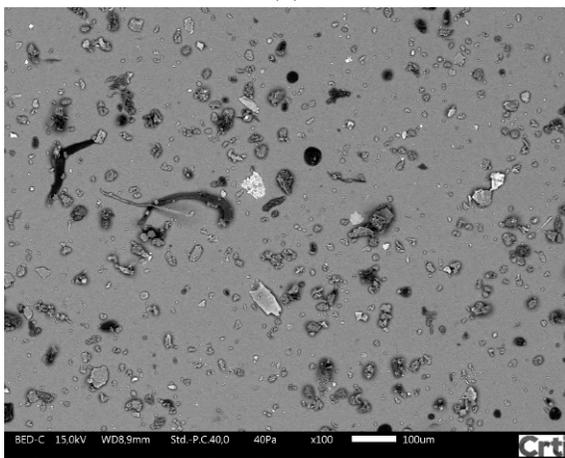
APÊNDICE C - MEV, Espectros EDS e UV-VIS das Lâminas



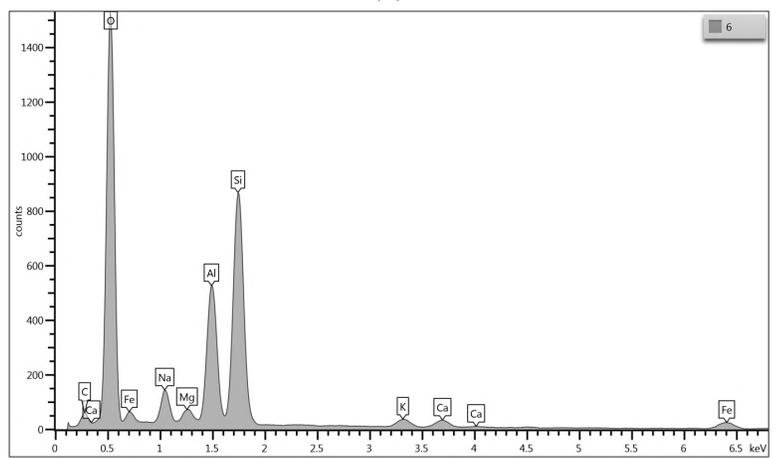
(a)



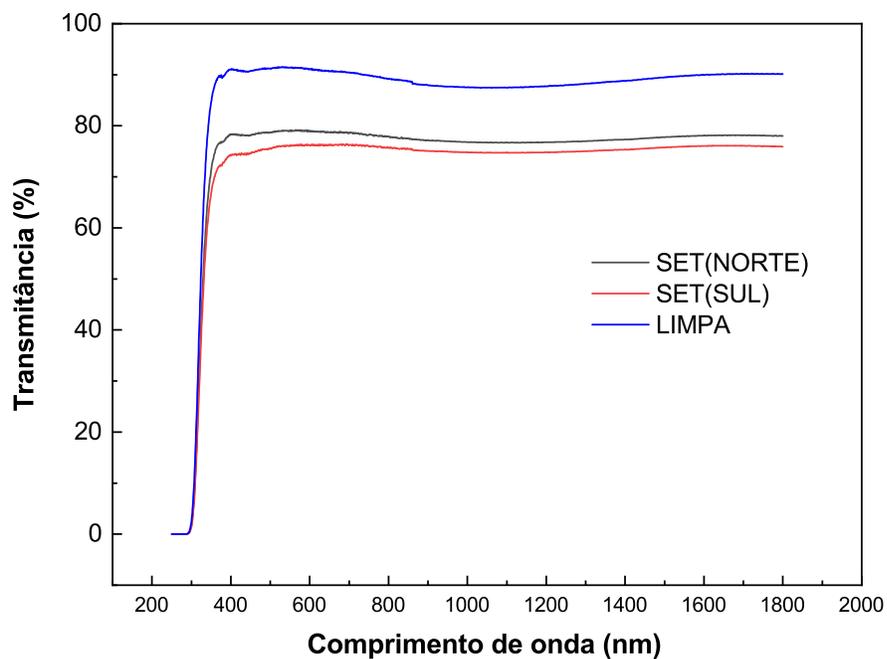
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 51: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de setembro de 2017 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.

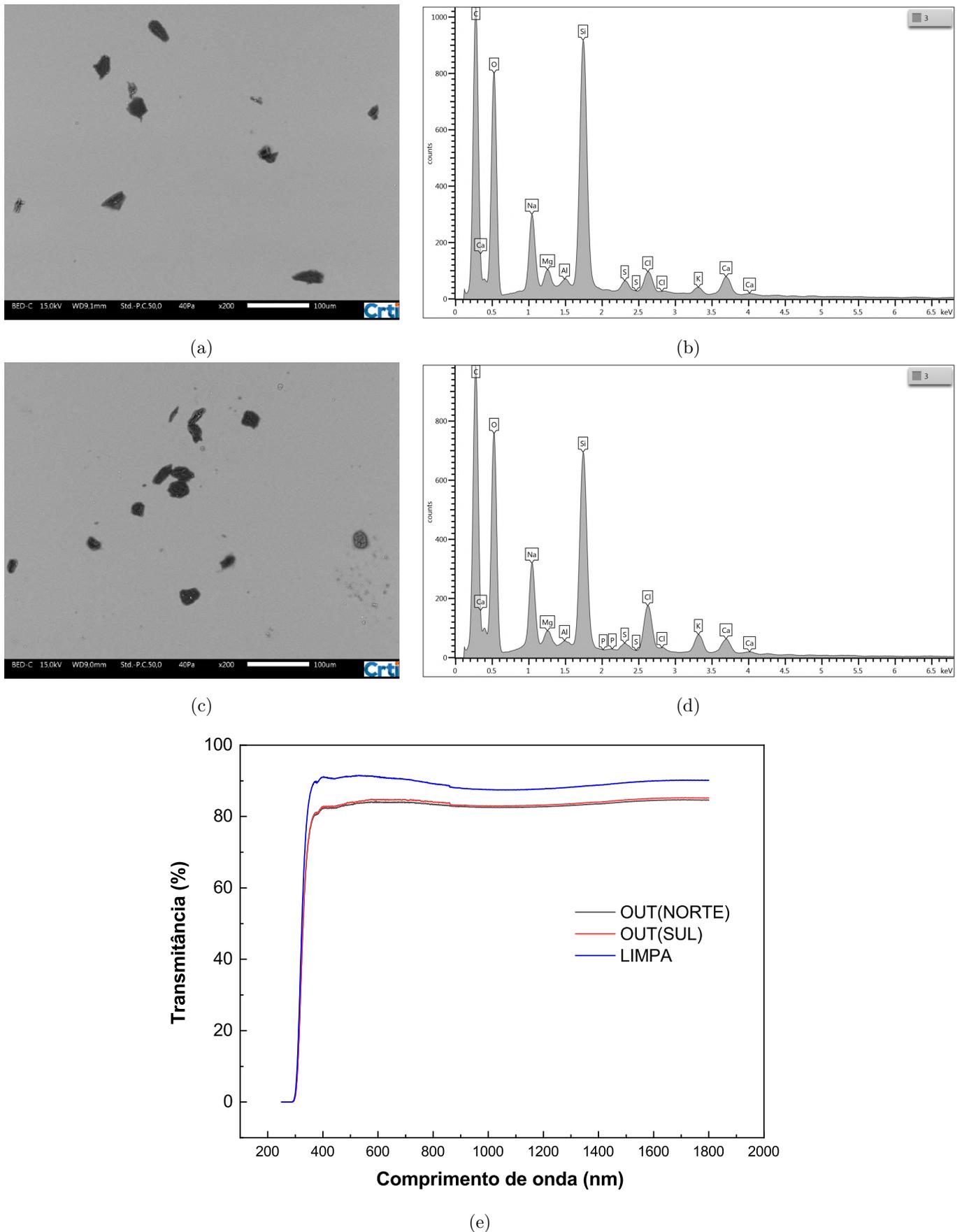


Figura 52: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de outubro de 2017 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.

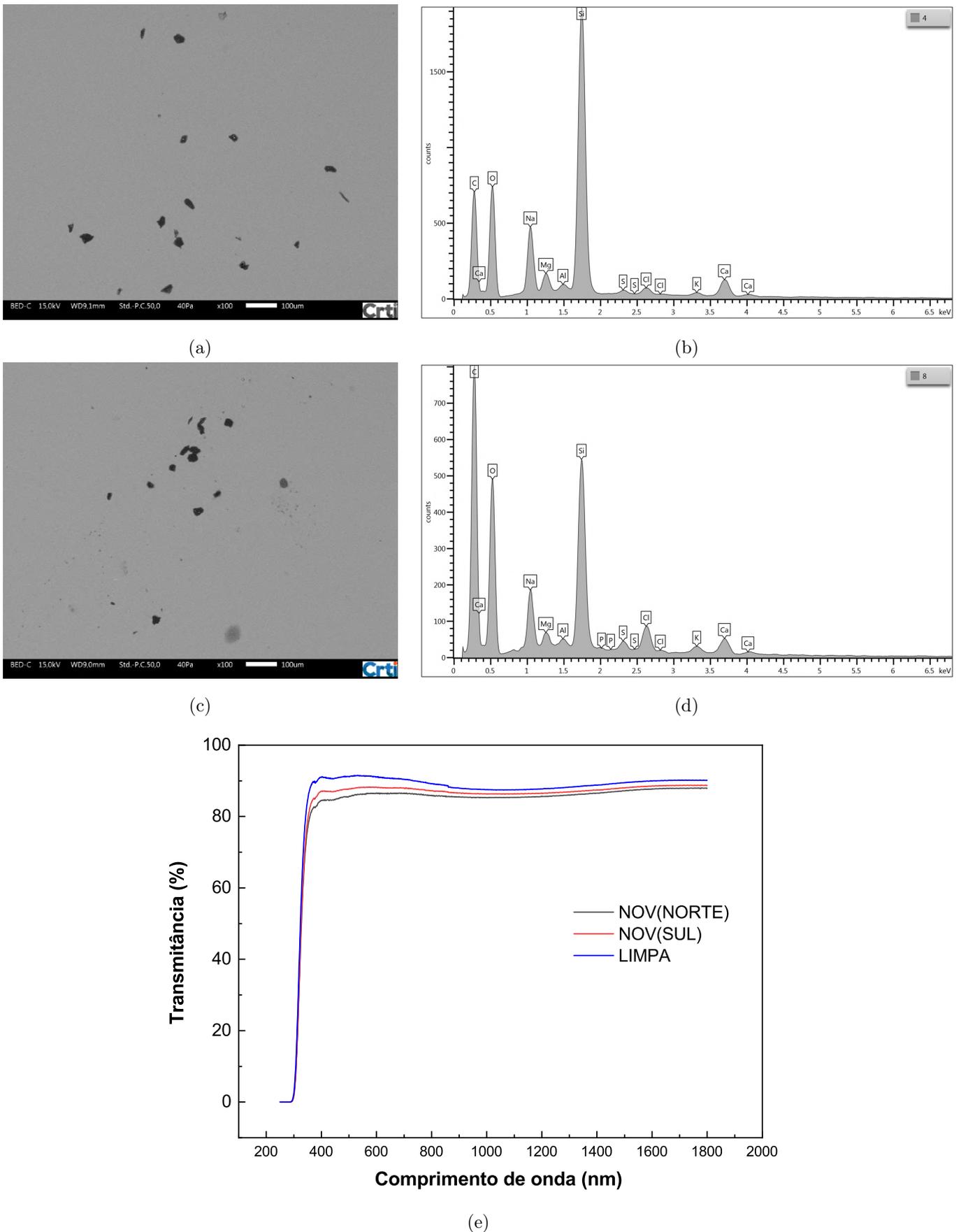
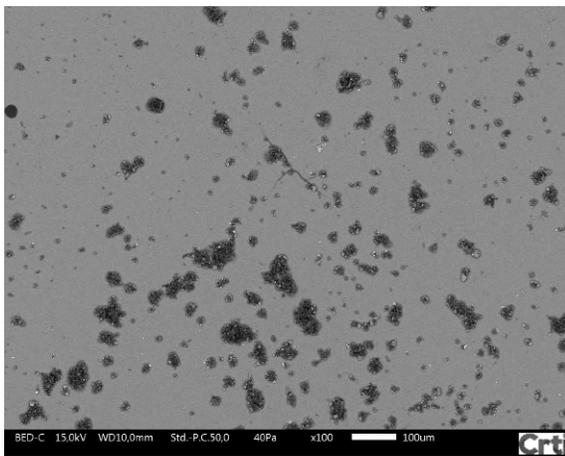
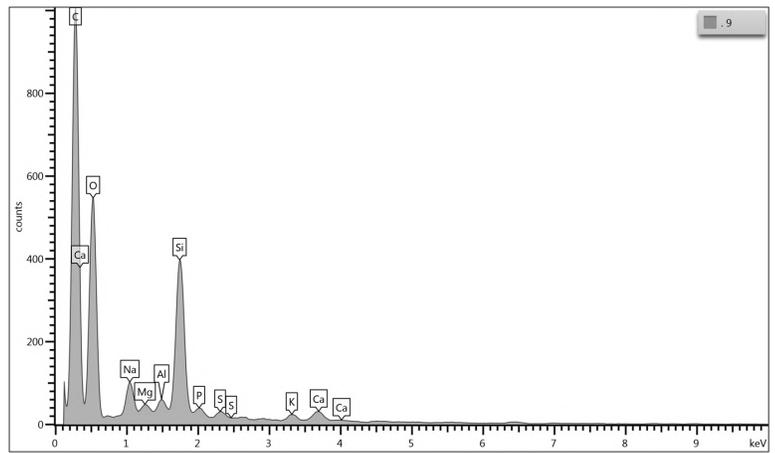


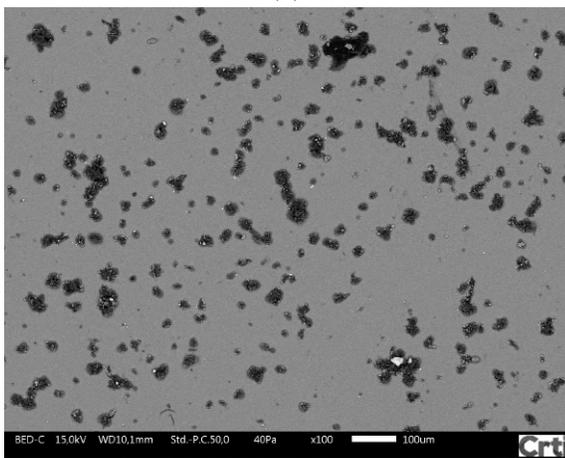
Figura 53: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de novembro de 2017 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



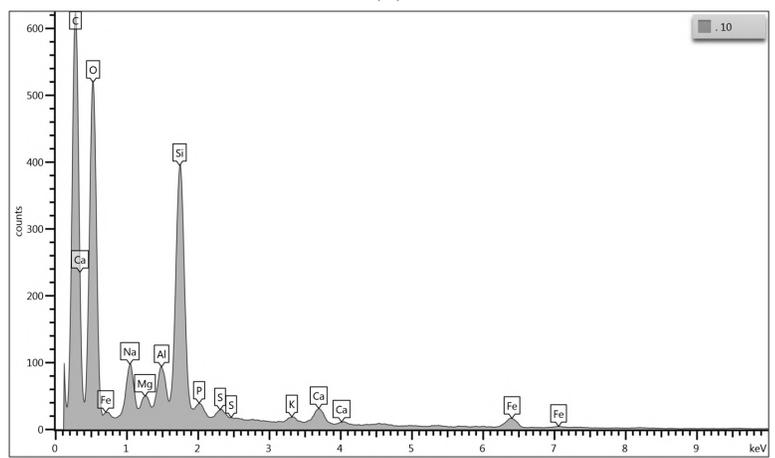
(a)



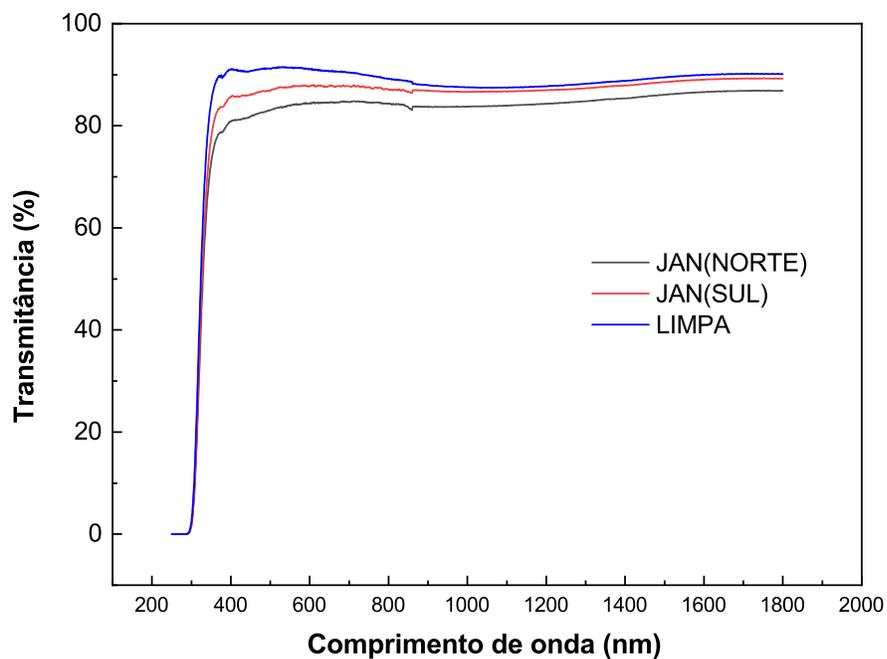
(b)



(c)

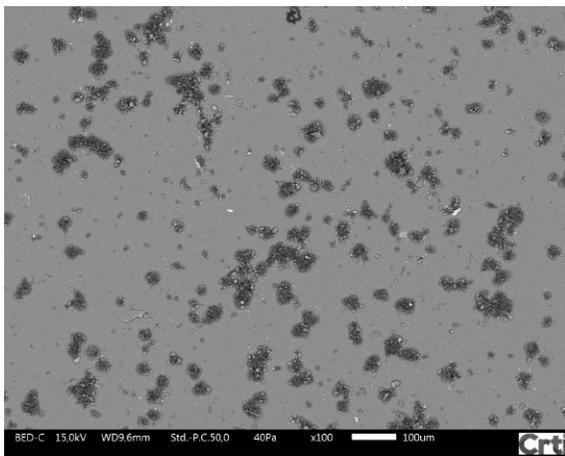


(d)

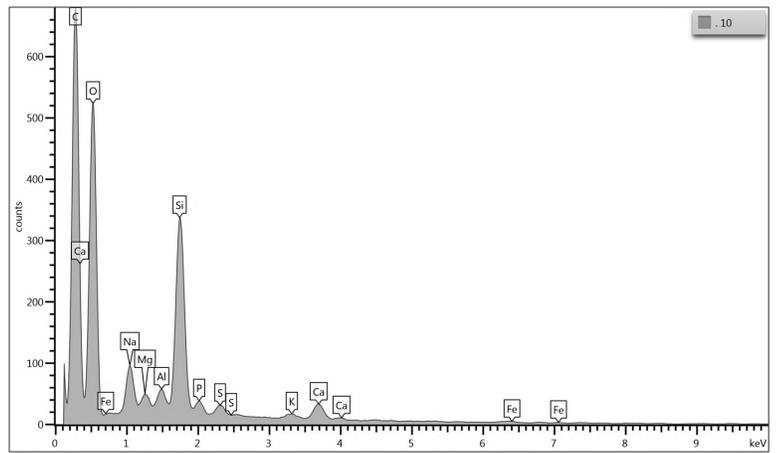


(e)

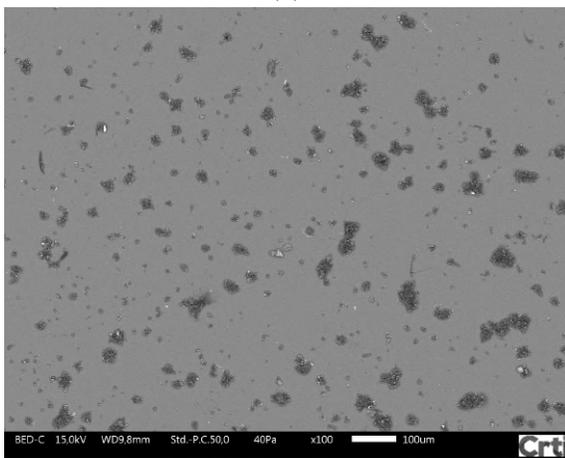
Figura 54: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de janeiro de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



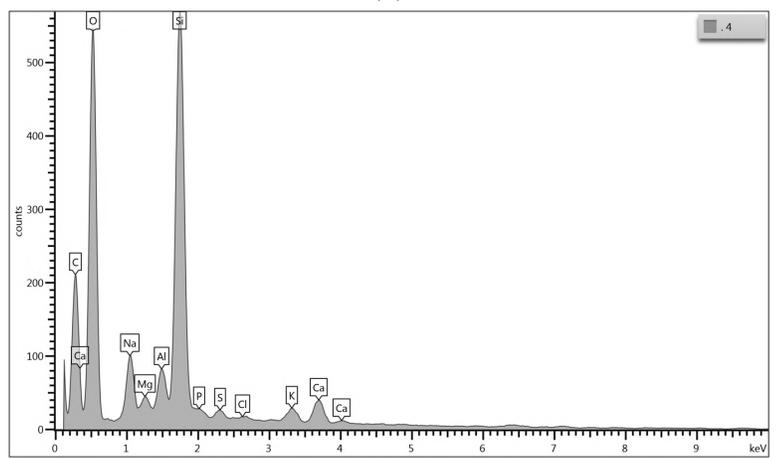
(a)



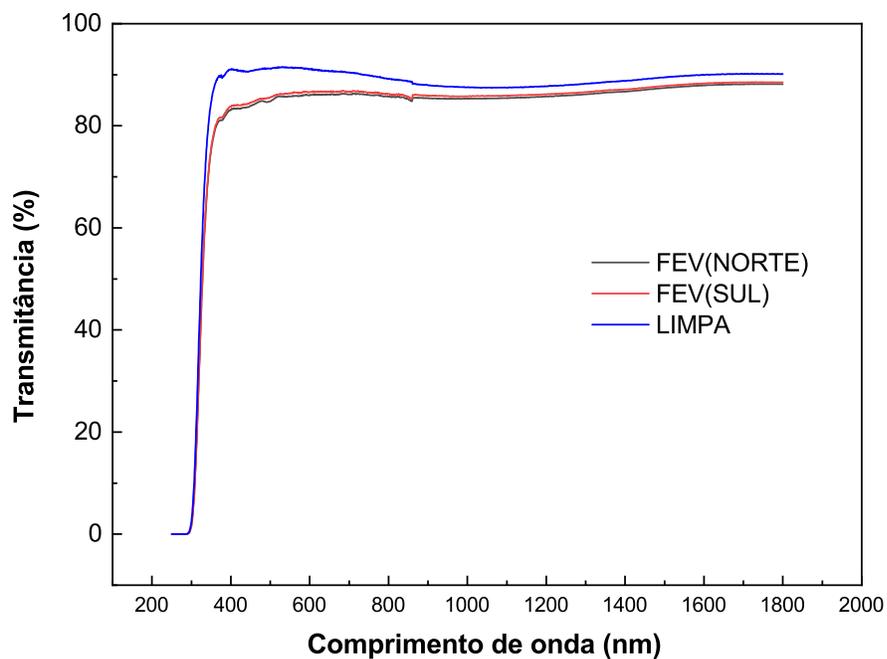
(b)



(c)

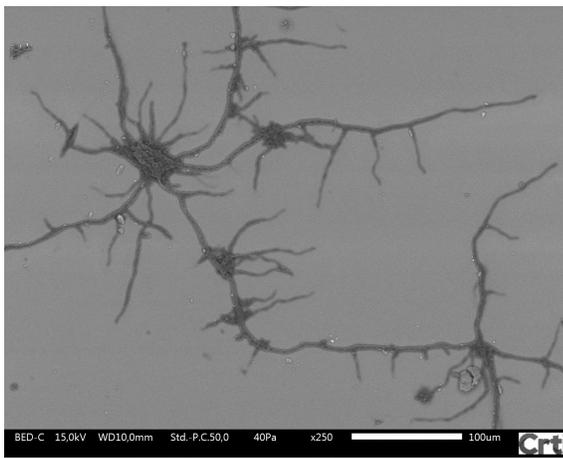


(d)

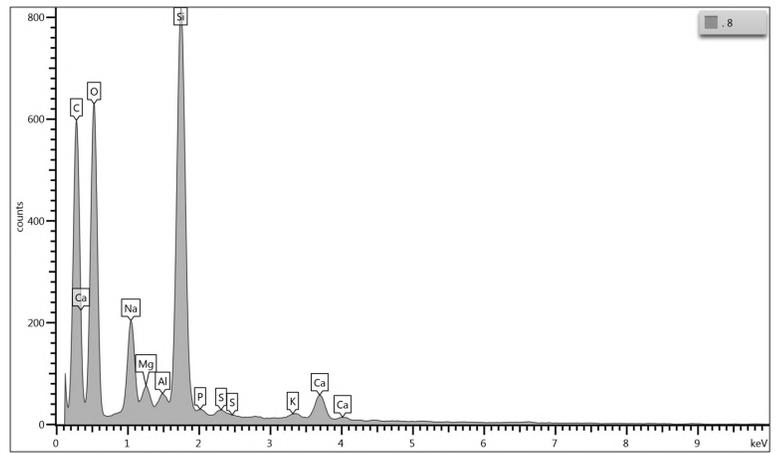


(e)

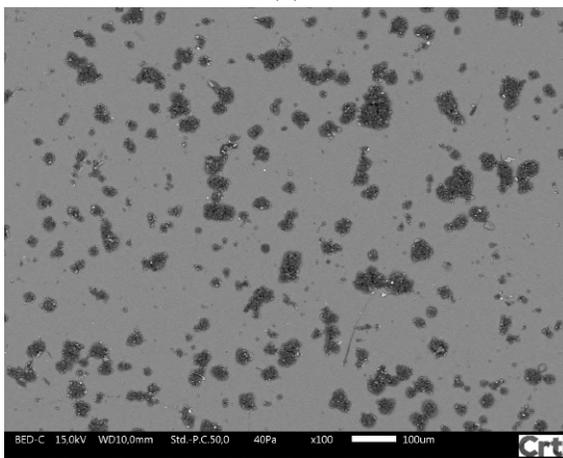
Figura 55: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de fevereiro de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



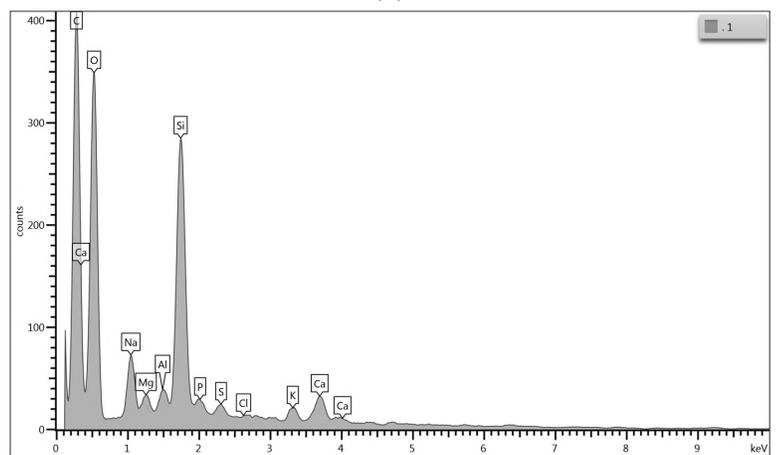
(a)



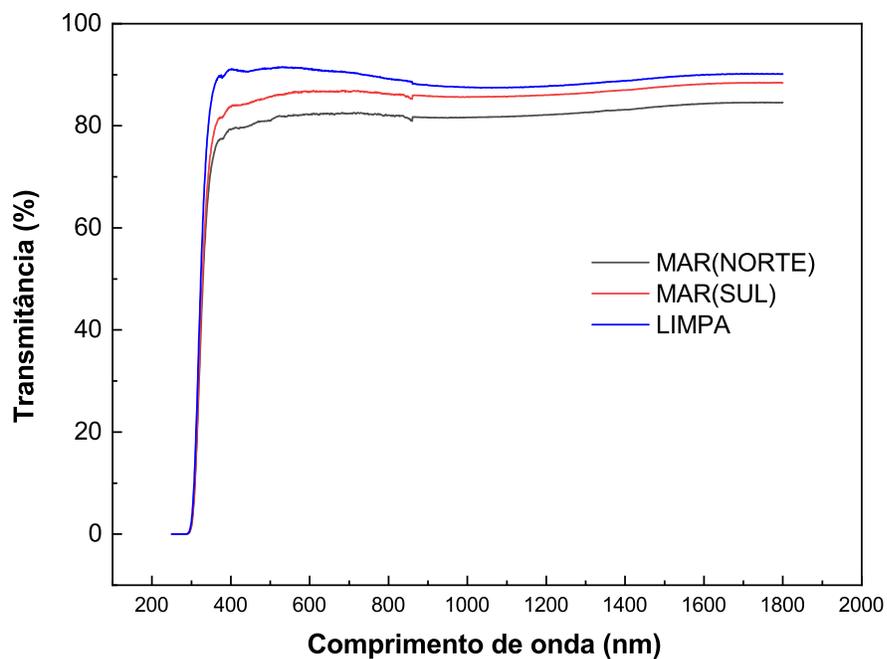
(b)



(c)

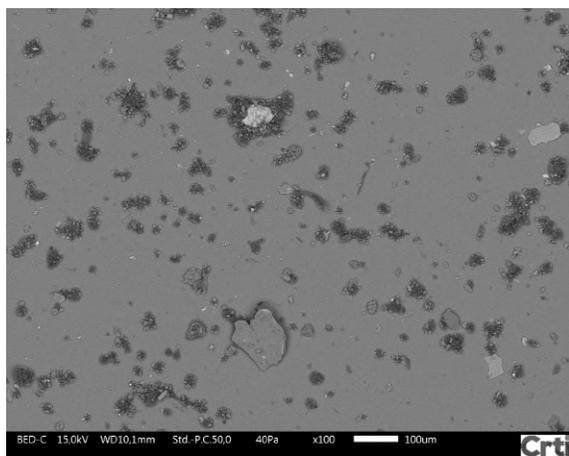


(d)

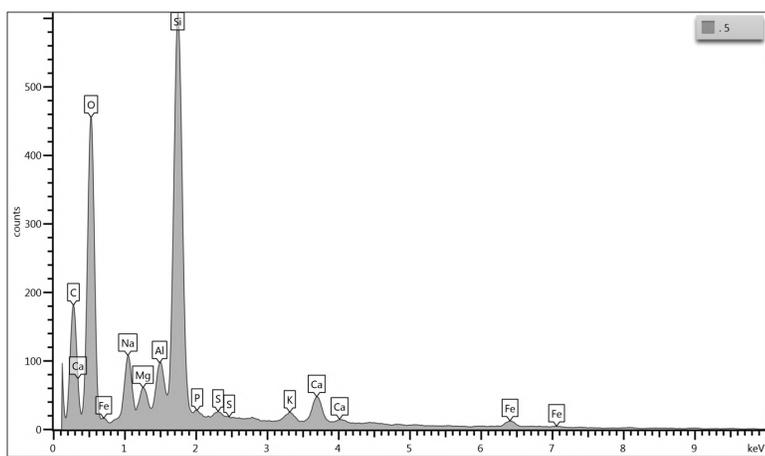


(e)

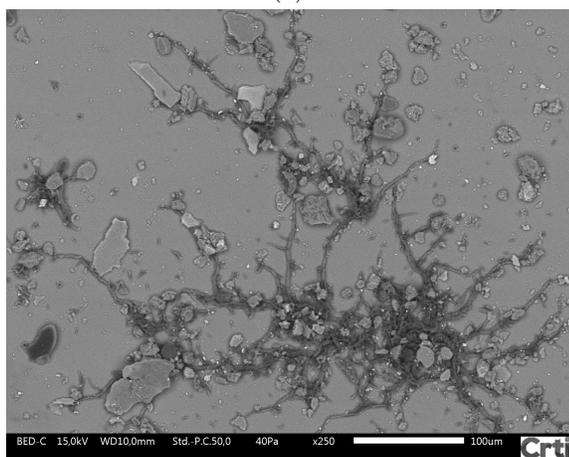
Figura 56: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de março de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



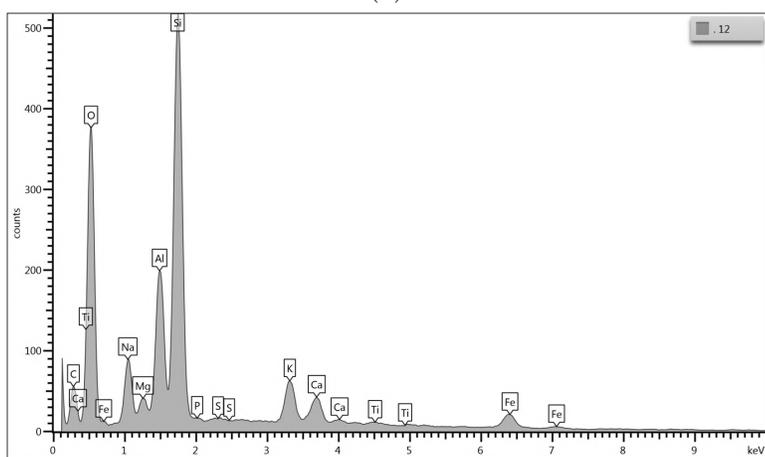
(a)



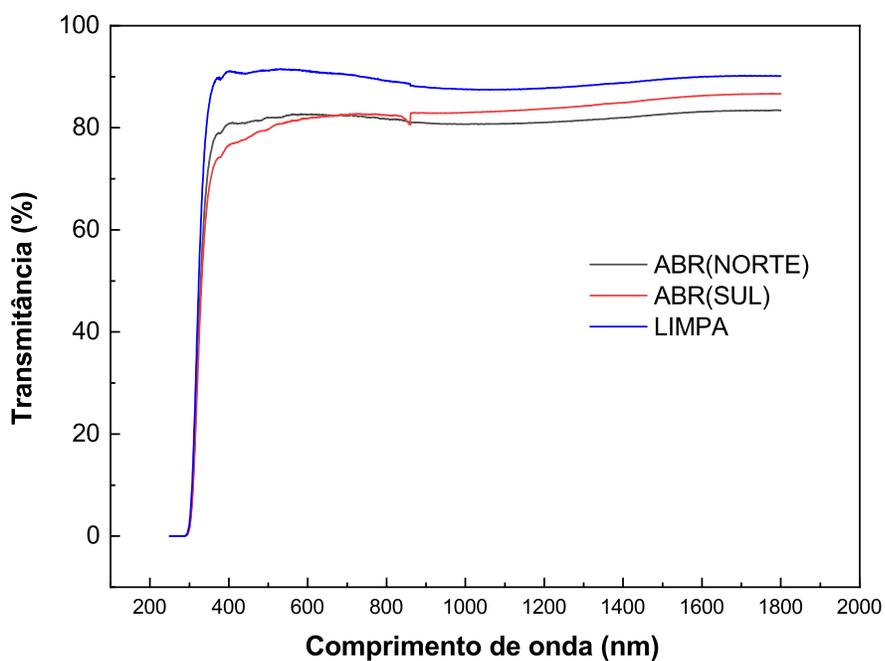
(b)



(c)

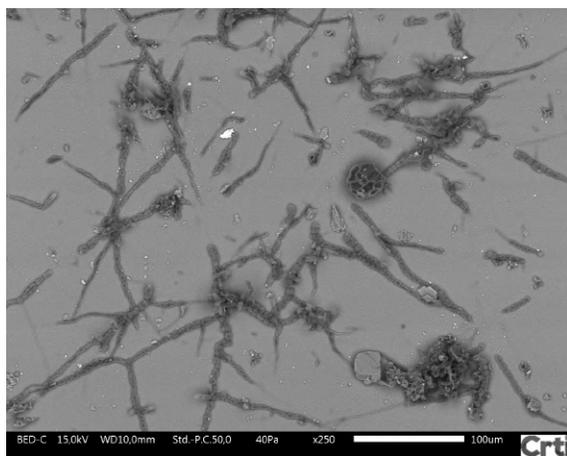


(d)

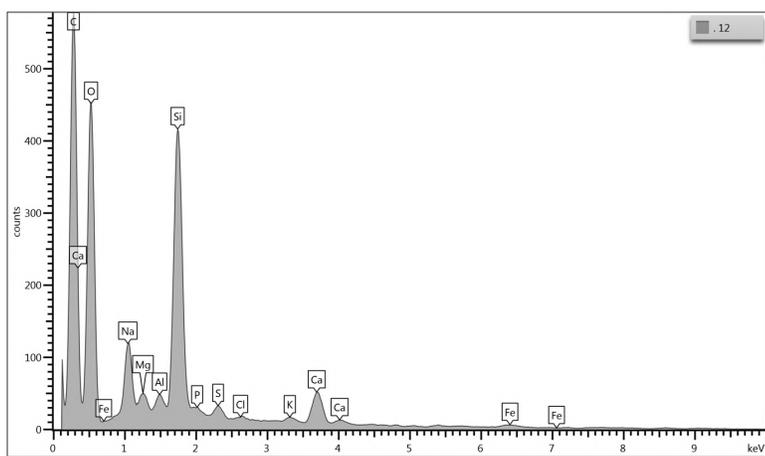


(e)

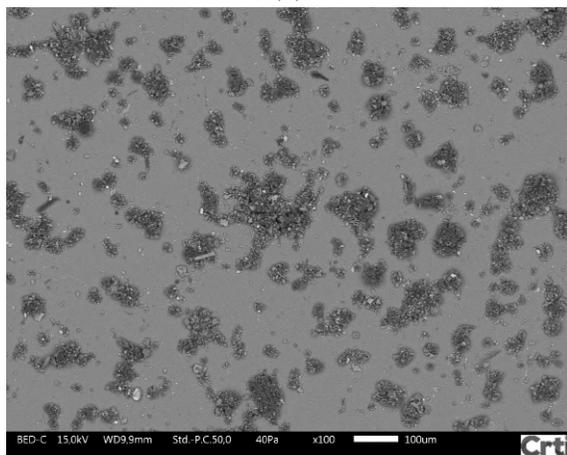
Figura 57: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de abril de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



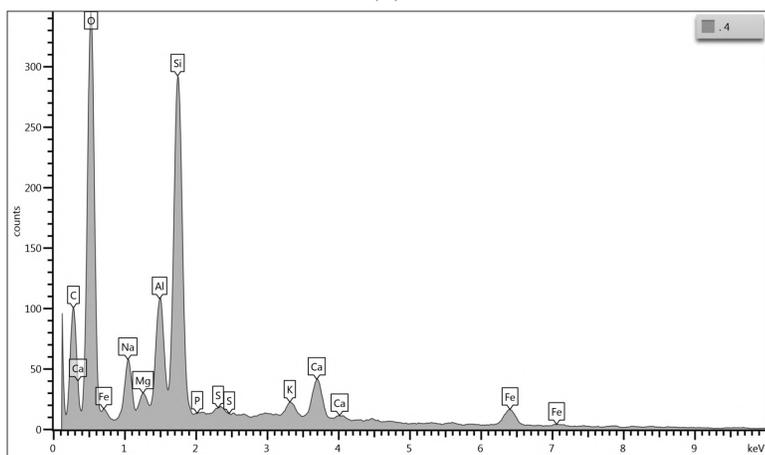
(a)



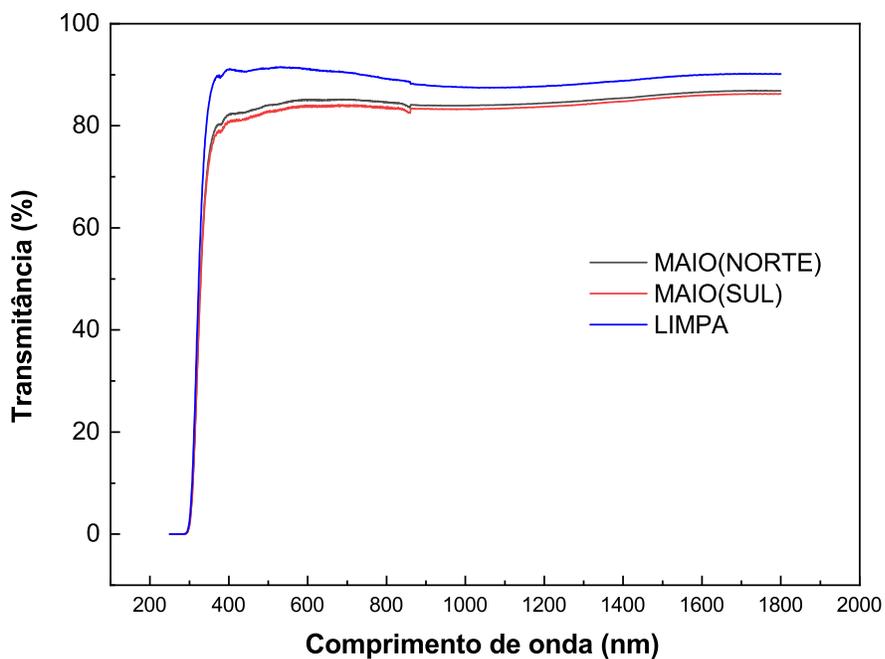
(b)



(c)

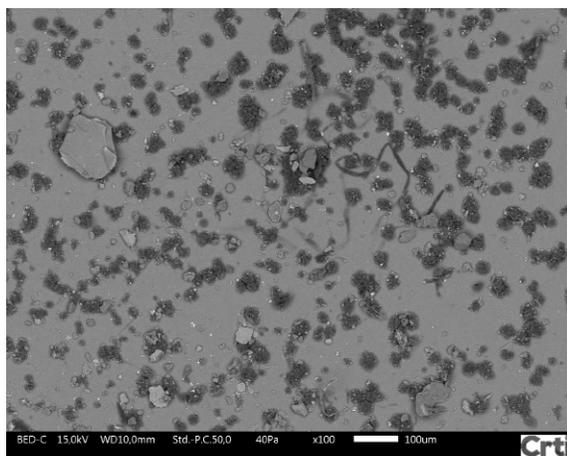


(d)

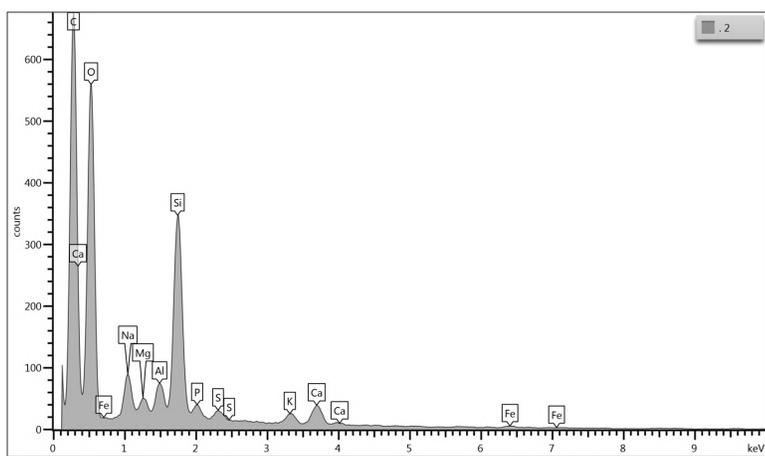


(e)

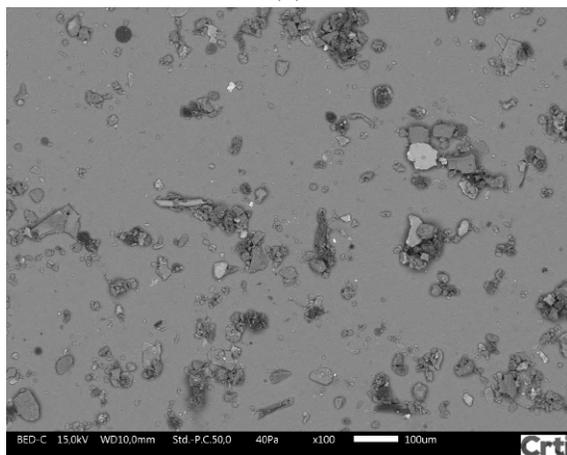
Figura 58: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de maio de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



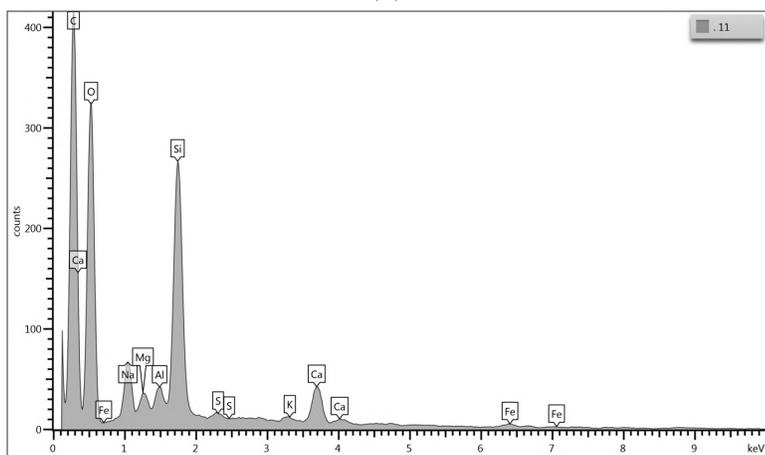
(a)



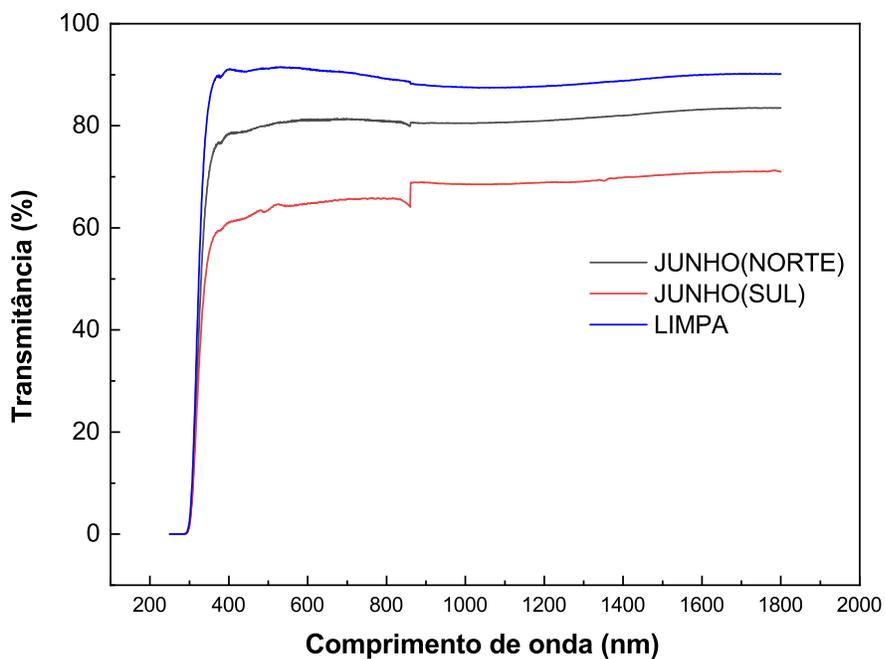
(b)



(c)

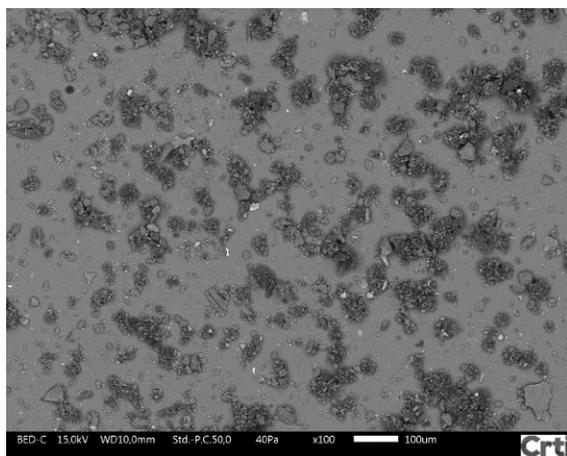


(d)

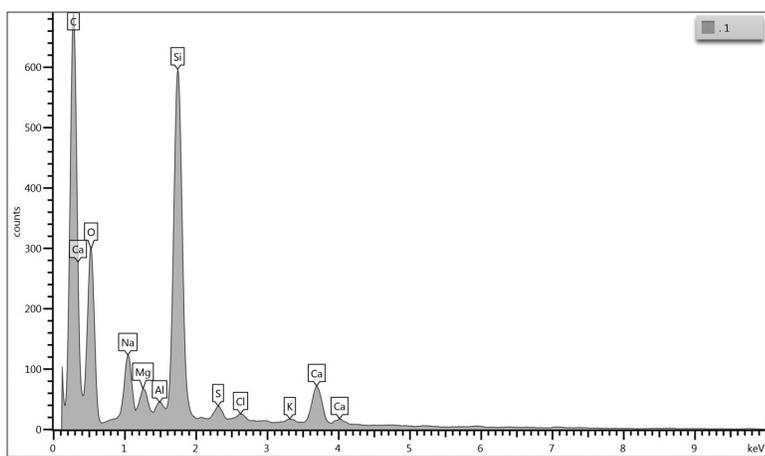


(e)

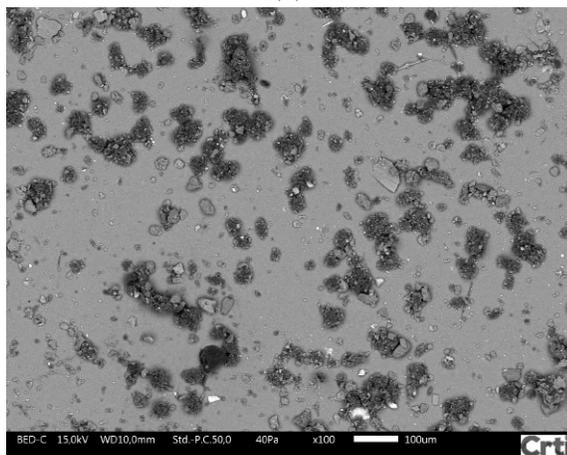
Figura 59: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de junho de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



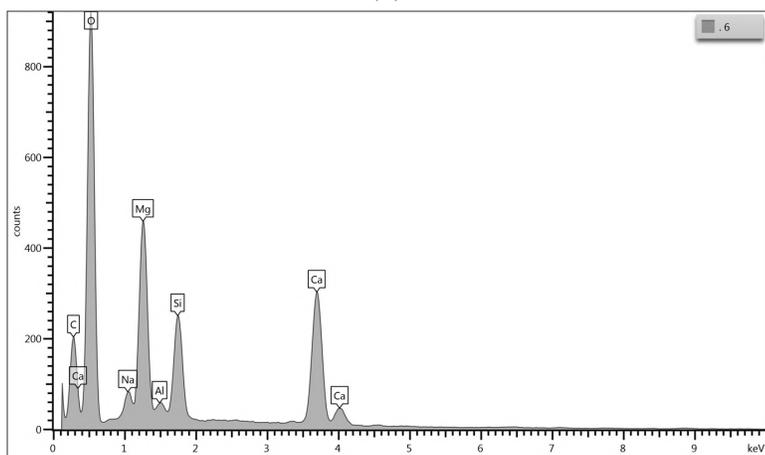
(a)



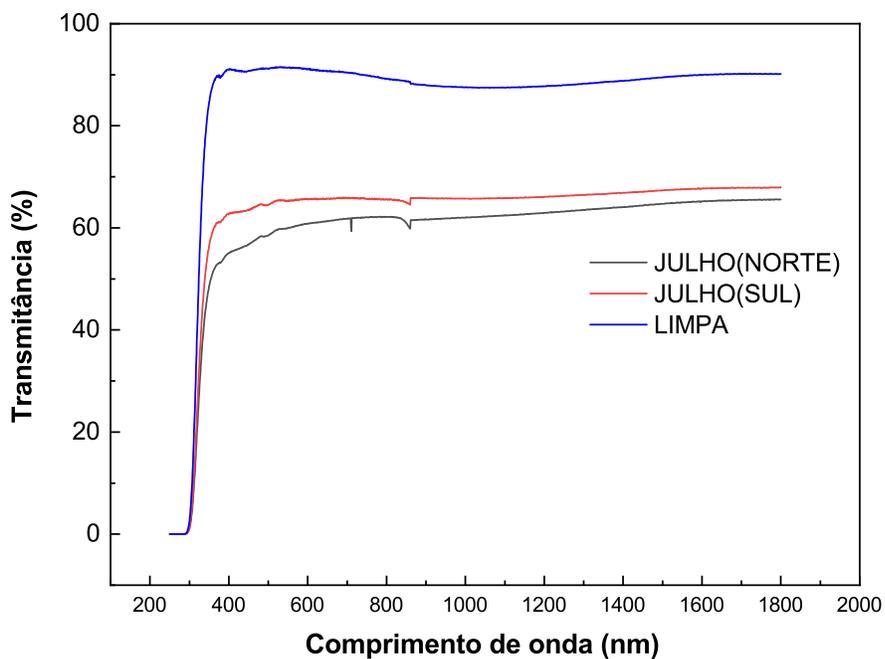
(b)



(c)

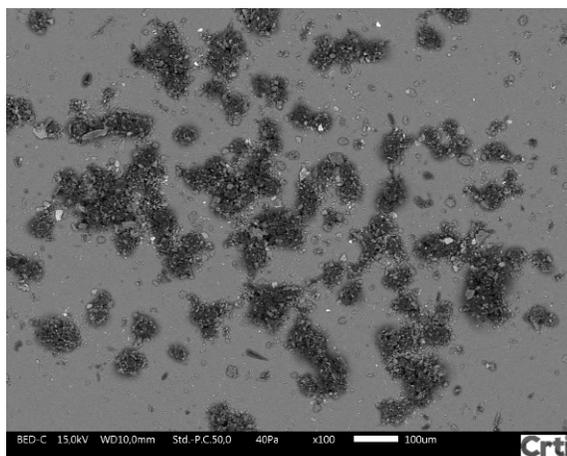


(d)

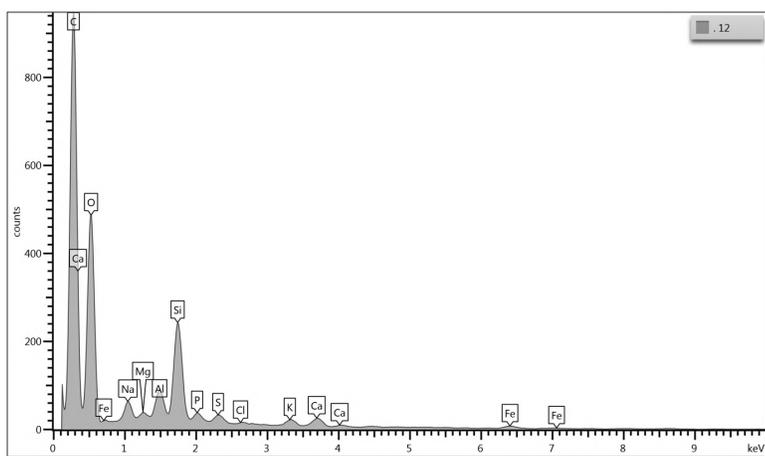


(e)

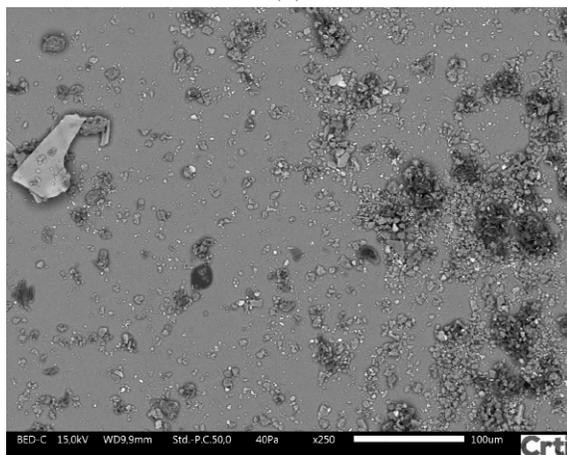
Figura 60: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de julho de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.



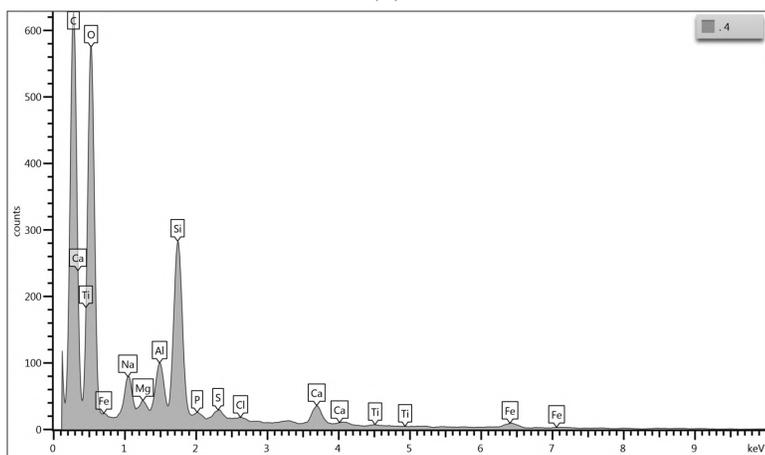
(a)



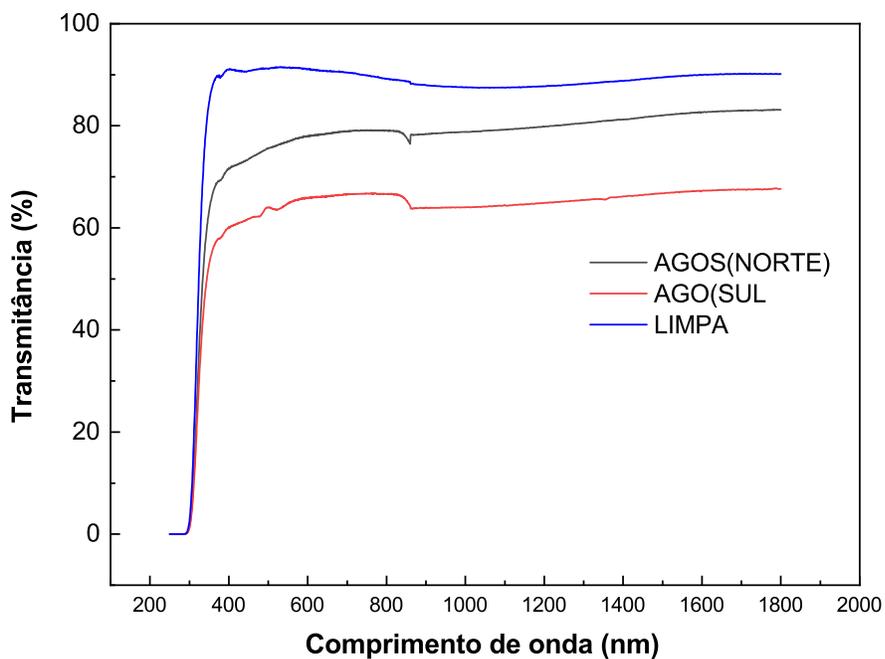
(b)



(c)



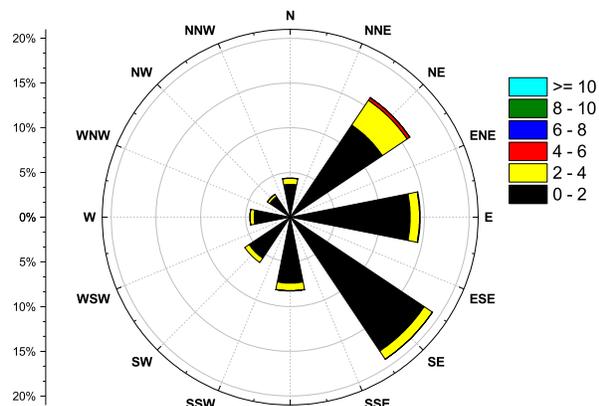
(d)



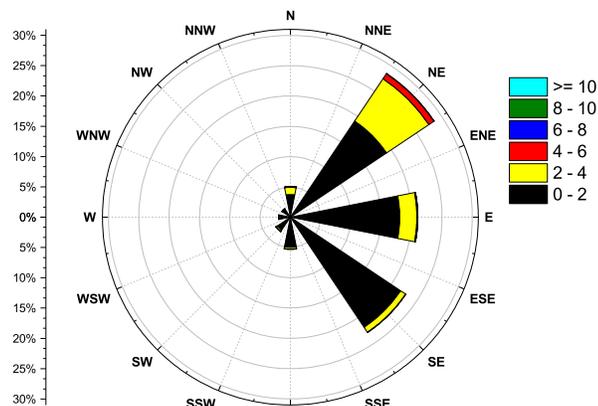
(e)

Figura 61: Microfotografias da sujidade depositada nas lâminas retiradas no mês de agosto de 2018 e respectivos espectros EDS e UV-VIS. (a) e (b): Lâmina instalada na direção sul. (c) e (d): Lâmina instalada na direção norte. (e): Espectro UV-VIS de transmitância das lâminas.

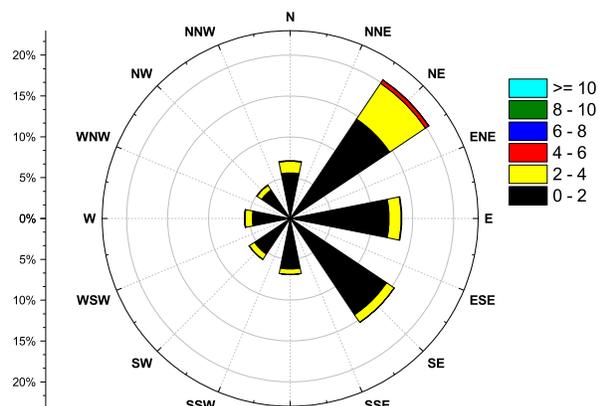
APÊNDICE D - Rosas dos Ventos



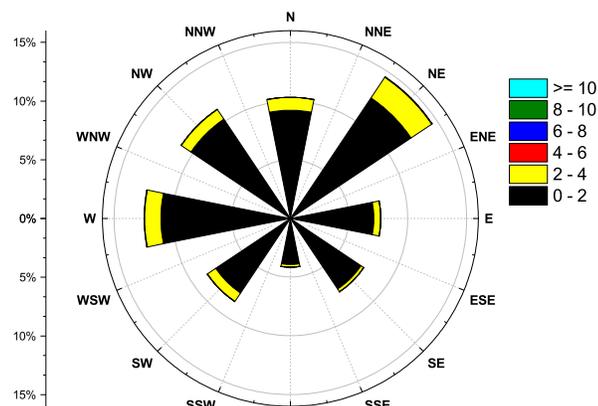
Calms: 23,86873%
Direction Wind
AGOSTO (2017)



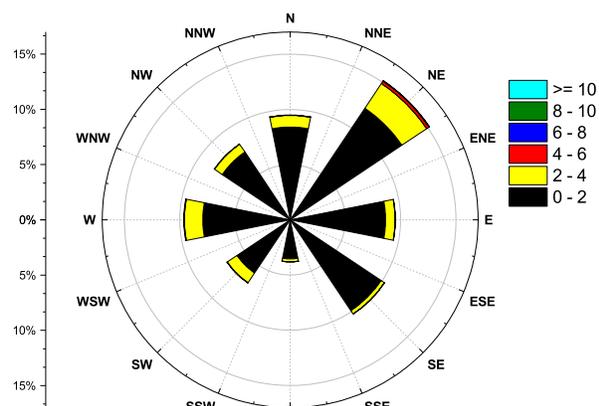
Calms: 10,48611%
Direction Wind
SETEMBRO (2017)



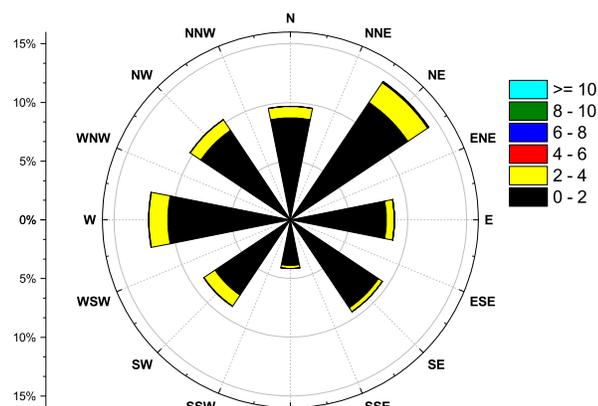
Calms: 19,99776%
Direction Wind
OUTUBRO (2017)



Calms: 23,5103%
Direction Wind
DEZEMBRO (2017)



Calms: 26,90188%
Direction Wind
JANEIRO (2018)



Calms: 22,39583%
Direction Wind
FEVEREIRO (2018)

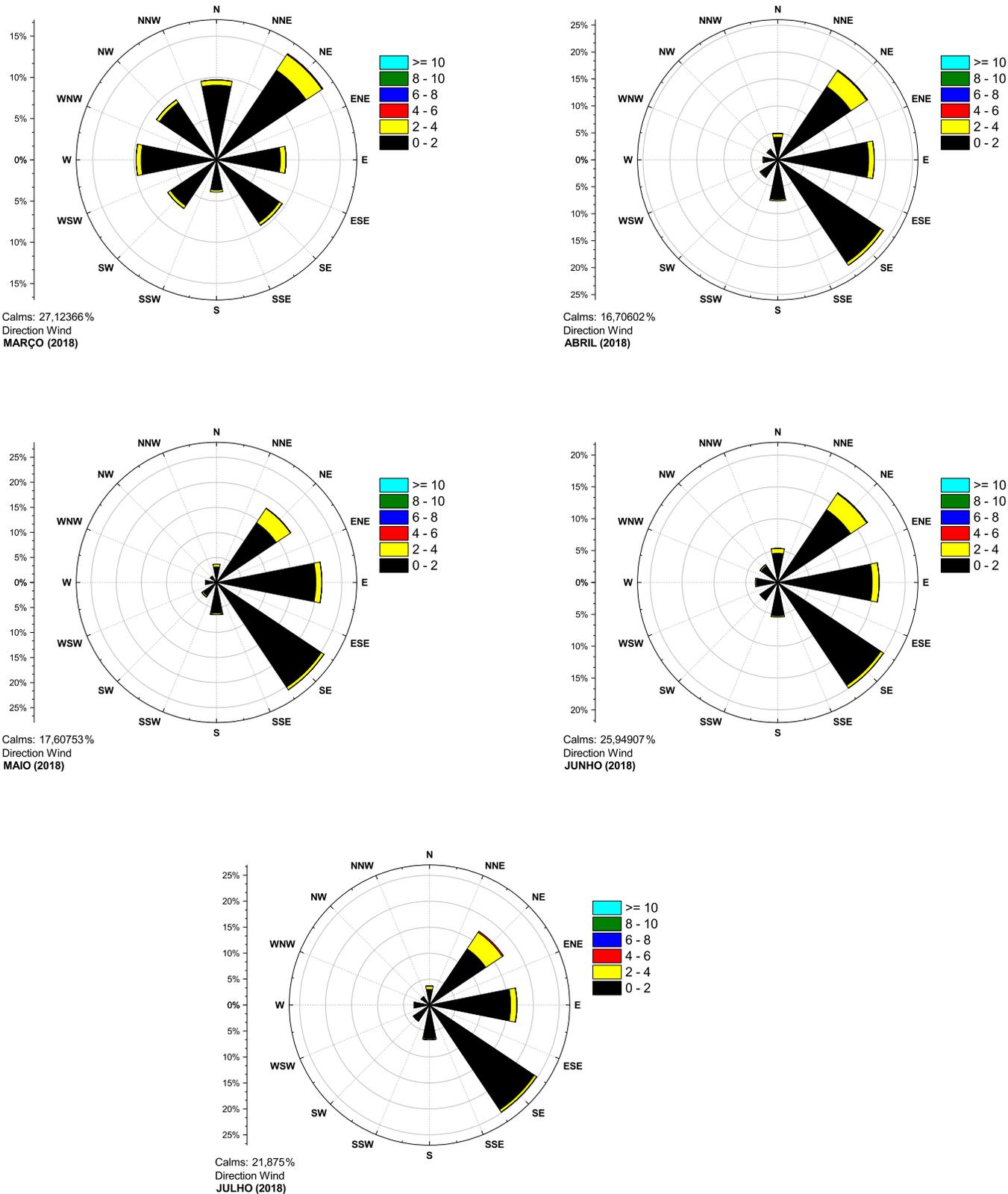


Figura 62: Rosas dos ventos para os meses de setembro a novembro de 2017 e janeiro a agosto de 2018.

APÊNDICE E - Cálculo do Rendimento Global

Neste anexo será apresentado o passo a passo do cálculo da figura de mérito do Rendimento Global para o SFV da EMC/UFG. Para cumprir com este objetivo, foi escolhido o dia 30 de setembro de 2018, por se tratar de uma data próxima ao equinócio. Desta forma, ao final do desenvolvimento será apresentado o PR para este dia.

Os cálculos serão desenvolvidos a partir dos dados de irradiância global no plano horizontal, G_{GH} (medidos em $W.m^{-2}$), obtidos por meio da estação meteorológica da EMC/UFG, cuja frequência de aquisição de dados é igual a 1 minuto. Deste modo, os valores de irradiância foram coletados do minuto 00:00 até o minuto 23:59 do dia 30 de setembro do ano de 2018, totalizando um período de 1440 minutos, ou 24 horas. Estes dados foram obtidos a partir do endereço eletrônico da central meteorológica <http://sites.google.com/site/sfvemcufg>, e, por economia de espaço, não serão disponibilizados neste desenvolvimento.

A partir dos valores coletados minuto a minuto de G_{GH} , para o dia 30/09/2018, pode-se calcular os valores das irradiações globais no plano horizontal, H_{GH} (medidos em $Wh.m^{-2}$), para este mesmo dia. Estes valores de irradiação são calculados para cada hora, desde o final da hora 1 até o final da hora 24 do dia em questão, totalizando 24 pontos.

O cálculo para a obtenção dos valores de H_{GH} é realizado por meio da equação 3, onde:

- H_{GHh} é a irradiação global no plano horizontal calculada para a hora h ;
- G_{GHhi} é a irradiância global no plano horizontal do minuto i da hora h , sendo $1 \leq i \leq 60$ e $1 \leq h \leq 24$.

$$H_{GHh} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} G_{GHhi} \quad (3)$$

Desta forma, para o cálculo da irradiação para a hora 1 (H_{GH1}), tem-se que $H_{GH1} = 1/60 \sum_{i=1}^{60} G_{GH1i}$.

A tabela 8 traz os valores horários da irradiação global no plano horizontal, indicados pela coluna H_{GHh} , para as 24 horas do dia 30 de setembro de 2018, em hora legal.

Os valores de irradiância global no plano horizontal, G_{GH} , devem ser corrigidos para sua projeção no plano inclinado no qual os módulos fotovoltaicos sob análise estão instalados. O ângulo de inclinação, β , dos módulos, em relação ao plano horizontal, é igual a 10° . Os valores da irradiância global no plano inclinado, $G_{G\beta}$, são obtidos por meio da equação 4, proposta por Duffie & Beckman [86], e são computados para cada minuto do dia 30 de setembro de 2018.

$$\frac{G_{G\beta}}{G_{GH}} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_Z} \quad (4)$$

Da equação 4, tem-se que:

Tabela 8: Valores para a irradiação global no plano horizontal e no plano inclinado ($\beta = 10^\circ$) calculados para o dia 30 de setembro de 2018.

Hora (h)	H_{GHh} ($Wh.m^{-2}$)	$H_{G\beta h}$ ($Wh.m^{-2}$)
1	0,058	0,080
2	0,010	0,045
3	0,004	0,049
4	0,007	0,050
5	0,005	0,045
6	0,010	0,161
7	19,664	14,901
8	123,068	110,072
9	166,552	158,237
10	201,265	197,614
11	288,957	289,485
12	391,348	397,558
13	379,977	390,327
14	225,891	234,735
15	359,389	379,124
16	519,016	555,926
17	217,752	240,872
18	73,324	89,037
19	0,594	1,315
20	0,020	0,047
21	0,032	0,042
22	0,014	0,043
23	0,023	0,055
24	0,015	0,052
Total Diário ($Wh.m^{-2}$)	2.966,993	3.059,872

- θ é o ângulo de incidência do raio solar direto no plano inclinado (na superfície do módulo fotovoltaico);
- θ_z é o ângulo azimutal formado pelo azimute local e o raio solar direto.

Os termos do lado direito da igualdade ilustrada pela equação 4 são definidos por Duffie & Beckman [86], e podem ser calculados pelas equações 5 e 6.

$$\begin{aligned} \cos\theta = \operatorname{sen}\delta\operatorname{sen}\phi\cos\beta - \operatorname{sen}\delta\cos\phi\operatorname{sen}\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \\ \cos\delta\operatorname{sen}\phi\operatorname{sen}\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\operatorname{sen}\beta\operatorname{sen}\gamma\operatorname{sen}\omega \end{aligned} \quad (5)$$

$$\cos\theta_z = \cos\delta\cos\omega\cos\phi + \operatorname{sen}\delta\operatorname{sen}\phi \quad (6)$$

Os argumentos das funções trigonométricas contidas nas equações 5 e 6 possuem definições próprias:

- β é o ângulo de inclinação da superfície de captação da radiação solar (superfície do módulo fotovoltaico);
- δ é a declinação solar, e é dado pela equação 7;

$$\delta = 23,45\operatorname{sen}\left[\frac{2\pi}{365}(284 + DJ)\right] \quad (7)$$

- DJ é o dia juliano, sendo igual a 1 para o primeiro dia de janeiro e 365 para o dia 31 de dezembro de um ano;
- ϕ é o ângulo da latitude local, sendo positivo para o hemisfério norte e negativo para o hemisfério sul;
- γ é o ângulo azimutal da projeção da reta normal da superfície de captação (superfície do módulo fotovoltaico) na superfície horizontal em relação ao norte;
- ω é o ângulo horário solar, sendo igual a 0° no meio dia, -90° às 6 h e $+90^\circ$ às 18 h. É calculado por meio da equação 8;

$$\omega = (H_S - 12) \times 15^\circ \quad (8)$$

- H_S é a hora solar, obtida pela correção da hora legal. É calculada por meio da equação 9;

$$H_S = H_L + 4(Lat_{st} - Lat_{loc}) + E \quad (9)$$

- H_L é a hora legal local;
- Lat_{st} é a latitude do meridiano adotado para a hora oficial, em relação ao Meridiano Greenwich. Este valor é dado em módulo;
- Lat_{loc} é a latitude local;
- E é a equação de correção do tempo, calculado pela equação 10;

$$E = (0,000075 + 0,001868\cos\Omega - 0,032077\sin\Omega - 0,014615\cos 2\Omega - 0,04089\sin 2\Omega) \times (229,18) \quad (10)$$

- Ω é calculado pela equação 11, e é expresso em radianos;

$$\Omega = \frac{2\pi(DJ - 1)}{365} \quad (11)$$

É muito importante destacar que estas equações, propostas por Duffie & Beckman [86], são derivadas para o uso no hemisfério norte. Desta maneira, o ângulo azimutal é considerado igual a zero ($\gamma = 0^\circ$) no sul, negativo a leste ($\gamma = -90^\circ$), positivo a oeste ($\gamma = +90^\circ$), e a norte $\gamma = \pm 180^\circ$. As expressões matemáticas propostas devem ser utilizadas a partir destas considerações.

Para o sistema fotovoltaico da EMC/UFG, tem-se que:

- $\phi = -16,68^\circ$;
- $Lat_{loc} = -49,235^\circ$;
- $Lat_{st} = -45^\circ$ (UTC-3, a partir da hora oficial de Goiânia);
- $DJ = 273$ (30 de setembro);
- $\beta = 10^\circ$;
- $\gamma = +165^\circ$;
- $\delta = -3,818^\circ$;
- $\Omega = 4,682$ rad;
- $E = 10,13$ minutos;

Uma vez em posse dos valores fixos de ϕ , β , γ e δ , pode-se calcular os valores do ângulo solar, ω , para cada minuto do dia 30 de setembro de 2018, ou seja, são computados 1440 valores para esta variável.

A partir dos valores obtidos de ω , pode-se utilizar as equações 5 e 6 para se calcular os valores de $\cos\theta$ e $\cos\theta_z$ para cada minuto do dia em questão.

Os valores da irradiância global no plano inclinado, $G_{G\beta}$, são computados para o dia 30 de setembro de 2018, minuto a minuto, a partir da equação 4. Em seguida, pode-se utilizar a equação 12 para se obter os valores da irradiação global no plano inclinado, $H_{G\beta}$, para cada hora do dia analisado. Estes valores são exibidos na tabela 8, na coluna $H_{G\beta h}$. A figura 63 traz uma ilustração comparativa entre as irradiações globais horizontal e inclinada para o dia 30 de setembro de 2018.

$$H_{G\beta h} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} G_{G\beta hi} \quad (12)$$

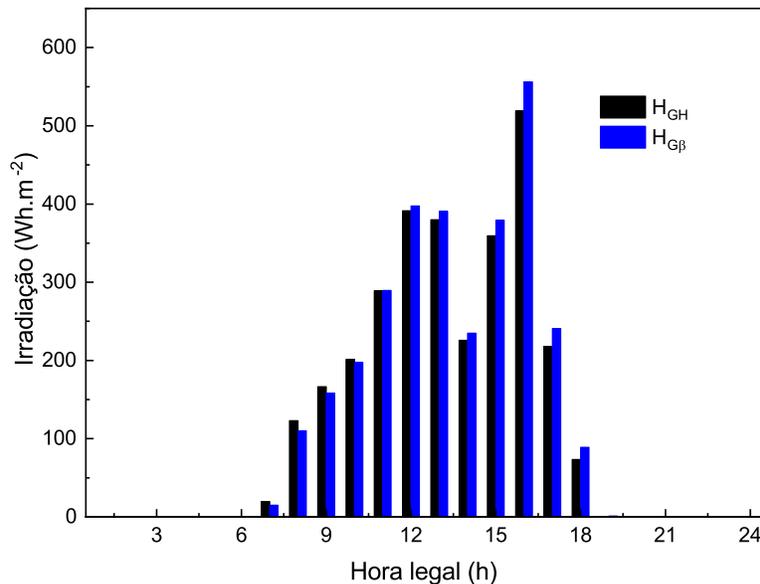


Figura 63: Irradiações globais horizontal, H_{GH} , e inclinada, $H_{G\beta}$, para o dia 30 de setembro de 2018.

Uma vez corrigidos os valores de irradiação para o plano inclinado (plano em que os módulos fotovoltaicos estão instalados), pode-se prosseguir com o cálculo da figura de mérito do rendimento global, PR, dada pela equação 13. O termo Y_{FV} é a produtividade específica do sistema fotovoltaico, sendo computada a partir da equação 14, onde E_{FV} é a energia produzida no período de análise e P_{INST} é a potência instalada, em Wp . O termo G_{ref} é a irradiância padrão de referência ($1000 W.m^{-2}$).

$$PR = \frac{Y_{FV}}{H_{G\beta}/G_{ref}} \quad (13)$$

$$Y_{FV} = \frac{E_{FV}}{P_{INST}} \quad (14)$$

Toma-se como exemplo os 20 módulos instalados ao norte (com $\gamma = 165^\circ$) e conectados ao inversor 3. Cada dispositivo possui potência igual a 235 W_p , resultado uma potência instalada de 4700 W_p para o arranjo.

Sabendo-se que a leitura da energia produzida no dia 30 de setembro de 2018 foi igual a 11,935 kWh, tem-se que:

$$Y_{FV} = \frac{11935 \text{ Wh}}{4700 \text{ W}} = 2,539 \text{ Wh}/W_p$$

Logo, o rendimento global, PR, é calculado como:

$$PR = \frac{Y_{FV}}{H_{G\beta}/1000} = \frac{2,539}{3,060} = 0,830$$

O rendimento global percentual, calculado para os 20 módulos fotovoltaicos conectados ao inversor 3 no dia 30 de setembro de 2018, é igual a 83,0%.

ANEXO A - *Datasheet* dos Módulos Fotovoltaicos

SUN EARTH®

PV-MODULE 235/240/245 W_p
POLYCRYSTALLINE TPB 156×156-60-P



- HIGH PERFORMANCE SILICON MODULES
- CERTIFIED WITH IEC STANDARDS
- 100% INTEGRATED QUALITY CONTROL BY SiG SOLAR GMBH
- GERMAN PERFORMANCE AND PRODUCT WARRANTY
- 10 YEARS PRODUCT WARRANTY
- 25 YEARS 80% PERFORMANCE WARRANTY
10 YEARS 90% PERFORMANCE WARRANTY
- POWER TOLERANCE -0W UP TO +5W
- MODULE EFFICIENCY 15,0% (245 W_p)
- SUN EARTH IS PV CYCLE MEMBER (2012)



SUN EARTH by **SiG**
Energie natürlich mit Service **SOLAR**

SiG Solar GmbH
Ernst-Abbe-Straße 6
D-28816 Stuhr
T + 49 (0) 421.278 37 77
F + 49 (0) 421.278 37 79

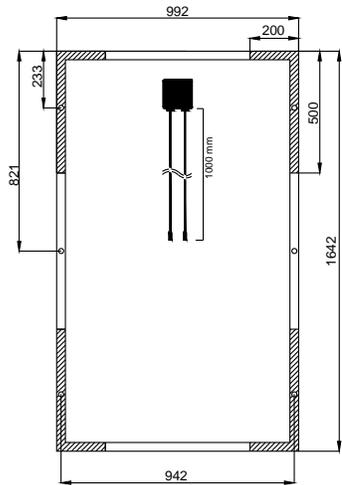
info@sigsolar.com
www.sigsolar.com

TECHNICAL DATA

SUN EARTH®

PV-MODULE 235/240/245 W_p
POLYCRYSTALLINE TPB 156x156-60-P

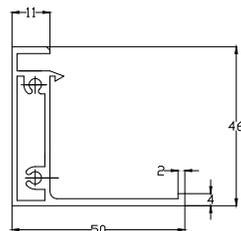
DIMENSIONS



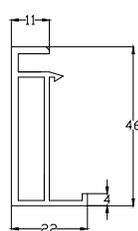
For installation details and further usage of the modules please note the installation and operating manual or consult the technical service.

clamping range

Frame long side



Frame short side



LIMITS

Max. system voltage (IEC):	1000 VDC
Max. reverse-current I _R :	16 A
Operating temperature (environment):	-40 °C up to +85 °C
Max. hail resistance:	25 mm at 23 m/s
Max. wind resistance:	2400 Pa
Max. snow load (front):	5400 Pa
Application class:	A
Fire resistance class:	C
Safety class:	II

TRANSPORT INFORMATION

Packaging unit:	20 per carton
Packaging unit size:	(1680 x 1030 x 980) mm
Packaging unit weight:	420 kg
Packaging unit per 40' container:	28 cartons (560 modules)

ELECTRICAL DATA (STC)

Max. power (P _{mpp}):	235 W	240 W	245 W
Max. voltage (U _{mpp}):	29,2 V	29,3 V	29,4 V
Max. current (I _{mpp}):	8,05 A	8,19 A	8,34 A
Open circuit voltage (U _{oc}):	36,7 V	36,8 V	39,8 V
Short circuit current (I _{sc}):	8,47 A	8,58 A	8,68 A

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Max. power (P _{mpp}):	171,3 W	174,6 W	178,2 W
Max. voltage (U _{mpp}):	26,6 V	26,7 V	26,8 V
Max. current (I _{mpp}):	6,44 A	6,54 A	6,65 A
Open circuit voltage (U _{oc}):	34,0 V	34,1 V	34,2 V
Short circuit current (I _{sc}):	6,86 A	6,95 A	7,03 A

ELECTRICAL DATA (general)

Cell temperature (T _{NOCT}):	46 °C
Module efficiency:	14,4 % 14,7 % 15,0 %
Tolerance of performance:	-0W to +5W

- STC-Irradiation: 1000 W/m²; AM: 1,5; T_c: 25 °C
- NOCT-Irradiation: 800 W/m²; T_a: 20 °C; wind speed: 1 m/s
- Reduction of the module efficiency at decreasing irradiation from 1000 W/m² to 200 W/m² (at AM: 1,5 & T_c: 25 °C) ≤ 4,5% - according EN 60904-1

GENERAL CHARACTERISTICS

Composition:	60 (156 x 156 mm) polycrystalline silicon solar cells per module; 3 bypass-diodes; encapsulant EVA; rear cover TPT
Glass:	highly transparent, anti-reflective solar safety glass; 3,2 mm
Frame:	anodized aluminum
Junction box:	plastic; IP65;
Cable:	4 mm ² ; 1000 mm
Connectors:	MC-T4-compatible

TEMPERATURE COEFFICIENTS

Power:	- 0,45 %/°C
Open circuit voltage:	- 0,35 %/°C
Short circuit current:	0,05 %/°C

MECHANICAL DATA

Height:	1642 mm
Width:	992 mm
Thickness:	46 mm
Weight:	20 kg

CERTIFICATES/STANDARDS

Standards: IEC 61215; IEC 61730; ISO 9001; ISO 14001
Conformity: Datasheet according to DIN EN 50380

ANEXO B - *Datasheet* dos Inversores

THEIA™ HE-t

The THEIA™ HE-t range defines a new level of efficiency, flexibility and user friendliness for isolated string inverters. Suitable for all PV cell technologies, and ready for use all over the world, the THEIA™ HE-t is the perfect choice for any PV installation.



THEIA™ HE-t

SOLAR INVERTERS: 2.0 kW – 4.6 kW

PERFORMANCE

- Maximum efficiency 97.3 % with galvanic isolation
- Suitable for use with all PV modules of any technology, with the ability to ground the positive or the negative terminal on the DC side
- Compliance with the highest international safety standards
- Early startup and high efficiency at low irradiation gives longer operation time and higher energy yields

RELIABILITY

- High quality components, with a robust design
- Bespoke Maximum Power Point Tracking
- Stable operation under extremely dynamic irradiation conditions
- IP65 protection level

EASE OF USE

- Lightweight and easy to install
- With or without DC Disconnect Switch
- Color screen with touch sense buttons
- Intuitive user interface

MONITORING AND COMMUNICATION

- Complete site overview from one single inverter
- Integrated webserver with easy-to-use monitoring software
- Multilanguage display

MODEL	2.0 HE-t	2.9 HE-t	3.8 HE-t	4.4 HE-t	4.6 HE-t
INPUT DATA					
Nominal DC power	2100 W	3000 W	4000 W	4600 W	4800 W
Max. PV power	2625 W _p	3750 W _p	5000 W _p	5750 W _p	6000 W _p
Max. DC voltage	600 V _{dc}				
Voltage range MPPT	230 to 480 V _{dc}	230 to 480 V _{dc}	230 to 480 V _{dc}	230 to 480 V _{dc}	230 to 480 V _{dc} ¹⁾
Max. input current	9.5 A	13.5 A	18.0 A	21.0 A	21.0 A
Number of PV string inputs	3				
Number of MPP trackers	1				
Input features	Reverse polarity protection, Ground fault monitoring, Integral DC switch disconnecter (optional), Integral DC fuses for string inputs (optional), Field configurable for positive or negative grounding, or ungrounded				
OUTPUT DATA					
Nominal output power	2000 W	2900 W	3800 W	4450 W	4600 W
Max apparent power	2000 VA	2900 VA	3800 VA	4450 VA	4600 VA
Nominal AC current	9.0 A	13.0 A	17.0 A	19.5 A	20.0 A
Max. AC current	10.5 A	15.2 A	19.7 A	23.0 A	23.0 A
Mains output voltage	230 Vac (+/-20 %) single or split phase				
Mains frequency	50 Hz / 60 Hz (+/-10 %)				
Cos Phi (power factor)	0.8i to 0.8c selectable				
PERFORMANCE DATA					
Maximum efficiency	97.2 %	97.2 %	97.2 %	97.3 %	97.3 %
CEC efficiency	96.8 %	96.8 %	97.0 %	97.0 %	97.0 %
EU efficiency	96.3 %	96.5 %	96.7 %	96.9 %	96.9 %
Power feed starts at	< 7 W				
Night mode power	< 1 W				
MECHANICAL DATA					
Protection degree (EN 60529)	IP 65				
Dimensions	610 H x 353 W x 154 D mm / 24.02 H x 13.90 W x 6.06 D inches				
Weight	< 19 kg / 42 lbs	< 19 kg / 42 lbs	< 21 kg / 46 lbs	< 21 kg / 46 lbs	< 21 kg / 46 lbs
Cable access	Bottom				
Input cable connection	MC3, MC4, Tyco, Screw terminals, Cable clamp, Others on request				
Output cable connection	Screw terminals, Cable clamp				
DESIGN STANDARDS					
EM compatibility	EN 61000-6-2, EN 61000-6-3				
CE marking	Yes				
Other standards	DIN VDE V 0126-1-1, G83/1, EN 50438, AS 4777, CEI 0-21, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12, IEC 62109-2, IEC 61727, UTE C 15-712-1, C10/11, VDE AR-N 4105, RD1663, G59/2				
ENVIRONMENTAL DATA					
Operating temperature	- 25 °C to + 65 °C / - 13 to + 149 °F (possible power derating above + 45 °C / + 113 °F)				
Storage temperature	- 30 °C to + 80 °C / - 22 to + 176 °F				
Ventilation	Convection cooling				
ADDITIONAL FEATURES			EFFICIENCY CURVE THEIA 4.4 HE-t		
Topology	High frequency transformer, galvanic isolation				
Protection class / Overvoltage category	I / III				
Noise Emission	< 37 dB (A)				
Communication	Graphical, color display with touch sense buttons, Embedded web-server, Ethernet, CAN and RS485 bus interface, 3x LEDs for visual status indication				
Warranty	5 years, 10 years, 15 years, 20 years and 25 years options				
1) Output power limitation 230 Vdc to 250 Vdc					

ANEXO C - Laudos Técnicos

ENCAMINHAMENTO DE ANÁLISES DIFRAÇÃO DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO

Goiânia, 19 de novembro de 2018

1. SOLICITANTE

Instituição: Universidade Federal de Goiás
Solicitante: Enes Gonçalves Marra
A/C: Pedro Romanholo
E-mail: enes@ufg.br / enes.gm@gmail.com

2. AMOSTRA RECEBIDA

1. *Amostra 1: Suj/06-18**

**Nomenclatura adotada pelo usuário*

3. SUMÁRIO

4. MÉTODOS.....	1
4.1 Preparação de amostras.....	1
4.1.1 Método de preparo de amostra para análise de mineralogia por difração de raios X	1
4.1.2 Método de preparo para análise química por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado	2
4.2 Técnicas analíticas	2
4.2.1 Difração de Raios X.....	2
4.2.2 Espectrometria de Emissão Óptica Com Plasma Indutivamente Acoplado	2
5. ELABORAÇÃO E EQUIPE TÉCNICA	2
6. RESULTADOS	3
6.1. Mineralogia por difração de raios X	4
6.1.1. AMOSTRA 01 – SUJ 06-18.....	4
6.2. Química obtida por ICP OES.....	5

4. MÉTODOS

4.1 Preparação de amostras

4.1.1 Método de preparo de amostra para análise de mineralogia por difração de raios X

Para a homogeneização e redução da granulometria, a amostra foi pulverizada em almofariz (ágata). Em seguida a amostra foi montada em porta amostras do tipo *backload* e levada ao equipamento para a coleta do difratograma. Para realizar a quantificação do material de baixa cristalinidade ou amorfo, foi preparada uma mistura homogênea na proporção de 10% de Al₂O₃ e 90% de amostra. Em seguida a mistura foi montada em porta amostras do tipo *backload* e levada ao equipamento para a coleta do difratograma.

4.1.2 Método de preparo para análise química por espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado

As amostras foram inicialmente secas em estufa a 105°C por 12 horas. Para determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI), as amostras foram calcinadas 1000°C por 5 horas. Uma alíquota de 100 mg de amostra previamente calcinada foi fundida com 900 mg de tetraborato de lítio.

A pérola fundida foi macerada em gral de ágata até formar um pó fino. O pó resultante foi dissolvido em solução de HNO₃ 5% e posteriormente a solução foi diluída de modo a obter um teor de sólidos de dissolvidos de 1% para análise.

4.2 Técnicas analíticas

4.2.1 Difração de Raios X

A medida de difração de raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro *Bruker D8 Discover*. Utilizou-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador *Johansson* para K α 1 operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano θ -2 θ , detector unidimensional *Lynxeye*[®], 2 θ de 5° a 80° e passo de 0,05°. A amostra foi mantida em rotação de 15 rpm. A composição e proporção modal foi obtida pelo método de Rietveld, utilizando o software *TOPAS*[®] Versão 4.2, em que se baseia no ajuste de uma composição calculada ao difratograma experimental.

4.2.2 Espectrometria de Emissão Óptica Com Plasma Indutivamente Acoplado

As medidas de concentração foram realizadas por Espectrometria de Emissão Ótica com fonte de Plasma (ICP-OES) modelo PerkinElmer Optima 8300. A análise foi realizada utilizando uma potência de indução do plasma de 1500 W com fluxo de argônio de 15 L/min utilizando visualização axial. Para realizar a calibração, utilizou-se 11 diferentes padrões de rocha certificados preparados e solubilizados nas mesmas condições. A curva de calibração foi ajustada para cada elemento de modo a obter um coeficiente de correlação de no mínimo 0,999.

5. ELABORAÇÃO E EQUIPE TÉCNICA

 Ma. Flávia Gomes de Souza <i>Difração de Raios X</i>
 Ma. Flávia Carneiro Gonçalves <i>Espectrometria de ICP-OES</i>
 Dr. Vinicius Ferraz Guimarães <i>Supervisão Técnica</i>

6. RESULTADOS

O resultado da análise de difração de raios X está apresentado na figura 1, com a proporção modal da mineralogia exibida na tabela 1. Fases minerais minoritárias presentes em concentrações da ordem de 0,5% ou menores estão abaixo do limite de quantificação da técnica utilizada (<LQ). Para a quantificação da fase amorfa ou de baixa cristalinidade, optou-se por adicionar quantidades conhecidas (10%) de padrão interno (Al_2O_3). Não é possível identificar esta fase por DRX, podendo tratar-se de material orgânico, vidro ou material amorfo. Os resultados obtidos por ICP-OES estão reportados em base úmida na tabela 2.

6.1. Mineralogia por difração de raios X

6.1.1. AMOSTRA 01 – SUJ 06-18

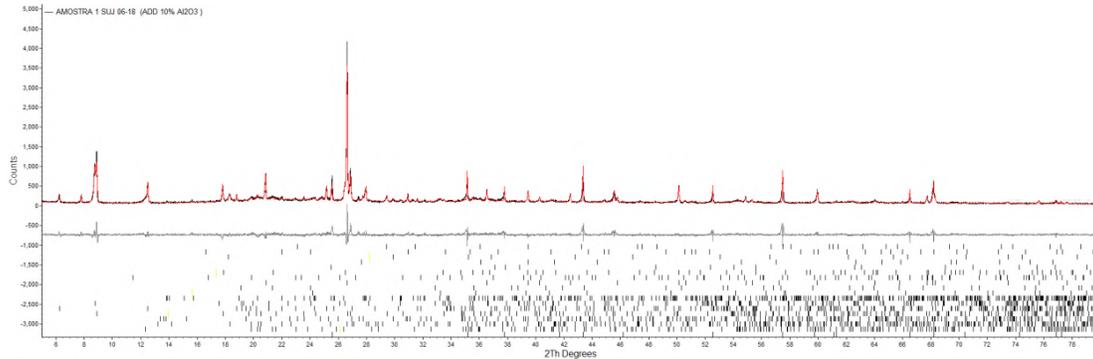


Figura 1 - Difratoograma da amostra *SUJ 06-18*, com o refinamento Rietveld, usando o programa Topas 4.2. A curva pontilhada em preto corresponde ao difratograma medido, a curva em vermelho ao difratograma calculado e a curva cinza, abaixo, à diferença entre calculado e medido. O parâmetro de qualidade de ajuste, nesse caso, foi $GOF = 1,88$.

Tabela 1 - Determinação da proporção modal das fases minerais cristalinas pelo método de Rietveld da *SUJ 06-18*.

Análise Quantitativa pelo Método de Rietveld	
<i>SUJ 06-18</i>	
Mineral	%
Gibbsita	10,33
Ilmenita	1,37
Goethita	<LQ
Hematita	1,59
Magnetita	<LQ
Ortoclásio	1,76
Anatásio	<LQ
Rutilo	<LQ
Muscovita	2,66
Clorita Clinocloro	2,02
Caolinita	10,81
Biotita	1,21
Quartzo	21,38
Oligoclásio	4,81
Calcita	0,65
Dolomita	0,82
Apatita	<LQ
Material de baixa cristalinidade (amorfo)	39,88

(<LQ) = Proporção abaixo do limite quantificável.

6.2. Química obtida por ICP OES

Tabela 2 - Análise química dos elementos analisados.

Óxidos Analisados (%)	λ (nm)	Amostra Analisada
		(Base Úmida)
		Suj/06-18
SiO₂	251,611	23,61
TiO₂	334,940	0,90
Al₂O₃	396,153	11,68
Fe₂O₃	259,939	7,52
MnO	257,610	0,05
MgO	280,271	1,26
CaO	317,933	2,60
Na₂O	589,592	0,44
K₂O	766,490	1,57
P₂O₅	213,617	0,54
LOI		49,93
Total		100,10

λ = comprimento de onda de emissão do elemento químico analisado.

RELATÓRIO DE ENSAIO NÚMERO 18929/2018 - 0 - A

AMOSTRA NÚMERO:16939/2018

Dados do Cliente

Cliente: PEDRO VICTOR VALADARES ROMANHOLO

Município: Goiânia-GO

Endereço: Rua 58, Ed. Residencial Caraíbas, 20 Qd BC 06, Jardim Goiás.

Dados da Amostra

Material: Swab	SIF: ---	Data da Coleta: 14/06/18 12:00
Ponto de Coleta: ---	Coletor da Amostra: Interessado	Data entrada laboratório: 15/06/2018 11:55:00
		Data da elaboração do relatório: 05/07/18 15:36
		Plano de Amostragem: 2036/2018

Parâmetros	Resultados	Unidade	LQ	*Método	Data de Análise
Bolores e leveduras	1,9 x 10 ²	UFC/cm ²	1,0	SMWW 9215	16/06/18
Coliformes termotolerantes	Ausente	NMP/cm ²	1,8	SMWW 9221E	16/06/18
Coliformes totais	Ausente	NMP/cm ²	1,8	SMWW 9221C	16/06/18
Estafilococos aureus	Ausente	UFC/cm ²	1,0	MAPA	16/06/18
Mesófilos	8,0 x 10 ²	UFC/cm ²	1,0	MAPA	16/06/18

OBSERVAÇÕES

1 - Amostra coletada, transportada e enviada pelo interessado.

Declaração da Incerteza de Medição

Nos arquivos da Gerência da Qualidade constam a incerteza expandida (U), que é baseada na incerteza padrão combinada, com um nível de confiança de 95% (k=2), que será disponibilizada sempre que solicitado pelo cliente.

***Método de Referência:**

SMWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22ed;
EPA - US Environmental Protection Agency;
CPP - Kit Microscistinas Beacon Analytical Sistemas Inc.

Legenda:

LQ: Limite de quantificação do método;

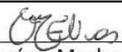
NA: Não aplica;

VA: Virtualmente ausente.

Responsabilidade Técnica: Os ensaios foram realizados sob a responsabilidade técnica do profissional Wanderlei Elias Perez, CRF/GO nº 1250

Revisores:

Lee Anderson Gomes Viana


Thaíssa Machado Elias

GOIÂNIA - GO: 05/07/2018

PROIBIDA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA - OS RESULTADOS REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ANALISADAS

RELATÓRIO DE ENSAIO NÚMERO 18931/2018 - 0 - A

AMOSTRA NÚMERO:16941/2018

Dados do Cliente

Cliente: PEDRO VICTOR VALADARES ROMANHOLO

Município: Goiânia-GO

Endereço: Rua 58, Ed. Residencial Caraíbas, 20 Qd BC 06, Jardim Goiás.

Dados da Amostra

Material: Swab

Ponto de Coleta: ---

SIF: ---

Coletor da Amostra: Interessado

Data da Coleta: 14/06/18 12:20

Data entrada laboratório: 15/06/2018 11:55:00

Data da elaboração do relatório: 05/07/18 15:38

Plano de Amostragem: 2036/2018

Parâmetros	Resultados	Unidade	LQ	*Método	Data de Análise
Bolores e leveduras	4,0 x 10 ¹	UFC/cm ²	1,0	SMWW 9215	16/06/18
Coliformes termotolerantes	Ausente	NMP/cm ²	1,8	SMWW 9221E	16/06/18
Coliformes totais	Ausente	NMP/cm ²	1,8	SMWW 9221C	16/06/18
Estafilococos aureus	Ausente	UFC/cm ²	1,0	MAPA	16/06/18
Mesófilos	1,0 x 10 ¹	UFC/cm ²	1,0	MAPA	16/06/18

OBSERVAÇÕES

1 - Amostra coletada, transportada e enviada pelo interessado.

Declaração da Incerteza de Medição

Nos arquivos da Gerência da Qualidade constam a incerteza expandida (U), que é baseada na incerteza padrão combinada, com um nível de confiança de 95% (k=2), que será disponibilizada sempre que solicitado pelo cliente.

***Método de Referência:**

SMWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22ed;
EPA - US Environmental Protection Agency;
CPP - Kit Microscistinas Beacon Analytical Sistemas Inc.

Legenda:

LQ: Limite de quantificação do método;

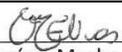
NA: Não aplica;

VA: Virtualmente ausente.

Responsabilidade Técnica: Os ensaios foram realizados sob a responsabilidade técnica do profissional Wanderlei Elias Perez, CRF/GO nº 1250

Revisores:

Lee Anderson Gomes Viana


Thaíssa Machado Elias

GOIÂNIA - GO: 05/07/2018

PROIBIDA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA - OS RESULTADOS REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ANALISADAS

RELATÓRIO DE ENSAIO NÚMERO 18930/2018 - 0 - A

AMOSTRA NÚMERO:16940/2018

Dados do Cliente

Cliente: PEDRO VICTOR VALADARES ROMANHOLO

Município: Goiânia-GO

Endereço: Rua 58, Ed. Residencial Caraíbas, 20 Qd BC 06, Jardim Goiás.

Dados da Amostra

Material: Swab	SIF: ---	Data da Coleta: 14/06/18 12:20
Ponto de Coleta: ---	Coletor da Amostra: Interessado	Data entrada laboratório: 15/06/2018 11:55:00
		Data da elaboração do relatório: 05/07/18 15:37
		Plano de Amostragem: 2036/2018

Parâmetros	Resultados	Unidade	LQ	*Método	Data de Análise
Bolores e leveduras	1,0 x 10 ¹	UFC/cm ²	1,0	SMWW 9215	16/06/18
Coliformes termotolerantes	Ausente	NMP/cm ²	1,8	SMWW 9221E	16/06/18
Coliformes totais	Ausente	NMP/cm ²	1,8	SMWW 9221C	16/06/18
Estafilococos aureus	Ausente	UFC/cm ²	1,0	MAPA	16/06/18
Mesófilos	< 1,0 x 10 ⁰	UFC/cm ²	1,0	MAPA	16/06/18

OBSERVAÇÕES

1 - Amostra coletada, transportada e enviada pelo interessado.

Declaração da Incerteza de Medição

Nos arquivos da Gerência da Qualidade constam a incerteza expandida (U), que é baseada na incerteza padrão combinada, com um nível de confiança de 95% (k=2), que será disponibilizada sempre que solicitado pelo cliente.

Legenda:

LQ: Limite de quantificação do método;

NA: Não aplica;

VA: Virtualmente ausente.

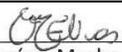
***Método de Referência:**

SMWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22ed;
EPA - US Environmental Protection Agency;
CPP - Kit Microscistinas Beacon Analytical Sistemas Inc.

Responsabilidade Técnica: Os ensaios foram realizados sob a responsabilidade técnica do profissional Wanderlei Elias Perez, CRF/GO nº 1250

Revisores:

Lee Anderson Gomes Viana


Thaíssa Machado Elias

GOIÂNIA - GO: 05/07/2018

PROIBIDA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA - OS RESULTADOS REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ANALISADAS

ANEXO D - Carta Solar para o SFV da EMC/UFG

Carta solar elaborada a partir do software online disponibilizado de forma gratuita pela Universidade de Oregon [87].

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: -16.68; Long: -49.24
(Solar) time zone: -3

Estimated annual AC output:

