

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALESSANDRA COMERIO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE SUJIDADE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

VITÓRIA

2019

ALESSANDRA COMERIO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE SUJIDADE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Jussara Farias Fardin

VITÓRIA

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C732a Comerio, Alessandra, 1992-
Avaliação do impacto de sujidade de módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica / Alessandra Comerio. - 2019.
104 f. : il.

Orientadora: Jussara Farias Farias.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia solar. 2. Sistemas fotovoltaicos. 3. Poluição do ar.
4. Eficiência energética. I. Farias Farias, Jussara. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 621.3

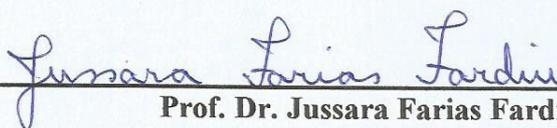
ALESSANDRA COMERIO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE SUJIDADE DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

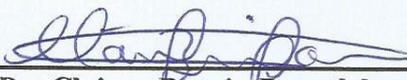
Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 25 de março de 2019.

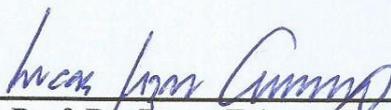
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora



Prof. Dr. Clainer Bravin Donadel
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde, força e persistência para superar todos os obstáculos durante esta caminhada.

Ao meu esposo pelo companheirismo, paciência e incentivo nos momentos de desânimo e cansaço.

À minha família, em especial aos meus pais, que me forneceram educação e caráter para me tornar o que sou hoje.

À minha orientadora Jussara Farias Fardin pela oportunidade e apoio.

Ao professor Pablo Rodrigues Muniz, pela sua participação efetiva na orientação e pela sugestão do tema do trabalho, pela disponibilidade, conhecimento compartilhado e incentivo que foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo – PPGEE UFES, pelos conhecimentos compartilhados.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

Ao Laboratório de Solos Betume e Concreto do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, em especial a Geórgia Serafim Araújo, pelas contribuições técnicas e pela cessão de espaço e equipamentos utilizados na preparação das amostras dos experimentos.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do IFES – PROPEMM, em especial ao Ricardo Bodrini, por operar o Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV para caracterizar as amostras dos experimentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo – FAPES, pelo financiamento desta pesquisa e pelo apoio através do Edital FAPES/CNPq Nº 04/2017 – PPP – PROGRAMA PRIMEIROS PROJETOS.

Ao Laboratório de Energias do IFES que cedeu a estufa para realizar a secagem das amostras.

Aos integrantes do grupo de pesquisa deste trabalho pelo comprometimento e pela troca de conhecimento.

“O segredo do sucesso é a constância do propósito”.

(Benjamin Disraeli)

RESUMO

A matriz elétrica brasileira é composta em sua maioria por energia hidráulica. Entretanto, devido à influência de fatores climáticos, há uma redução na geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas a cada ano, favorecendo o crescimento de outras fontes de energia renováveis. Dentre essas diversas fontes, a energia solar tem baixo impacto ambiental e alto potencial de produção devido à sua disponibilidade. Com o barateamento dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica, a produção de energia solar tem crescido em todo mundo, inclusive no Brasil. No entanto, a redução da capacidade de geração de energia elétrica ocasionada pelo depósito de sujeira nas superfícies dos módulos fotovoltaicos geralmente não é levado em conta na estimativa do custo da energia solar. A deposição de poeira na superfície de um módulo fotovoltaico atenua a irradiância solar incidente acarretando perdas de energia elétrica gerada e perdas econômicas, diminuindo as receitas ou créditos financeiros. Dessa forma, o presente trabalho visa desenvolver um modelo matemático empírico que estime a redução da capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico a partir da caracterização de sujeira depositada sobre sua superfície. Com base nessa estimativa, será possível realizar uma viabilidade econômica de instalação de um sistema fotovoltaico mais realista, uma vez que as análises econômicas atuais sobrestimam as entradas e subestimam as saídas do fluxo de caixa, produzindo análises otimistas para os investidores desse setor.

Palavras-chave: Energia Solar. Sistemas Fotovoltaicos. Poluição do ar. Eficiência Energética.

ABSTRACT

The Brazilian electrical matrix is composed mostly of hydraulic energy. However, due to the influence of climatic factors, there is a reduction in the generation of electricity through the hydroelectric plants each year, favoring the growth of other renewable energy sources. Among those, solar energy has low environmental impact and high production potential due to its availability. With the cheapening of photovoltaic systems of electric power generation, production of solar energy has grown worldwide, including in Brazil. However, the reduction of the electric power generation capacity caused by the deposit of dirt on the surfaces of the photovoltaic modules is generally not taken into account when estimating the cost of solar energy. Deposition of dust on the surface of a photovoltaic module attenuates the incident solar irradiance, causing losses of generated electric energy and economic losses, reducing the revenues or financial credits. Thus, this present work aims to develop an empirical mathematical model that estimates the reduction of the electric power generation capacity of the photovoltaic module from the characterization of dirt deposited on its surface. Based on this estimation, it will be possible to perform an economic feasibility of installing a more realistic photovoltaic system, since current economic analyzes overestimate the inflows and underestimate the outflows of the cash flow, producing optimistic analyzes for investors in this sector.

Keyword: Solar Energy. Photovoltaic Systems. Air pollution. Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Contribuição de fontes renováveis na capacidade de geração de energia elétrica – ano de 2017 | 15 |
| Figura 2 - Capacidades de eletricidade renovável exceto hidrelétrica, no mundo, UE 28, BRICS e sete principais países, final de 2017..... | 16 |
| Figura 3 - Oferta interna de energia elétrica – ano de 2017 | 17 |
| Figura 4 - Capacidade de eletricidade solar fotovoltaica global e adições anuais, 2017 | 19 |
| Figura 5 - Capacidade solar fotovoltaica global, por país e região, 2017 | 19 |
| Figura 6 - Irradiância solar - célula de referência suja (<i>GDC</i>) e limpa (<i>GCC</i>)..... | 22 |
| Figura 7 - Relação das perdas diárias causadas pela sujeira versus precipitação pluviométrica diária em um sistema fotovoltaico | 23 |
| Figura 8 - Região de estudo | 24 |
| Figura 9 - Distribuição geográfica dos pontos de coleta de PS na RMGV | 25 |
| Figura 10 - Distribuição das taxas de emissão de MP por fonte emissora na RMGV27 | |
| Figura 11 - Contribuição percentual das fontes de PS nas estações de monitoramento e ponto de coleta da RMGV | 29 |
| Figura 12 - Curva <i>I-V</i> para 4 módulos conectados em série com e sem sombreamento parcial em uma célula..... | 31 |
| Figura 13 - Influência da irradiância solar na curva característica <i>I-V</i> de uma célula fotovoltaica de silício cristalino à temperatura de 25°C | 32 |
| Figura 14 - Influência da temperatura própria da célula fotovoltaica na cura <i>I-V</i> (para irradiância 1000 W/m ² , espectro AM1,5) | 33 |
| Figura 15 - Impacto da velocidade do vento na diferença de temperatura entre a temperatura do módulo e a temperatura ambiente (T_c-T_a) | 35 |
| Figura 16 - Influência da umidade relativa do ar na eficiência do módulo fotovoltaico | 36 |
| Figura 17 - Efeito da umidade na força de adesão..... | 36 |
| Figura 18 - Principais tipos de degradação nos módulos fotovoltaicos | 37 |
| Figura 19 - Representação do sistema físico real | 39 |
| Figura 20 - Série histórica de precipitação mensal entre os anos de 1984 e 2014 na estação meteorológica de Vitória/ES | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 - Localização do sistema fotovoltaico..... | 43 |
| Figura 22 - Microinversores da APsystem instalados..... | 45 |
| Figura 23 - Fluxograma de aquisição de dados da geração de energia elétrica | 46 |
| Figura 24 - Diagrama elétrico da instalação do sistema fotovoltaico..... | 46 |
| Figura 25 - Sistema fotovoltaico utilizado no projeto de pesquisa | 47 |
| Figura 26 - Armazenamento das amostras em recipientes de vidro | 51 |
| Figura 27 - Módulos fotovoltaicos com aplicação da sujidade tipo carvão | 52 |
| Figura 28 - Tamanho das partículas da amostra de pó de carvão mineral..... | 54 |
| Figura 29 - Tamanho das partículas da amostra de pó de minério de ferro..... | 55 |
| Figura 30 - Tamanho das partículas da amostra de pó de construção civil..... | 56 |
| Figura 31 - Tamanho das partículas da amostra de pó de pedreira | 57 |
| Figura 32 - Composição química da amostra de carvão | 59 |
| Figura 33 - Composição química da amostra de minério de ferro..... | 59 |
| Figura 34 - Composição química da amostra de pó de construção civil..... | 60 |
| Figura 35 - Composição química da amostra de pó de pedreira | 60 |
| Figura 36 - Zona de rejeição do teste Z..... | 61 |
| Figura 37 - Regressão linear da sujidade pó de carvão mineral | 73 |
| Figura 38 - Regressão linear da sujidade pó de construção civil | 76 |
| Figura 39 - Regressão linear da sujidade pó de pedreira..... | 78 |
| Figura 40 - Regressão linear da sujidade pó de minério de ferro..... | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Localização dos pontos de monitoramento de PS na RMGV | 26 |
| Tabela 2 - Dados elétricos módulos fotovoltaicos | 43 |
| Tabela 3 - Dados elétricos microinversores fotovoltaicos..... | 45 |
| Tabela 4 - Quantidade de sujidade e o respectivo tempo simulado sem limpeza para cada módulo fotovoltaico..... | 50 |
| Tabela 5 - Cronograma dos experimentos | 52 |
| Tabela 6 - Variáveis a serem medidas durante a execução dos experimentos..... | 53 |
| Tabela 7 - Média e desvio padrão das potências elétricas gerada pelos módulos fotovoltaicos | 63 |
| Tabela 8 - p-valores para o teste de hipóteses da caracterização dos módulos fotovoltaicos | 64 |
| Tabela 9 - Calibração dos instrumentos..... | 67 |
| Tabela 10 – Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de carvão mineral.. | 69 |
| Tabela 11 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de carvão mineral | 70 |
| Tabela 12 - Resumo dos resultados da regressão linear de grau 1 para a sujidade pó de carvão mineral..... | 71 |
| Tabela 13 - Resumo dos resultados da regressão linear de grau 2 para a sujidade pó de carvão mineral..... | 71 |
| Tabela 14 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de carvão mineral | 72 |
| Tabela 15 - Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de construção civil.. | 74 |
| Tabela 16 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de construção civil | 74 |
| Tabela 17 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de construção civil..... | 75 |
| Tabela 18 - Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de pedraira | 76 |
| Tabela 19 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de pedraira | 77 |
| Tabela 20 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de pedraira..... | 78 |
| Tabela 21 - Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de minério de ferro. | 79 |
| Tabela 22 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de minério de ferro ... | 80 |

| | |
|---|----|
| Tabela 23 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de minério de ferro..... | 80 |
| Tabela 24 - p-valores para teste de hipóteses dos diferentes tipos de sujidade correspondente a 7 dias sem limpeza..... | 82 |
| Tabela 25 - p-valores para teste de hipóteses dos diferentes tipos de sujidade correspondente a 14 dias sem limpeza..... | 82 |
| Tabela 26 - p-valores para teste de hipóteses dos diferentes tipos de sujidade correspondente a 30 dias sem limpeza..... | 83 |
| Tabela 27 - Contribuição percentual das sujidades estudadas nas estações de monitoramento | 84 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Recursos físicos utilizados na realização dos experimentos..... | 47 |
|--|----|

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|--|
| ABEEólica | Associação Associação Brasileira de Energia Eólica |
| ABSOLAR | Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| BIG | Banco de Informações de Geração |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| ERA | Energias Renováveis de Angola SARL |
| ES | Espírito Santo |
| GD | Geração Distribuída |
| GUM | <i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i> |
| GWp | Giga Watt-pico |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| IEMA | Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos |
| IFES | Instituto Federal do Espírito Santo |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| IPEA | Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada |
| IRENA | <i>International Renewable Energy Agency</i> |
| LER | Leilão de Energia de Reserva |
| MEV | Microscópio de Varredura Eletrônica |
| MP | Material Particulado |
| MPPT | Rastreador do Ponto de Máxima Potência, do inglês <i>Maximum Power Point Tracking</i> |
| NOCT | Temperatura Nominal de Operação da Célula, do inglês <i>Nominal Operating Cell Temperature</i> |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PROPEMM | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais |

| | |
|--------|---|
| PS | Partículas Sedimentadas |
| RAMQAr | Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar |
| RMGV | Região Metropolitana da Grande Vitória |
| SEAMA | Secretaria Estadual de Meio Ambiente |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| STC | Condições Padrões de Teste, do inglês <i>Standard Test Conditions</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 13 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 13 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 13 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 13 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 14 |
| 2.1 | ENERGIAS RENOVÁVEIS..... | 14 |
| 2.2 | PEQUENO HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA..... | 18 |
| 2.3 | DEPÓSITO DE SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS | 20 |
| 2.4 | TIPOS DE SUJIDADE MAIS FREQUENTES NO ESPÍRITO SANTO | 23 |
| 2.4.1 | Região de estudo | 23 |
| 2.4.1 | Rede de monitoramento da qualidade do ar | 24 |
| 2.4.1 | Fontes emissoras de partículas sedimentadas | 25 |
| 2.5 | OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM NA PERDA DE RENDIMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO..... | 30 |
| 2.5.1 | Influência do sombreamento | 30 |
| 2.5.1 | Influência da irradiância solar..... | 32 |
| 2.5.2 | Influência da temperatura..... | 32 |
| 2.5.3 | Influência da velocidade do vento | 34 |
| 2.5.4 | Influência da umidade relativa do ar..... | 35 |
| 2.5.5 | Influência da degradação natural | 37 |
| 2.5.1 | Considerações finais | 38 |
| 3 | METODOLOGIA | 39 |
| 3.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 39 |
| 3.2 | SISTEMA PROPOSTO | 39 |
| 3.3 | SISTEMA FOTOVOLTAICO UTILIZADO..... | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1 | Dados técnicos do sistema fotovoltaico | 42 |
| 3.3.2 | Recursos físicos utilizados | 47 |
| 3.4 | PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS..... | 49 |
| 3.4.1 | Preparação das amostras | 49 |
| 3.4.2 | Limpeza e pulverização das amostras sobre os módulos fotovoltaicos | 51 |
| 3.4.3 | Medição das variáveis de interesse | 52 |
| 3.5 | CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS..... | 53 |
| 3.5.1 | Análise do tamanho das partículas | 53 |
| 3.5.1 | Análise da composição química das partículas | 57 |
| 3.6 | TESTE DE HIPÓTESE..... | 61 |
| 3.7 | CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS | 62 |
| 3.8 | ANÁLISE DOS DADOS DA GERAÇÃO..... | 65 |
| 3.8.1 | Correção da potência medida | 65 |
| 3.8.2 | Erro e incerteza das medições..... | 67 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 69 |
| 4.1 | SUJIDADE: PÓ DE CARVÃO MINERAL | 69 |
| 4.1.1 | Regressão linear | 70 |
| 4.2 | SUJIDADE: PÓ DE CONSTRUÇÃO CIVIL | 73 |
| 4.3 | SUJIDADE: PÓ DE PEDREIRA | 76 |
| 4.4 | SUJIDADE: PÓ DE MINÉRIO DE FERRO..... | 79 |
| 4.5 | ANÁLISE ENTRE OS TIPOS DE SUJIDADE..... | 81 |
| 4.6 | GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NOS DIFERENTES BAIRROS | 83 |
| 4.7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 84 |
| 5 | CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS | 86 |
| 5.1 | TRABALHOS FUTUROS | 87 |
| | REFERÊNCIAS..... | 89 |

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das principais fontes de energia do mundo e seu uso é primordial na sociedade moderna. Em virtude do rápido crescimento da economia global e do aumento da preocupação ambiental a partir da década de 90, a energia limpa¹ tornou-se atenção mundial (WANG; WANG; SU, 2011; SHADDEL; JAVAN; BAGHERNIA, 2016), aumentando dessa forma o peso das energias renováveis² na matriz elétrica³ mundial (GRIJÓ, 2014).

Um aspecto a ser considerado na implantação de aproveitamentos de fontes renováveis de energia é o seu custo. De acordo com Pomilio (2017), tem ocorrido uma importante redução no custo dos principais elementos dos sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, o que tem tornado atrativa a utilização desse tipo de energia nos dias atuais. Segundo Shaddel, Javan e Baghernia (2016), acredita-se que dentre os diferentes tipos de fontes de energia renováveis, a energia solar é a que melhor substitui as fontes provenientes de combustíveis fósseis devido à sua disponibilidade e características ambientalmente amigáveis, pois emitem baixos ruídos e os impactos ambientais são reduzidos. A energia solar também possibilita a instalação de plantas de pequena e média escala em edifícios residenciais e comerciais (PEREIRA et al., 2017), não sendo necessário um espaço destinado somente à sua instalação.

Segundo REN21 (2018), em 2017 houve um crescimento mundial não visto há anos no mercado fotovoltaico, cuja capacidade instalada cresceu de cerca de 76GWp⁴ para mais de 98GWp, impulsionado principalmente por China, EUA e Índia. Hoje, o uso da energia solar fotovoltaica tornou-se um importante ator no setor elétrico em vários países. Nos próximos cinco anos, a energia solar deverá representar as maiores adições de capacidade anual para energias renováveis, bem superior às do vento e da energia hidráulica (IEA, 2017).

¹ Energia limpa refere-se a uma fonte de energia que para a sua produção ou consumo, não leve a liberação de gases ou outros resíduos nocivos ou que contribuam para o chamado efeito estufa (POMILIO, 2017).

² Energia renovável é aquela proveniente de processos naturais (como a luz solar e o vento), que são capazes de se regenerar a um ritmo mais rápido do que são consumidos (GRIJÓ, 2014).

³ A matriz elétrica é o conjunto de fontes de energia primária que é utilizado na produção de energia elétrica (GRIJÓ, 2014).

⁴ Watt-pico (Wp) é uma unidade de potência criada para caracterizar os módulos fotovoltaicos e significa a potência em Watt fornecida por um módulo em condições específicas e reproduzidas em laboratório (*Standard Test Conditions*) (ENERGIA SOLAR SOL CENTRAL, 2016).

Quanto ao Brasil, desde os anos 2000 há uma diminuição da participação das fontes hídricas na matriz de energia elétrica, acarretando em aumento do custo da energia elétrica devido ao despacho adicional das termoelétricas (TIEPOLO et al., 2014). Dessa forma, torna-se notório o importante papel que a energia solar fotovoltaica pode exercer na expansão da matriz elétrica brasileira, aumentando sua resiliência com a diversificação das fontes (PEREIRA et al., 2017).

Sabe-se que a poluição atmosférica ocasiona graves problemas à saúde humana, causando anualmente cerca de 3 milhões de mortes prematuras no mundo (BERGIN et al., 2017). Essas partículas infecciosas em suspensão podem ser advindas de processos antropogênicos e naturais ou formadas na atmosfera (KALDELLIS; KAPSALI, 2011). Um dos efeitos secundários da poluição atmosférica é a diminuição do desempenho dos módulos fotovoltaicos devido a partículas de poeira que se acumulam sobre eles, ocasionando o chamado sombreamento suave (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013). Vale ressaltar que a redução da geração de energia varia de acordo com a composição, tamanho e tipo da partícula (EL-SHOBOKSHY; HUSSEIN, 1993). Pesquisadores da *Duke University* descobriram que este depósito de sujeira pode reduzir em até 25% o desempenho energético das instalações fotovoltaicas em países como China, Índia e na Península Arábica (BERGIN et al., 2017).

No entanto, o impacto considerável que a poluição do ar provoca na operação dos módulos geralmente não é levado em conta na estimativa dos custos da produção de energia solar. Adicionalmente, há o risco de danos ao módulo parcialmente sombreado, pois a potência elétrica produzida que não está sendo entregue ao consumo é dissipada nas células afetadas, podendo ocorrer pontos quentes que produzirão calor intenso sobre a célula afetada e possivelmente causar a ruptura do vidro e fusão de polímeros (BESSO, 2017). Desse modo, a proposta deste trabalho é definir um modelo que estime a diminuição da capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico a partir da caracterização de sujeira depositada sobre ele na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método empírico de avaliação quantitativa do impacto que a sujidade superficial dos módulos fotovoltaicos tem na geração de energia elétrica na RMGV.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar um estudo aprofundado do estado da arte em análise de depósito de sujidade em módulos fotovoltaicos.
- ✓ Determinar os tipos de sujidade mais frequentes na RMGV que podem depositar-se em módulos fotovoltaicos.
- ✓ Classificar as variáveis que impactam na capacidade de geração de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico.
- ✓ Desenvolver uma metodologia para preparação, execução e análise dos experimentos de avaliação de desempenho dos módulos fotovoltaicos com depósito de sujidade.
- ✓ Propor um modelo empírico que correlacione a capacidade de geração de energia elétrica em função da sujidade depositada no módulo fotovoltaico.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Primeiramente foi desenvolvida uma introdução ao tema que destaca sua importância em âmbitos econômicos, posteriormente definiu-se os objetivos geral e específicos do trabalho.

O Capítulo 2 é composto pela revisão da literatura a respeito da evolução da energia solar no mundo e no Brasil, do depósito de sujidade em módulos fotovoltaicos, dos tipos de sujidade mais frequentes na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) e dos fatores que influenciam na perda de rendimento do módulo fotovoltaico.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada para planejamento e realização dos experimentos.

No Capítulo 4 é realizada a análise dos resultados e proposto um modelo matemático que estime a redução da capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico a partir da caracterização de sujidade depositada sobre sua superfície.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e identifica possibilidades de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A busca por fontes renováveis de energia surgiu na década de 70, quando se iniciou a crise do petróleo. A crise petrolífera elevou de forma acentuada os preços do petróleo, que dominava as matrizes energéticas dos países industrializados (IPEA, 2010). Desde então, esses países começaram a investir em pesquisas com o intuito de buscar alternativas ao petróleo. No entanto, a maior disseminação das fontes renováveis de energia ocorreu apenas na década de 90 com o surgimento do Protocolo de Kyoto firmado com o objetivo de reduzir as emissões dos gases causadores do efeito estufa (CPFL ENERGIA, 2017).

Somado a isso, o desenvolvimento econômico global requer uma expansão da demanda por energia e capacidade de geração associada para manter o impulso econômico (IRENA, 2017a). Esse crescimento é apontado como o fator mais importante na aceleração das alterações climáticas e ambientais observadas nos últimos anos. O avanço da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta e aumento dos preços dos combustíveis fósseis e a crescente necessidade de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) impulsionaram a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental (PEREIRA et al., 2006).

Recursos renováveis apresentam um conjunto de benefícios adicionais quando comparados a recursos não renováveis. De acordo com ERA (2011), a utilização de energia renovável oferece uma redução na emissão de gases de efeito estufa, proporciona a descentralização da produção, possui elevada disponibilidade e minimiza o risco ecológico. Adicionalmente, a implementação de energia renovável em um contexto regional pode melhorar a segurança do fornecimento de energia elétrica através da diversificação de recursos, além de promover novas oportunidades de investimento e emprego (IRENA, 2017b).

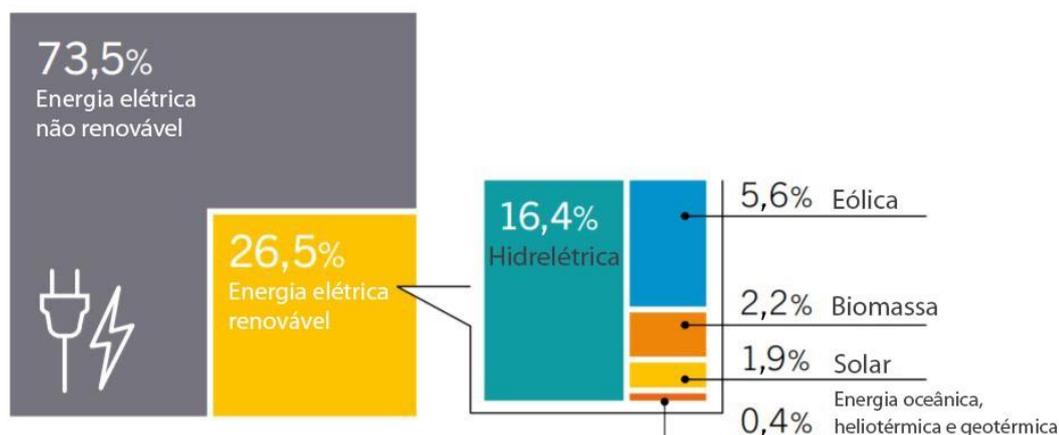
As energias renováveis estão hoje estabelecidas em todo o mundo como fontes importantes de energia. Seu crescimento rápido, particularmente no setor elétrico, é impulsionado por vários fatores, entre eles a melhora da competitividade dos custos das tecnologias renováveis, iniciativas de políticas públicas específicas, melhor acesso

a financiamento, preocupações ambientais e de segurança energética, demanda crescente de energia nas economias em desenvolvimento e emergentes e a necessidade de acesso a energia moderna. Consequentemente, novos mercados para energia renovável centralizada e distribuída estão surgindo em todas as regiões (REN21, 2016).

O acréscimo na capacidade instalada⁵ de geração de energia renovável atingiu novos recordes em 2017, com estimativa de 178GWp, aumentando a capacidade total de energia renovável em quase 9% em relação a 2016. A energia solar liderou, representando aproximadamente 55% da capacidade de energia renovável recém instalada. Além disso, mais capacidade solar fotovoltaica foi adicionada em 2017 do que as adições líquidas de combustíveis fósseis e energia nuclear combinadas (REN21, 2018).

Ao final do ano de 2017, cerca de 26,5% da capacidade de produção mundial de eletricidade foi proveniente das energias renováveis, com energia hidrelétrica fornecendo cerca de 16,4% (REN21, 2018), como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 - Contribuição de fontes renováveis na capacidade de geração de energia elétrica – ano de 2017



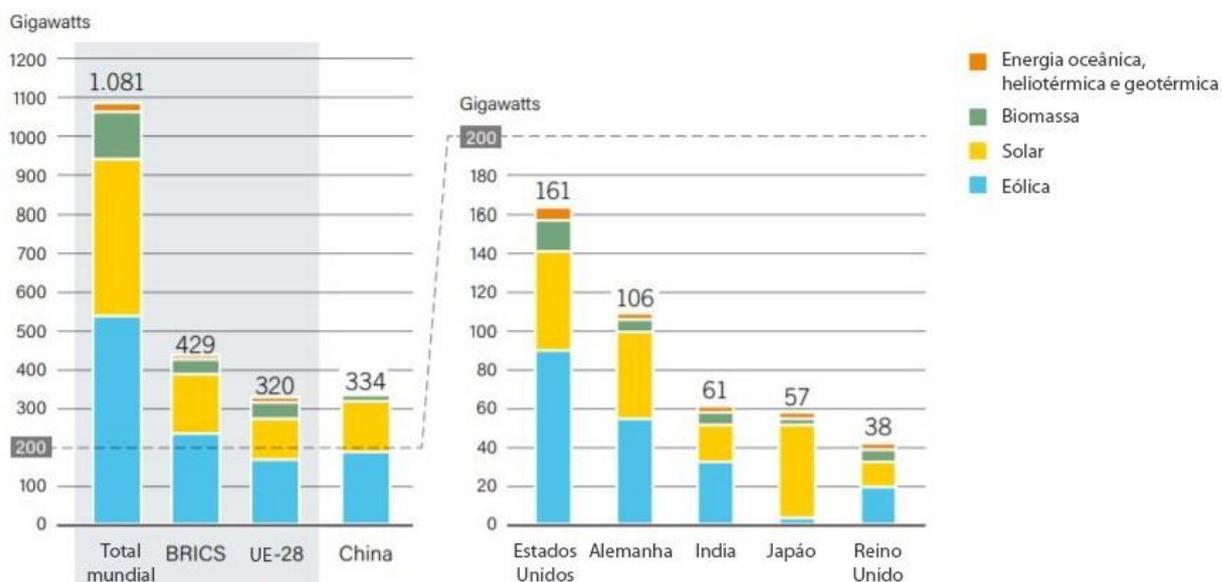
Fonte: adaptado de REN21, 2018.

Segundo REN21 (2018), os principais países no ano de 2017 com maiores capacidades de eletricidade renovável no mundo, sem incluir a energia hidrelétrica,

⁵ Capacidade instalada “é o somatório das potências instaladas, concedidas ou autorizadas, das usinas de geração de energia elétrica em operação” (ANEEL, 2000).

foram: China, Estados Unidos da América, Alemanha, Japão, Índia e Reino Unido, conforme Figura 2.

Figura 2 - Capacidades de eletricidade renovável exceto hidrelétrica, no mundo, UE 28, BRICS e sete principais países, final de 2017



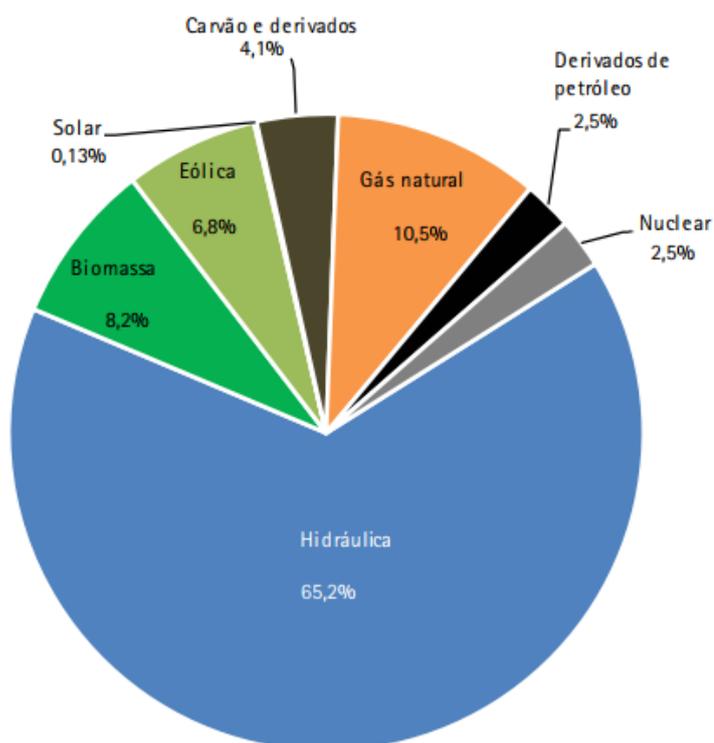
Fonte: adaptado de REN21, 2018.

Em termos de Brasil, a matriz elétrica nacional é predominantemente renovável, com destaque para a energia hidráulica que correspondeu a 65,2% da oferta interna de energia elétrica em 2017 (EPE, 2018), conforme ilustrado na Figura 3. No entanto, sabe-se que a presença das hidrelétricas no sistema elétrico brasileiro produz um impacto ambiental ainda não adequadamente avaliado, devido à inundação de áreas cultiváveis, além de provocar a emissão de gases do efeito estufa ocasionado pelo processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica alagada (PEREIRA et al., 2006). Além disso, nos últimos houve uma diminuição na capacidade de geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas devido à influência de fatores climáticos, ocasionando um aumento do custo da energia devido ao despacho adicional das termoelétricas (TIEPOLO et al., 2014).

Apesar do aumento considerável na participação dos combustíveis fósseis devido ao despacho das usinas termoelétricas citado anteriormente, durante esse período também foi observado o crescimento na participação de energias renováveis não-hidro, mas em proporção menor do que da geração térmica. Aliados à necessidade de diversificar as fontes de energia, existem ainda os compromissos assumidos pelo

Brasil ratificados em reunião na ONU (Organização das Nações Unidas), realizada em setembro de 2016, para reduzir em 43% as emissões dos gases do efeito estufa até 2030 em relação aos níveis de emissões observados em 2005 (PEREIRA et al., 2017). Torna-se evidente, portanto, o importante papel que as fontes renováveis não-hidro pode desempenhar na expansão da matriz elétrica brasileira.

Figura 3 - Oferta interna de energia elétrica – ano de 2017



Fonte: adaptado de EPE, 2018.

Atualmente há uma crescente inserção de fontes renováveis como a eólica e a solar fotovoltaica no cenário brasileiro. Segundo dados da ABEEólica, o Brasil atingiu em fevereiro de 2018 a marca de 13GWp de capacidade instalada de energia eólica, com 518 parques eólicos e mais de 6.600 aerogeradores operando, sendo que ainda há mais 4,8GWp em construção ou contratados divididos em 213 parques eólicos que serão entregues até 2023. Essa energia abastecerá mais de 10% do país em alguns meses, mais de 60% da Região Nordeste, e é equivalente ao consumo médio de cerca de 24 milhões de residências por mês. Esse crescimento da geração de energia elétrica a partir da fonte renovável eólica coloca o Brasil em 8º lugar no Ranking Mundial de Capacidade Instalada de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2018).

Com relação a fonte renovável solar, de acordo com dados divulgados pelo BIG (Banco de Informações de Geração), o país atingiu 1GWp de capacidade instalada de energia solar em 2017. Colocando desta forma o Brasil entre os 30 principais geradores de energia solar do mundo, com estimativa de instalação de mais de 3GWp já contratados por meio de leilões para 2018 (ABSOLAR, 2018). A ANEEL prevê que até 2024, 1,2 milhão de unidades consumidoras deverão produzir sua própria energia elétrica, por meio de sistemas de micro e minigeração distribuída, fomentando o conceito de autossustentabilidade e consciência socioambiental aliada a economia financeira (AMBIENTE ENERGIA, 2016).

2.2 PEQUENO HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da energia solar radiante em eletricidade, sendo a célula fotovoltaica⁶ a unidade fundamental desse processo de conversão (PINHO; GALDINO, 2014). O interesse por esse recurso energético vem crescendo a taxas elevadas e em 2017 houve uma participação significativa da fonte renovável solar no mundo. Segundo (REN21, 2018), adicionou-se pelo menos 98GWp de capacidade de energia solar fotovoltaica no mundo, o equivalente a instalação de mais de 40 mil módulos solares por hora. Como é possível observar na Figura 4, a capacidade global de energia solar totalizou 402GWp, cerca de 33% a mais em relação ao ano de 2016 (REN21, 2018).

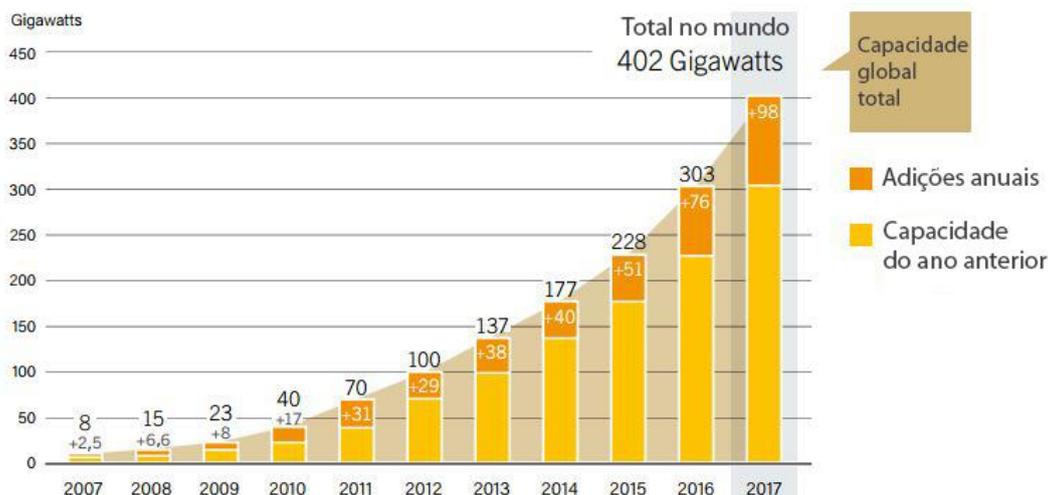
Os cinco principais mercados em sistemas fotovoltaicos no mundo - China, Estados Unidos da América, Japão, Índia e Turquia - representam cerca de 84% da capacidade recém instalada e os seguintes foram Alemanha, Austrália, Coreia do Sul, Reino Unido e Brasil. Os países que possuem maior capacidade acumulada são: China, Estados Unidos da América, Japão, Alemanha e Itália (REN21, 2018), conforme ilustrado na Figura 5.

Essa crescente demanda pela energia solar fotovoltaica se deve ao fato dessa fonte apresentar menor incidência de danos ao meio ambiente onde está instalada quando comparada às usinas hidrelétricas, que para a sua construção necessitam de grandes áreas inundadas, além do custo de operação de uma planta solar ser inferior ao de uma usina hidrelétrica (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Se comparado à energia

⁶ Célula fotovoltaica é um “dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta da energia solar em energia elétrica” (PINHO; GALDINO, 2014).

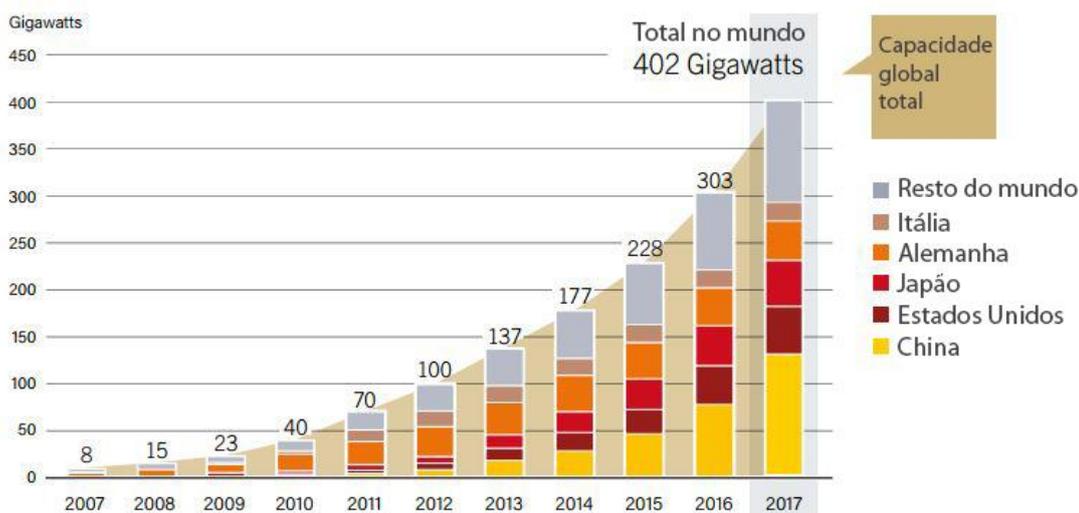
eólica, a energia solar emite baixos ruídos e pode ser instalada em edifícios residenciais e comerciais (PEREIRA et al., 2017), não sendo necessário um espaço destinado somente à sua instalação. Outra vantagem em relação às turbinas eólicas é o fato dos módulos não possuírem partes móveis, uma característica que reduz consideravelmente a frequência e os gastos com manutenção (KINNO et al., 2013).

Figura 4 - Capacidade de eletricidade solar fotovoltaica global e adições anuais, 2017



Fonte: adaptado de REN21, 2018.

Figura 5 - Capacidade solar fotovoltaica global, por país e região, 2017



Fonte: adaptado de REN21, 2018.

Em 2006 foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o qual comprova que o território brasileiro recebe elevados índices de radiação solar durante o ano inteiro, principalmente na Região Nordeste, quantidade essa considerada superior quando

comparada a países europeus, onde a tecnologia fotovoltaica é disseminada para a produção de energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014). Apesar desse alto índice de radiação solar, o Brasil atingiu somente 1GWp de capacidade de energia solar instalada em 2017 (ANEEL, 2018).

Acredita-se que a falta de tecnologia produzida no país seja uma das principais barreiras na disseminação da geração de energia fotovoltaica, haja vista a necessidade de se importar boa parte dos componentes do sistema, encarecendo o seu custo (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Há pesquisas que indicam que a deficiência de subsídios financeiros e técnicos no Brasil se dão devido ao medo que as empresas privadas responsáveis pelos serviços públicos de geração de energia têm sobre a perda de mercado, pois um grande quantitativo de consumidores gerando sua própria energia traria efeitos negativos financeiros e técnicos para as empresas do segmento (DE FARIA; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). Outro aspecto seria a falta de preparo das empresas de distribuição para suportar grandes quantidades de geração distribuída⁷ (GD) de energia, sem ter que realizar reforços ou investir em tecnologias de controle e proteção (DE FARIA; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017).

A realização de leilões, como por exemplo o 6º Leilão de Energia Reserva (LER) promovido em outubro de 2014, tem atraído muitos investidores para comercializar energia para os serviços de distribuição. No entanto, os avanços no setor só serão mais significativos à medida que forem promovidas políticas públicas de incentivo, redução de impostos e o desenvolvimento de novas tecnologias de forma a fomentar o uso da geração distribuída fotovoltaica.

2.3 DEPÓSITO DE SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A sujidade é caracterizada como um processo complexo resultante da deposição de partículas, bem como do crescimento microbiano (SHIRAKAWA et al., 2015). De maneira geral, a sujidade ou sujeira é composta por poeira, partículas originárias da poluição do ar, atividade agrícola, construção, excremento de animais, carbono

⁷ Geração distribuída é definida pela instalação de geradores de pequeno porte localizados juntos ou próximos dos centros de consumo de energia elétrica, independente da tecnologia e fonte de energia (ANEEL, 2016).

amorfo resultante de queima de combustíveis e de vegetação, resíduos oriundos de processos produtivos e tráfego de veículos.

Poeira é a denominação de qualquer material particulado (MP) com menos de 500 μ m de diâmetro, o que é aproximadamente igual a 10 vezes o diâmetro de um fio de cabelo humano. Engloba pequenas quantidades de pólen (vegetação, fungos, bactérias), células humanas/animais, carpetes e fibras têxteis e, mais comumente, minerais orgânicos como areia, argila ou calcário (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013).

A poluição atmosférica além de ocasionar danos ambientais também pode acarretar graves problemas relacionados à saúde da população, causando cerca de 3 milhões de mortes prematuras no mundo anualmente (BERGIN et al., 2017). Segundo Mendes et al. (2016), o governo brasileiro gasta anualmente cerca de US\$85 milhões com o sistema de saúde para mitigar os problemas ocasionados pelo despacho das usinas termelétricas.

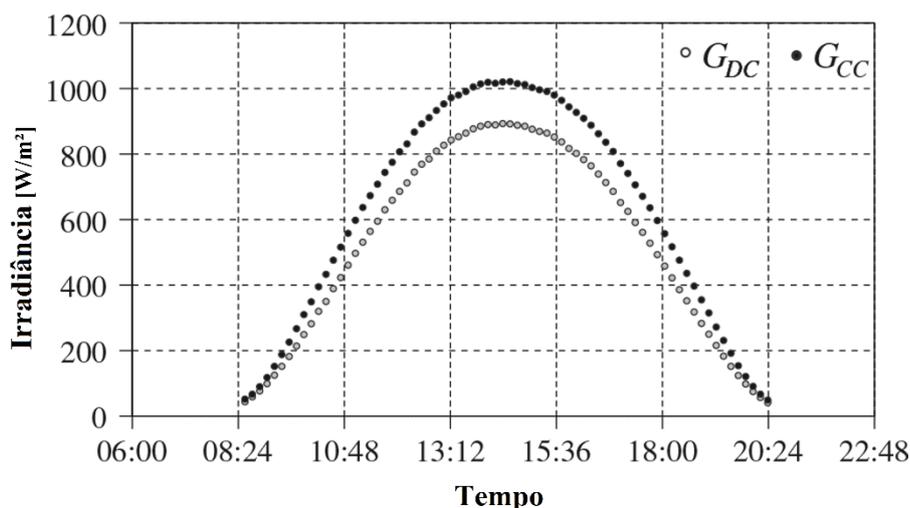
Além dos danos gerados à saúde humana, há estudos que comprovam que outro efeito causado pela poluição atmosférica é a diminuição da capacidade de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos. Sabe-se que a distribuição uniforme de sujeira sobre o módulo fotovoltaico pode resultar em uma atenuação da radiação solar incidente nas células fotovoltaicas (HICKEL et al., 2016). Portanto, o decréscimo da energia recebida fará com que o dispositivo gere menos energia elétrica, afetando negativamente o seu desempenho. A Figura 6 ilustra a atenuação da irradiância incidente provocada pelo acúmulo de sujeira uniforme sobre as células fotovoltaicas.

Estudos mostram que as perdas não estão somente relacionadas com a atenuação da radiação solar, quando a distribuição da sujeira não é homogênea. Na concepção de Lorenzo, Moretón e Luque (1994), a perda de energia é mais significativa em um módulo empoeirado conectado com outros módulos limpos do que quando considerado separadamente. Quando operando juntamente com outros módulos limpos (ou menos empoeirados), além das perdas relacionadas com a atenuação da radiação solar (redução da corrente de curto-circuito) surgem também perdas relativas à redução da tensão de operação do módulo sujo.

Estudos realizados na *Duke University* apontam que o depósito de sujidade pode reduzir em até 25% o desempenho energético das instalações fotovoltaicas em países

como China, Índia e na Península Arábica (BERGIN et al., 2017). Vale ressaltar que existem outros fatores que também influenciam a capacidade de geração de energia tais como a temperatura própria do módulo fotovoltaico, sua degradação natural ao longo do tempo, outros sombreamentos, nível de radiação solar, a incidência de vento, dentre outros fatores (GLEASON, 2009).

Figura 6 - Irradiância solar - célula de referência suja (G_{DC}) e limpa (G_{CC})



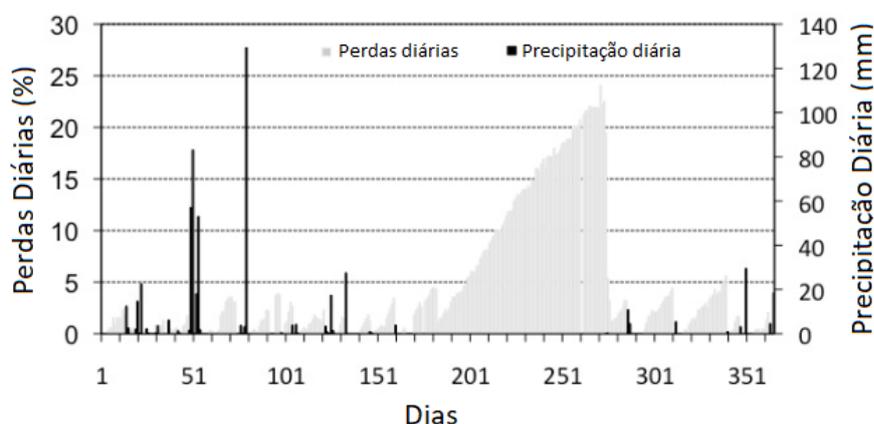
Fonte: adaptado de Zorrilla-Casanova et al., 2013.

Segundo Hegazy (2001), o acúmulo de poeira na superfície dos módulos está intimamente relacionada com o ângulo de inclinação do painel e, em menor grau, com o período de exposição e com as condições climáticas do local. Os módulos fotovoltaicos instalados no hemisfério sul, onde está o Brasil, possuem suas superfícies voltadas para o norte geográfico e o ângulo de inclinação deve ser o mesmo da latitude local, de modo a maximizar a geração de energia elétrica e reduzir a deposição de poeira em suas superfícies (MICHELS et al., 2015).

Dessa maneira, os módulos que possuem um ângulo de inclinação de pelo menos 5° a 10° teriam suas superfícies limpas nos períodos de chuvas, recuperando seu desempenho inicial e não sendo necessário limpezas adicionais (HICKEL et al., 2016; ZORRILLA-CASANOVA et al., 2011). Entretanto, em alguns casos há a deposição de sujeiras mais aderentes como excreções de pássaros que justificam a limpeza em pontos estratégicos do sistema. A Figura 7 ilustra a evolução das perdas diárias de irradiação ao longo do ano considerando a precipitação pluviométrica diária em um estudo realizado na Universidade de Málaga, Espanha. É possível observar que nos

períodos sem chuva, o acúmulo de sujeira pode ocasionar perdas de quase 30% (ZORRILLA-CASANOVA et al., 2011).

Figura 7 - Relação das perdas diárias causadas pela sujeira versus precipitação pluviométrica diária em um sistema fotovoltaico



Fonte: adaptado de Zorrilla-Casanova et al, 2011.

Nos casos de períodos de pouca precipitação e de áreas secas, a solução consiste em limpar os módulos com água. Todavia, em usinas fotovoltaicas de grandes dimensões, a limpeza torna-se uma tarefa custosa, especialmente naquelas áreas com escassez de água e de difícil acesso (ZORRILLA-CASANOVA et al., 2011).

Devido à preocupação ambiental e ao crescimento acelerado da economia global, a inserção da energia solar fotovoltaica no setor elétrico está aumentando e como consequência há um crescimento do número de pesquisas nessa área, de forma a entender as consequências ocasionadas pela sujeira e aplicar, se necessário, limpezas periódicas de forma a maximizar a energia elétrica gerada ao longo do tempo e, por consequência, o seu desempenho. Desse modo, é importante estabelecer como diferentes níveis e tipos de sujeira impactam na produção de energia e estimar um limite máximo aceitável de partículas depositadas sobre a placa de modo a não impactar sua produção.

2.4 TIPOS DE SUJIDADE MAIS FREQUENTES NO ESPÍRITO SANTO

2.4.1 Região de estudo

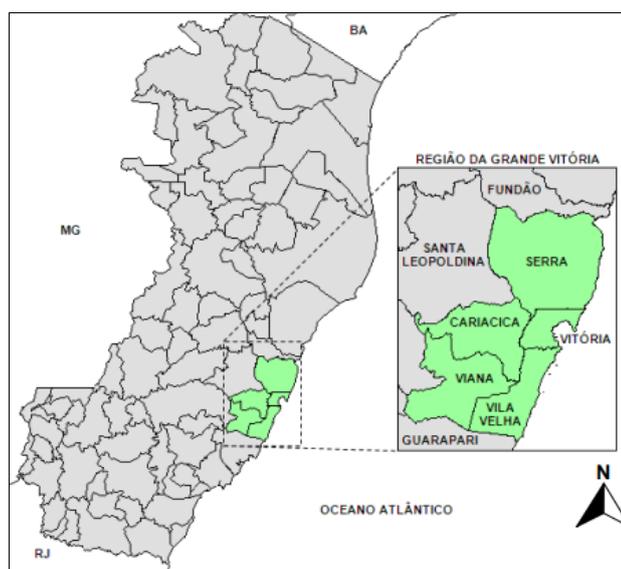
A área de estudo do presente trabalho é a Região Metropolitana da Grande Vitória, exceto os municípios de Guarapari e Fundão, que dispõe uma área de 2.331,03km², sendo um dos principais polos de desenvolvimento urbano e industrial do estado do

Espírito Santo e possui cerca de 1.960.213 habitantes, o que corresponde aproximadamente 48,8% da população do Estado (IBGE, 2017).

A RMGV compreende os municípios de Vitória, Vila Velha, Serra, Cariacica, Viana, Guarapari e Fundão e retém cerca de 65% das atividades industriais potencialmente poluidoras instaladas no Espírito Santo, tais como siderurgia, pelotização, pedreira, cimenteira, indústria alimentícia, usinas termelétricas a gás e a óleo derivado de petróleo, usina de beneficiamento de lixo, aterro sanitário, circulação de um grande quantitativo de veículos automotores baseados em motores a combustão, além do setor de logística dado à existência de um grande complexo portuário e de aeroporto (IEMA, 2017).

A Figura 8 apresenta a região de estudo do presente trabalho, o Estado do Espírito, com destaque para a região de estudo da pesquisa (RMGV).

Figura 8 - Região de estudo



Fonte: IEMA, 2011.

2.4.1 Rede de monitoramento da qualidade do ar

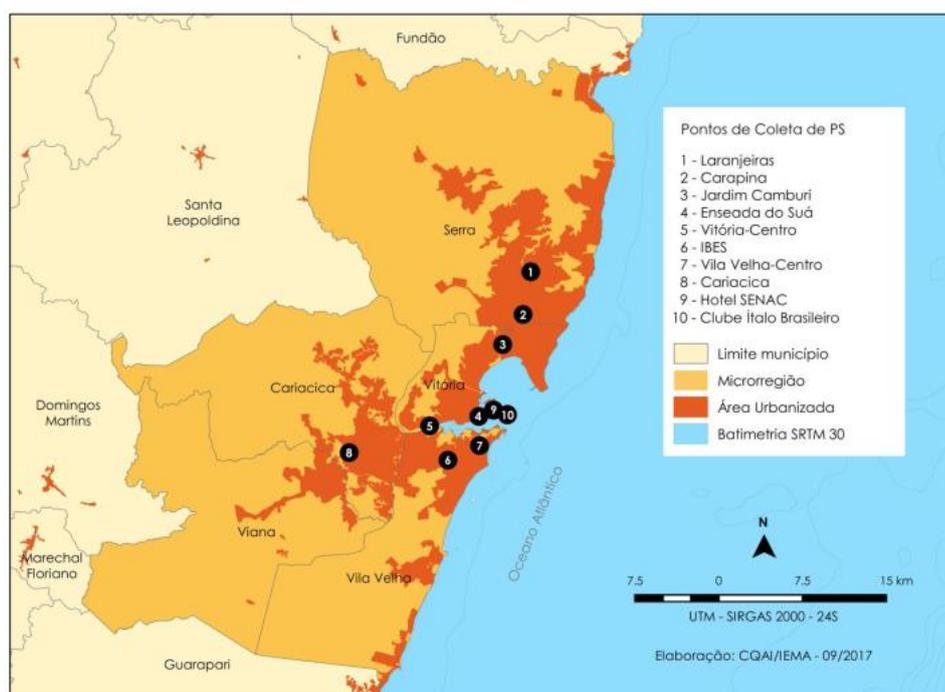
O monitoramento da qualidade do ar e das condições meteorológicas na RMGV é realizado por dois conjuntos complementares de estações de monitoramento: (i) Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (RAMQAr) e (ii) Rede Manual de Monitoramento de Partículas Sedimentadas. A gestão da qualidade do ar é realizada pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEAMA) e o órgão executor é o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), que estabelece os padrões

de qualidade do ar para o Espírito Santo. As estações automáticas não serão abordadas, pois somente as estações manuais monitoram e fornecem informações sobre as partículas sedimentadas que serão objeto de estudo do trabalho.

A Rede Manual de Monitoramento de Partículas Sedimentadas foi implantada em abril de 2009 e atualmente conta com 10 pontos, sendo 8 localizados nas estações da RAMQAr e 2 no bairro Ilha do Boi em Vitória (Hotel SENAC e Clube Ítalo Brasileiro) (IEMA, 2017).

A Figura 9 ilustra a distribuição geográfica dessas 10 estações de monitoramento nos municípios da Grande Vitória, e a Tabela 1 apresenta a localização dos pontos de coleta de partículas sedimentadas (PS) na RMGV.

Figura 9 - Distribuição geográfica dos pontos de coleta de PS na RMGV



Fonte: IEMA, 2017.

2.4.1 Fontes emissoras de partículas sedimentadas

O material particulado pode ficar em suspensão na atmosfera por longos períodos e se depositar em diferentes distâncias da fonte emissora dependendo do seu diâmetro. Quanto maior o diâmetro das partículas, mais próximo à fonte emissora irá ocorrer a sedimentação (MÉRI SANTOS; REIS JÚNIOR, 2011). Conti et al. (2009) realizaram um estudo sobre a caracterização química e morfológica da poeira sedimentada no município de Vitória/ES e constataram que as partículas presentes no material

particulado sedimentado⁸ possuem diâmetro que variam de (5 a 100) μm em sua maioria, sendo que também foram coletadas algumas partículas menores que 5 μm .

Tabela 1 - Localização dos pontos de monitoramento de PS na RMGV

| Estação | Localidade/ Bairro | Município |
|----------|---------------------------------------|------------|
| RAMQAr 1 | Hospital Dório Silva / Laranjeiras | Serra |
| RAMQAr 2 | ArcelorMittal Tubarão / Carapina | Serra |
| RAMQAr 3 | Unidade de Saúde / Jardim Camburi | Vitória |
| RAMQAr 4 | Corpo de Bombeiros / Enseada do Suá | Vitória |
| RAMQAr 5 | Ministério da Fazenda / Centro | Vitória |
| RAMQAr 6 | 4º Batalhão da Polícia Militar / Ibes | Vila Velha |
| RAMQAr 7 | Ao lado do Colégio Marista / Centro | Vila Velha |
| RAMQAr 8 | CEASA / Vila Capixaba | Cariacica |
| Ponto | Hotel SENAC / Ilha do Boi | Vitória |
| Ponto | Clube Ítalo Brasileiro / Ilha do Boi | Vitória |

Fonte: adaptado de IEMA, 2017.

A região de estudo apresenta diversificadas fontes emissoras de poluentes atmosféricos, como vias de tráfego, indústrias de diversos segmentos, portos, aeroporto, emissões residenciais e comerciais, ressuspensão de partículas sobre as vias de tráfego, construção civil, dentre outras.

As fontes de poluição do setor de transporte são derivadas de processos de combustão de motores, vazamento e evaporação de compostos orgânicos, de frenagem e desgaste de pneus, e também da ressuspensão de partículas depositadas nas vias. A ressuspensão dessas partículas também pode ocorrer simplesmente devido à ação de cisalhamento do vento. Essas partículas presentes nas vias têm diversas origens como a falta de pavimentação de ruas e calçadas, realização de

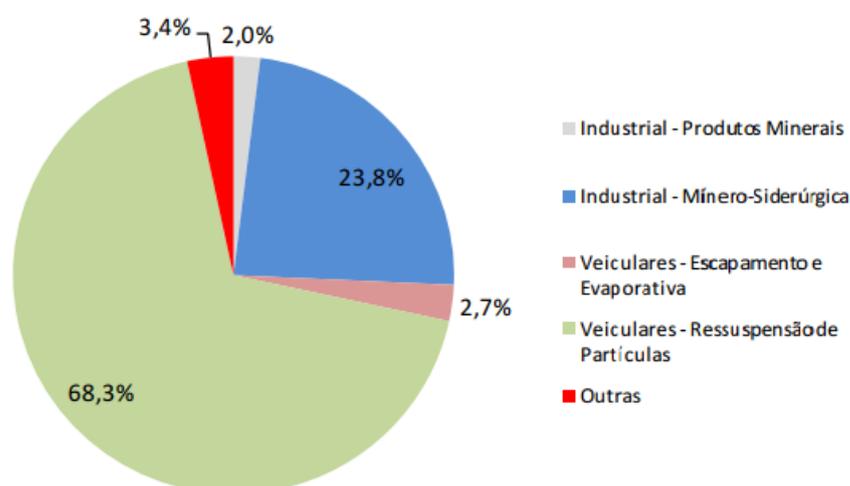
⁸ Material particulado sedimentado ou partícula sedimentada é a poeira presente na atmosfera, suscetível à coleta por sedimentação livre, composta de partículas sólidas ou líquidas suficientemente grandes para se depositarem, em virtude de seu peso, no frasco coletor e bastante pequenas para atravessarem a peneira de 0,84 mm (ABNT MB-3402, 1991).

obras sem cuidados adequados de limpeza, organização e controle das emissões geradas, e ainda devido à deposição das partículas provenientes de outras fontes emissoras (IEMA, 2015).

De maneira semelhante, as emissões no setor de logística ocorrem devido a pousos e decolagens de aeronaves, e nos terminais portuários elas ocorrem por meio dos navios e rebocadores durante a realização de manobras e espera no cais (ANDREON, 2017).

Em 2011 foi divulgado o mais recente Inventário de Fontes de Emissão da RMGV pelo IEMA, tendo como ano base 2009. O inventário considerou fontes emissoras de poluentes atmosféricos abrangendo os municípios da Serra, Vitória, Cariacica, Vila Velha e Viana e permite identificar quais são as fontes predominantes de emissão. De acordo com os resultados do inventário, as fontes que mais contribuem com o material particulado na atmosfera são a frota de veículos, majoritariamente pela ressuspensão de partículas, e a indústria mínero-siderúrgica (IEMA, 2011), como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição das taxas de emissão de MP por fonte emissora na RMGV



Fonte: IEMA, 2011.

Vale ressaltar que o inventário fornece resultados referentes ao material particulado presente na atmosfera, no entanto o objeto de interesse deste trabalho é estudos relacionados às partículas sedimentadas presentes na RMGV, uma vez que esse tipo de partícula é que se deposita sobre superfícies terrestres, caso dos módulos fotovoltaicos.

Estudos realizados por Méri Santos e Reis Júnior (2011) determinaram a origem do material particulado sedimentado e a contribuição percentual das fontes de emissão para as partículas sedimentadas nos 8 pontos de coleta de partículas sedimentáveis da RMGV (7 estações da RAMQAr e 1 ponto de coleta no SENAC). Foram monitoradas as taxas de deposição das partículas entre os meses de abril de 2009 e março de 2010, e novembro de 2010, para as estações e ponto citados, além dos meses de dezembro de 2010 e janeiro de 2011 para a estação SENAC.

A Figura 11 apresenta a contribuição percentual das fontes de material particulado sedimentado nas estações de monitoramento na RMGV. Como é possível observar, o perfil de contribuição em cada estação é bem diversificado.

Na estação Laranjeiras, o conjunto de fontes ressuspensão, solos e construção civil representa cerca de 70% da contribuição total de PS, onde a fonte mais significativa é solos e a menos significativa é carvão/coque.

Na estação Jardim Camburi, o conjunto de fontes construção civil e ressuspensão representa cerca de 68% da contribuição total de PS, onde as fontes mais significativas são ressuspensão e construção civil e as menos significativas são carvão/coque e mar.

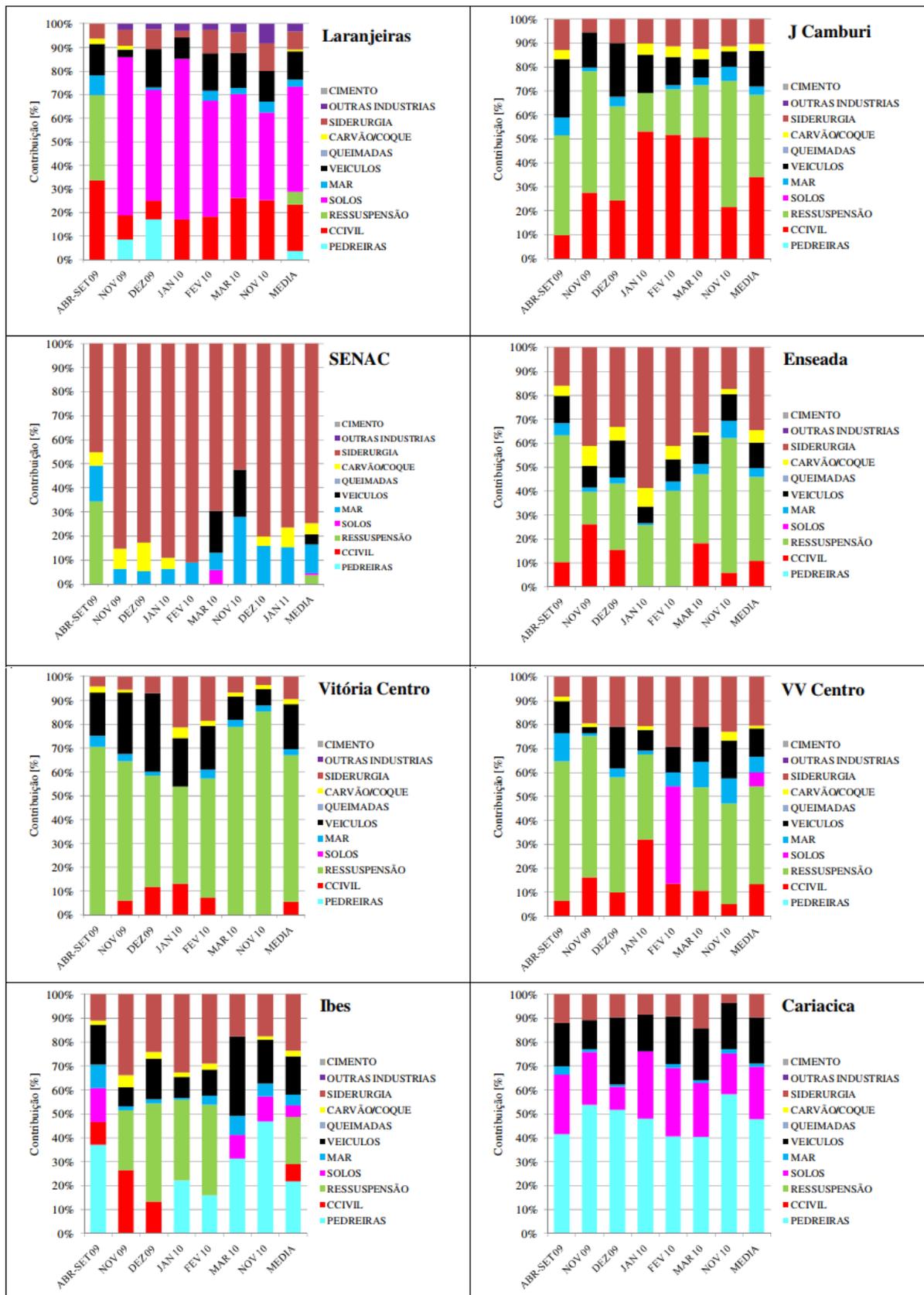
Na estação SENAC, o conjunto de fontes siderurgia e carvão/coque representa cerca de 80% da contribuição total de PS, onde a fonte mais significativa é siderurgia e a menos significativa é solos.

Na estação Enseada, o conjunto de fontes construção civil e ressuspensão representa cerca de 48% da contribuição total de PS, onde as fontes mais significativas são ressuspensão e siderurgia e as menos significativas são carvão/coque e mar.

Na estação Vitória Centro, o conjunto de fontes construção civil e ressuspensão representa cerca de 67% da contribuição total de PS, onde a fonte mais significativa é ressuspensão e as menos significativas são carvão/coque e mar.

Na estação Vila Velha Centro, o conjunto de fontes construção civil e ressuspensão representa cerca de 55% da contribuição total de PS, onde a fonte mais significativa é ressuspensão e as menos significativas são pedreiras e carvão/coque.

Figura 11 - Contribuição percentual das fontes de PS nas estações de monitoramento e ponto de coleta da RMGV



Fonte: Méri Santos; Reis Júnior, 2011.

Na estação Ibes, o conjunto de fontes pedreira, construção civil, ressuspensão e solos representa cerca de 55% da contribuição total de PS, onde a fonte mais significativa é siderurgia e a menos significativa é carvão/coque.

Na estação Cariacica, o conjunto de fontes pedreira e solos representa cerca de 70% da contribuição total de PS, onde a fonte mais significativa é pedreira e a menos significativa é mar.

A partir dessas informações, posteriormente na fase de planejamento experimental serão determinados alguns tipos de sujidades para executar os experimentos de avaliação dos módulos e estimar a diminuição da capacidade de geração de energia elétrica a partir do tipo de sujidade deposita sobre eles.

2.5 OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM NA PERDA DE RENDIMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Neste tópico serão citados alguns fatores que influenciam na capacidade de geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos, além da deposição de sujidade que é o escopo deste trabalho, e que podem impactar na análise experimental pretendida.

2.5.1 Influência do sombreamento

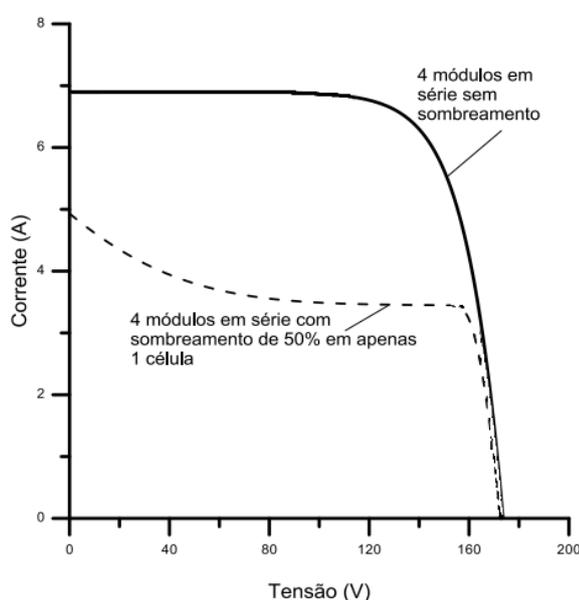
As células solares são conectadas em série/paralelo com o intuito de alcançar a tensão elétrica desejada para a conversão de energia fotovoltaica em elétrica (BHOL et al., 2015). Quando uma ou mais células fotovoltaicas associadas em série recebe menos radiação solar do que as outras da mesma associação, sua corrente elétrica reduzida vai limitar a corrente de todo o conjunto em série. Essa redução de radiação incidente pode ocorrer devido a um sombreamento parcial e o efeito da redução da corrente no conjunto de células do módulo acaba sendo propagado para todos os módulos conectados em série, provocando a perda de potência no gerador fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014). O sombreamento pode ser causado principalmente por postes, árvores, edifícios, folhas, excrementos de pássaros e acúmulo de poeira na superfície do módulo (KEMPE, 2006; SAID; WALWIL, 2014).

Um modelo elétrico desenvolvido por Quaschnig e Hanitscht (1996) verificou que a perda do desempenho é de 70%, quando apenas 2% da área do módulo estiver sombreada. O estudo realizado por Alonso-García, Ruiz e Chenlo (2006) notou que há diferentes perdas de energia, para a mesma quantidade de sombreamento. Variando apenas as características da célula sombreada, as perdas podem variar de

59 a 73%. Portanto, quantificar as perdas ocasionadas pelo sombreamento depende da porcentagem de células sombreadas, bem como das características da célula e da conexão entre os módulos (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017).

A Figura 12 ilustra o efeito do sombreamento sobre apenas uma das células de um dos 4 módulos conectados em série na curva $I-V$ ⁹. Ao cobrir metade de uma das células, a corrente elétrica daquele módulo é reduzida pela metade e, como consequência, a corrente de todos os módulos da associação em série também é reduzida.

Figura 12 - Curva $I-V$ para 4 módulos conectados em série com e sem sombreamento parcial em uma célula



Fonte: adaptado de Pinho; Galdino, 2014.

Outro fato importante ocasionado pelo sombreamento parcial é o risco de danos ao módulo parcialmente sombreado, uma vez que a potência elétrica gerada que não está sendo entregue ao consumo é dissipada no módulo afetado. Assim sendo, pode ocorrer o fenômeno conhecido como “ponto quente”, que produz intenso calor sobre a célula sombreada, com potencial ruptura de vidro e fusão de polímeros e metais (PINHO; GALDINO, 2014).

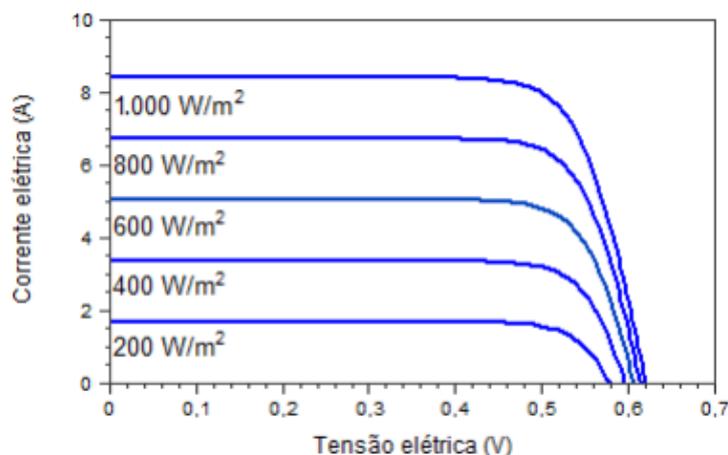
⁹ Curva $I-V$ é a curva da corrente elétrica de uma célula fotovoltaica em função da tensão no dispositivo, também conhecida por curva característica.

2.5.1 Influência da irradiância solar

Irradiância é definida como a medida da densidade de potência da luz solar recebida em um local na Terra e é medida em Watt/m^2 (ARJYADHARA; S.M; CHITRALEKHA, 2013). A irradiância absorvida pelo módulo fotovoltaico varia em função da localização geográfica, estação do ano, paisagem do local, clima local, da posição do sol no céu, do ângulo de instalação do módulo e do acúmulo de poeira sobre sua superfície (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017).

A irradiância solar incidente afeta a curva I - V de uma célula fotovoltaica. Mantida a mesma temperatura, a corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico cresce linearmente com o aumento da incidência irradiância solar, enquanto que a tensão de circuito aberto V_{oc} aumenta de forma logarítmica (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 13 ilustra esse fenômeno.

Figura 13 - Influência da irradiância solar na curva característica I - V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino à temperatura de 25°C



Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

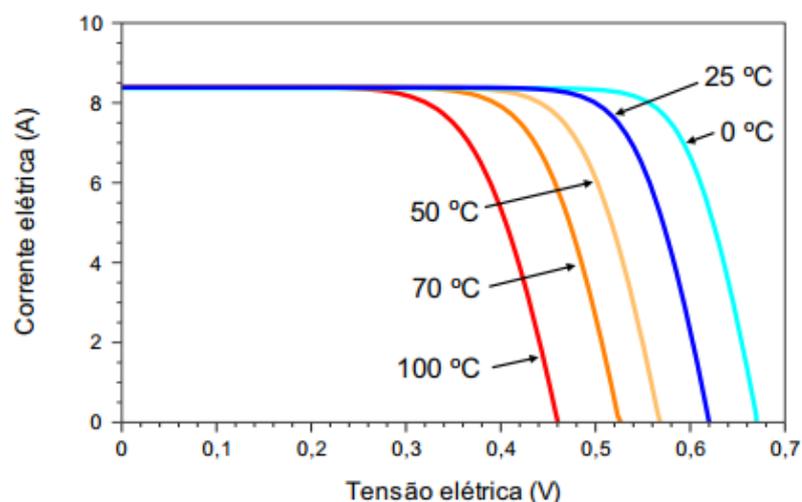
2.5.2 Influência da temperatura

Durante a operação de uma célula fotovoltaica apenas cerca de 15% da irradiância é convertida em energia elétrica, enquanto que o restante é convertido em calor (TEO; LEE; HAWLADER, 2012). A energia incidente convertida em calor causará elevação substancial da temperatura de operação da célula fotovoltaica (JIANG; JI; YI, 2008). A temperatura de operação da célula depende principalmente da irradiância solar, temperatura ambiente e da velocidade do vento (SKOPLAKI; BOUDOUVIS; PALYVOS, 2008).

A temperatura do módulo é um parâmetro que tem grande influência no comportamento de um sistema fotovoltaico, pois reduz a eficiência do sistema e a produção de energia (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017). Isso se deve ao fato de que a tensão da célula diminui consideravelmente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma variação positiva mínima que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão (PINHO; GALDINO, 2014). De acordo com Bhol et al. (2015), a tensão da célula diminui aproximadamente 2,2mV e a potência do módulo fotovoltaico diminui cerca de 0,5% por 1°C de aumento na temperatura própria da célula (HAMROUNI; JRAIDI; CHÉRIF, 2008).

A Figura 14 apresenta curvas I - V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica, com irradiância 1000 W/m².

Figura 14 - Influência da temperatura própria da célula fotovoltaica na cura I - V (para irradiância 1000 W/m², espectro AM1,5¹⁰)



Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

Outro impacto relevante ocasionado pela temperatura de operação elevada é a degradação estrutural que resulta em redução da vida útil do sistema fotovoltaico (HASAN; ALNOMAN; SHAH, 2016). Sabe-se que a temperatura elevada acelera o

10 AM1,5 é o espectro solar de referência utilizado em ensaios de caracterização dos módulos fotovoltaicos para estabelecer a eficiência de conversão do módulo e é descrito na norma internacional IEC 60904-03 (HOEFLING SANTOS et al., 2015).

efeito da oxidação, resultando na deterioração das propriedades mecânicas e elétricas do material encapsulante (SÁLY; RUZINSKÝ; REDI, 2001).

Portanto, reduzir a temperatura de operação pode melhorar a eficiência e aumentar a vida útil do módulo fotovoltaico. Isso é possível resfriando-se o módulo através de algumas técnicas como resfriamento a ar e resfriamento a água (TEO; LEE; HAWLADER, 2012). De acordo com Dubey et al. (2009), a eficiência média anual do módulo fotovoltaico aumenta de 9,75% para 10,41% quando um duto de ar é colocado na parte traseira do módulo. Experimentos realizados por Odeh e Behnia (2009) indicaram que, devido à perda de calor por convecção entre a água e a superfície superior do módulo fotovoltaico, um aumento de cerca de 15% na eficiência foi alcançado. Sabe-se que a temperatura também depende do material e propriedades do sistema, como a transmitância da cobertura do vidro, a absorção da placa e outros fatores (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017).

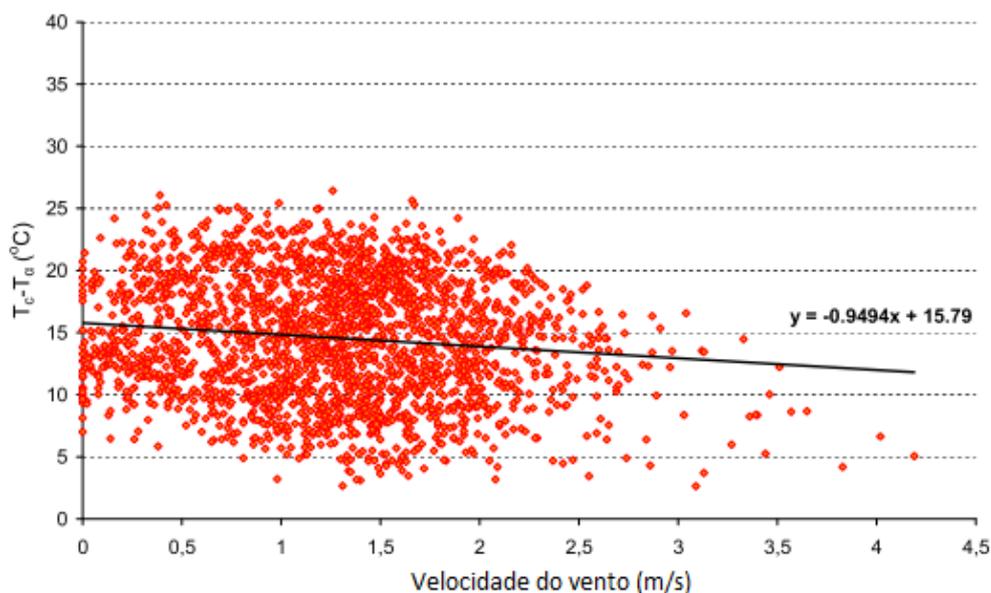
2.5.3 Influência da velocidade do vento

O vento pode desempenhar um papel significativo na redução da temperatura de operação do módulo e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do sistema. O fluxo de ar permite a transferência de calor por convecção dissipativa do módulo, reduzindo assim sua temperatura, o que ajuda a manter sua eficiência de conversão fotovoltaica (SAID et al., 2018). Estudos realizados na Grécia indicaram que a diferença entre a temperatura da célula e a temperatura ambiente é cerca de (10 a 20)°C durante períodos de ventos calmos, demonstrando uma mudança gradual para zero em casos de alta velocidade do vento (KALDELLIS; KAPSALI; KAVADIAS, 2014). Na Arábia Saudita, por exemplo, o aumento da velocidade do vento de 10 km/h para 19 km/h resultou na redução da temperatura do módulo em cerca de 10°C (SAID; AL-AQEELI; WALWIL, 2015). Segundo TamizhMani et al. (2003), o vento pode diminuir a temperatura dos módulos em até 1,45°C por cada 1 m/s de velocidade. Portanto, estudos indicam que a elevação de temperatura do módulo em relação ao ambiente diminui com o aumento da velocidade do vento (KALDELLIS; KAPSALI; KAVADIAS, 2014), essa mudança pode ser vista na Figura 15.

A montagem do módulo fotovoltaico realizada diretamente no telhado sem espaço de ar normalmente causa temperaturas operacionais mais altas porque a superfície traseira não troca calor com o ar ambiente, a transferência de calor ocorre apenas pela parte frontal do módulo (KALDELLIS; KAPSALI; KAVADIAS, 2014). A opção mais

econômica para melhorar o resfriamento é aproveitar a ventilação natural na maior extensão possível (VASEL; IAKOVIDIS, 2017).

Figura 15 - Impacto da velocidade do vento na diferença de temperatura entre a temperatura do módulo e a temperatura ambiente ($T_c - T_a$)



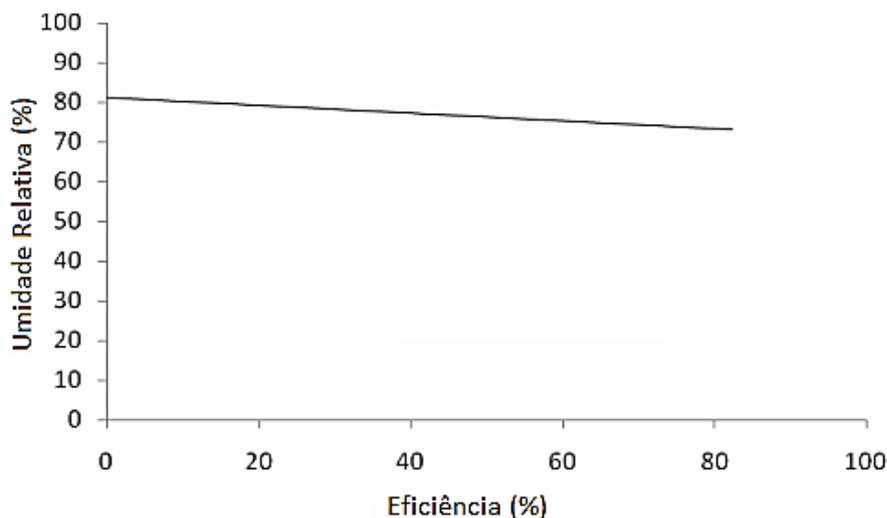
Fonte: adaptado de Kaldellis; Kapsali; Kavadias, 2014.

O vento pode ter efeitos positivos e negativos no depósito de poeira na superfície do módulo fotovoltaico. Através de um estudo realizado em Minia, no Egito, foi possível observar uma redução na taxa de deposição de poeira de um determinado ângulo de inclinação devido ao vento soprando após duas semanas de exposição às condições climáticas (HEGAZY, 2001). Em contrapartida, o vento também pode aumentar a deposição de poeira na superfície do módulo fotovoltaico. O estudo realizado na Líbia por (O'HARA; CLARKE; ELATRASH, 2006) constatou que aumentos na deposição de poeira geralmente coincidem com aumentos na velocidade média mensal do vento.

2.5.4 Influência da umidade relativa do ar

Quando a luz atinge uma partícula de vapor d'água ela pode ser refratada, refletida ou difratada. Em qualquer desses casos, haverá atenuação na irradiância solar recebida pelo módulo fotovoltaico. A umidade altera a irradiância de forma não linear e a diminuição da irradiância ocasiona o efeito citado na Seção 2.5.1 (Influência da irradiância solar), afetando o desempenho do sistema fotovoltaico (MEKHILEF; SAIDUR; KAMALISARVESTANI, 2012). A Figura 16 demonstra como o aumento da umidade relativa do ar reduz a eficiência do módulo fotovoltaico.

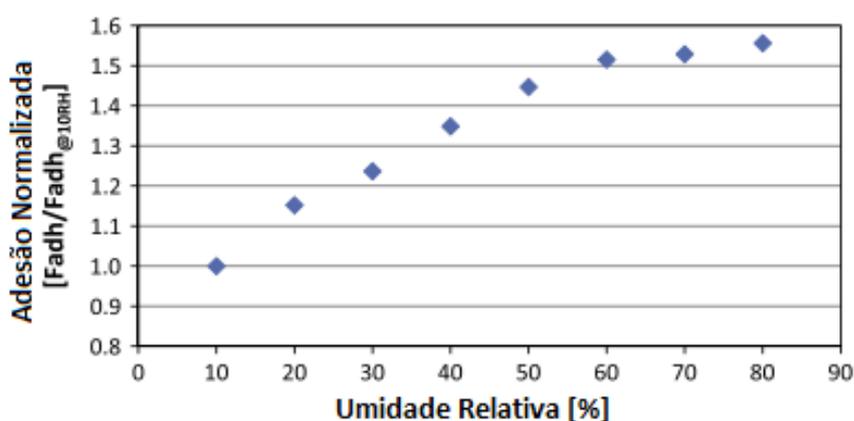
Figura 16 - Influência da umidade relativa do ar na eficiência do módulo fotovoltaico



Fonte: adaptado de Omubo-Pepple; Israel-Cookey, 2009.

A umidade relativa do ar também influencia na deposição de sujeira nos módulos fotovoltaicos. O efeito da condensação de vapor na superfície do módulo fotovoltaico forma pontes capilares de água entre as partículas de poeira e a superfície de vidro, favorecendo o aumento da adesão entre a partícula e a superfície, o que estimula o acúmulo de poeira (SAID et al., 2018). Quantitativamente, um aumento na umidade relativa de (40 a 80)% leva a um aumento na adesão de sujeira em cerca de 80% (SAID; WALWIL, 2014), como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Efeito da umidade na força de adesão



Fonte: adaptado de Said; Walwil, 2014.

Outro problema a ser abordado é o ingresso de umidade no encapsulamento do módulo fotovoltaico que poderá degradar o material encapsulante e diminuir o desempenho do dispositivo. A redução significativa da entrada de umidade requer o

uso de um selo hermético, o uso de um encapsulante de baixa difusividade ou um encapsulante contendo uma grande quantidade de dessecante (KEMPE, 2006).

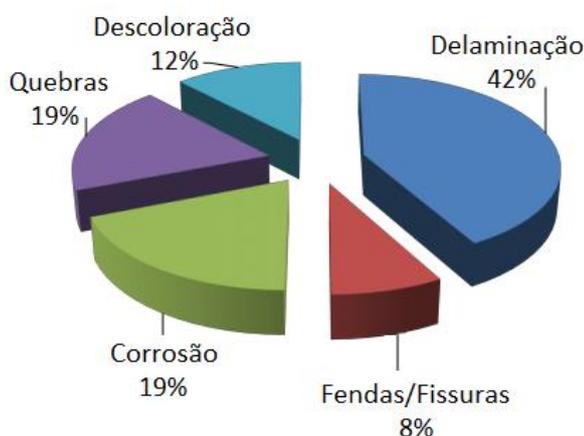
Vale ressaltar que o aumento na velocidade do vento além de remover mais calor da superfície do módulo pode também reduzir a umidade relativa do ar em seu entorno, melhorando desta forma a eficiência do gerador fotovoltaico (MEKHILEF; SAIDUR; KAMALISARVESTANI, 2012).

2.5.5 Influência da degradação natural

O desgaste natural ao longo dos anos é inevitável e decerto é uma das causas da mitigação do desempenho do módulo fotovoltaico. Geralmente a degradação ocorre devido a reações químicas e mecanismos físicos que causam danos às células, ao módulo ou à instalação como um todo. A perda de rendimento de módulos fotovoltaicos de silício cristalino instalados em campo é entre 0,5% e 1,0% por ano, mas esse valor pode variar dependendo das condições ambientais as quais o módulo se encontra submetido (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre os vários tipos de degradação, a corrosão, delaminação, descoloração e quebra/rachaduras são os tipos que predominam nos módulos fotovoltaicos (CHANGWOON; NOCHANG; JAESEONG, 2012). A Figura 18 apresenta a contribuição em porcentagem de cada tipo de degradação.

Figura 18 - Principais tipos de degradação nos módulos fotovoltaicos



Fonte: adaptado de Changwoon; Nochang; Jaeseong, 2012.

2.5.1 Considerações finais

Alguns dos fatores citados acima se correlacionam com o depósito de sujeira, afetando negativamente o desempenho do sistema fotovoltaico. O depósito de sujeira na superfície do módulo por exemplo, pode atuar como uma camada protetora, dificultando a transferência de calor do módulo para o ar atmosférico que ocasiona um aumento na temperatura operacional do módulo e conseqüentemente diminui a capacidade de geração, além de degradar a estrutura do módulo fotovoltaico. A umidade relativa do ar elevada favorece a adesão de partículas sedimentadas na superfície dos módulos, aumentando a deposição de sujeira que por sua vez influencia no desempenho do módulo. Já em relação a velocidade do vento, estudos constatam que o aumento da velocidade do vento pode elevar ou diminuir a deposição de poeira na superfície do módulo fotovoltaico.

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo estão descritos os instrumentos, equipamentos, materiais de consumo e métodos utilizados no planejamento experimental que pretende avaliar a influência de sujidades típicas da RMGV na redução da capacidade de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos e desenvolver um modelo matemático empírico que deve estimar essa redução a partir do tipo de sujidade depositada sobre sua superfície.

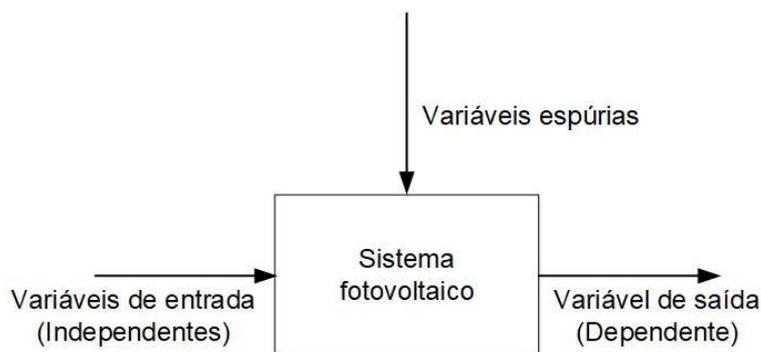
A hipótese científica levantada é que a capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico é impactada, atenuada, de diferentes maneiras dependendo da característica da sujidade depositada sobre ele e que o aumento da densidade superficial de sujidade ocasiona um decréscimo na geração de energia elétrica.

Desse modo, a partir da análise das informações obtidas nos experimentos será possível desenvolver um modelo matemático empírico que deve estimar a redução da capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico a partir da caracterização de sujidade depositada sobre sua superfície. Com base na estimativa da redução da capacidade de geração de energia elétrica, em uma análise de viabilidade econômica de um projeto fotovoltaico o analista terá mais subsídios e menor incerteza na estimativa da energia elétrica gerada e também nos custos de manutenção e operação ao considerar a limpeza dos módulos.

3.2 SISTEMA PROPOSTO

Uma representação lógica que descreve o sistema físico real é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Representação do sistema físico real

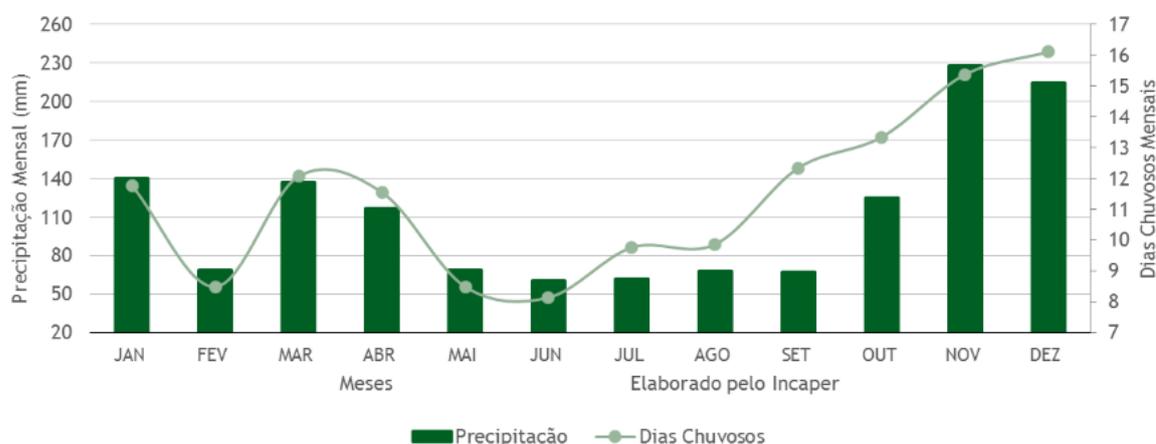


As variáveis independentes, i.e., de entrada, que caracterizam o depósito de sujeira, são:

- ✓ tipos de sujeira: definidas a partir dos materiais sedimentáveis recorrentes na Região Metropolitana da Grande Vitória, conforme discutido na Seção 2.4, a saber:
 - pó de minério de ferro,
 - pó de pedreira,
 - pó de construção civil e
 - pó de carvão mineral;
- ✓ densidade superficial do depósito de sujeira, cuja faixa de análise foi definida em função das taxas típicas de deposição na Região Metropolitana da Grande Vitória para um período de 7, 14 e 30 dias: 2,5; 5,0; 10g/m² respectivamente.

Para cada um dos quatro tipos da variável qualitativa “sujeira”, serão adotados três níveis quantitativos para a variável “densidade superficial”. As diferentes densidades de sujeira serão depositadas nas superfícies de 3 módulos, denominados módulos experimentais, mantendo a superfície do quarto módulo limpa, denominado módulo de referência. Os valores adotados de densidade superficial correspondem a aproximadamente 7 dias, 14 dias e 30 dias respectivamente de deposição típica de material sedimentável na RMGV. Os experimentos limitam-se a 30 dias de deposição de material particulado visto que a cidade de Vitória/ES normalmente não permanece 30 dias consecutivos sem chuva, conforme é possível observar na Figura 20.

Figura 20 - Série histórica de precipitação mensal entre os anos de 1984 e 2014 na estação meteorológica de Vitória/ES



Fonte: Incaper Sistema de Informações Meteorológicas, 2018.

Além disso, segundo um estudo realizado por (MÉRI SANTOS; REIS JÚNIOR, 2011), a taxa média mensal de deposição na RMGV para os meses de abril de 2009 a junho de 2010 variou entre 6 a 14g/m²/mês, portanto nesse experimento adotou-se uma taxa de deposição mensal de 10g/m²/mês.

A variável dependente, i.e., de saída, é a perda de capacidade de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos. Outras variáveis tais como a temperatura própria da placa, irradiância solar, sombreamento, velocidade do vento, umidade relativa do ar e a degradação natural também afetam a capacidade de geração de energia elétrica. Nesse experimento, estas outras variáveis são classificadas como variáveis espúrias, uma vez que não são de interesse para a pesquisa, mas podem afetar a variável de saída, a capacidade de geração de energia do sistema fotovoltaico. Para expurgar a interferência destas variáveis nos resultados, os módulos fotovoltaicos estão instalados na mesma inclinação, expostos às mesmas condições ambientais, são módulos novos e a duração dos experimentos – alguns dias – é um tempo irrelevante em relação à vida útil dos módulos – algumas décadas, portanto pode-se desconsiderar a degradação natural. Todas as medições serão feitas de maneira simultânea e de maneira comparativa em um módulo de referência, sem sujidade, e três módulos experimentais, com sujidade, de maneira que tanto o módulo de referência quanto os módulos sob análise estarão submetidos às mesmas influências. Esse procedimento minimiza a influência de erros de medição e a propagação de incertezas (GONÇALVES JÚNIOR; DE SOUZA, 2008).

Para que o procedimento experimental com medições comparativas entre os módulos fotovoltaicos não seja influenciado pelas eventuais diferenças construtivas entre as partes do sistema, outra variável espúria, inicialmente os módulos serão caracterizados de maneira comparativa em condição sem deposição de sujidade. O experimento será feito inicialmente com os módulos completamente limpos, registrando-se a geração de energia elétrica. Com isso, será determinada a produção de energia de cada um dos três módulos experimentais em relação ao módulo de referência, que podem eventualmente não ser exatamente iguais.

Se ainda assim for observada alguma interferência, serão estabelecidos métodos de avaliação ou mitigação dessa variável.

Outro fator que pode influenciar os resultados é o depósito de sujidade adicional oriunda da atmosfera na superfície dos módulos durante a realização do experimento. No entanto, considerando o tempo de experimento em torno de 6h é possível concluir através da Equação 3.1 que a deposição de sujidade ocorrida durante o ensaio é irrelevante, cerca de 1% da deposição experimental.

$$10 \frac{g}{m^2 \times mês} = 10 \frac{g}{m^2 \times 31 dias} = \frac{0,32g}{m^2 \times dia} = \frac{0,32g}{m^2 \times 24h} \times 6h \quad (3.1)$$

$$< \frac{0,1g}{m^2}$$

As medições serão realizadas tipicamente das 10:00 às 16:00h, de 5 em 5 min, portanto para cada experimento serão feitas 72 medições. Cada experimento é composto da combinação de duas variáveis de entrada, uma com quatro níveis qualitativos (tipo de sujidade) e outra com três níveis quantitativos (nível de deposição de sujidade), perfazendo 12 combinações. Logo, serão efetuadas 864 medições, como é possível visualizar na Equação 3.2.

$$n_{medições} = 72 * 12 = 864 \quad (3.2)$$

3.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO UTILIZADO

O sistema fotovoltaico *on-grid* utilizado na presente pesquisa encontra-se instalado na cidade de Vitória/ES, mais especificamente na laje da arquibancada do Estádio Governador Bley, pertencente ao Campus Vitória do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), como apresentado na Figura 21. Os módulos fotovoltaicos foram instalados com uma inclinação de 15° em relação ao plano horizontal e direcionados ao norte geográfico.

3.3.1 Dados técnicos do sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico é constituído por 4 módulos, modelo TP660P com potência de saída de 270Wp cada, totalizando uma potência nominal de 1080Wp. Esses módulos foram fabricados pela empresa Talesun Solar Technologies e seus dados elétricos encontram-se dispostos na Tabela 2, onde *Standard Test Conditions* (STC) são os testes realizados em laboratórios sob condições padronizadas e *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT) é a temperatura nominal de operação das células dos módulos fotovoltaicos, na qual as características elétricas podem se aproximar mais das características efetivas verificadas em campo.

O sistema de microinversor APsystems é composto por três elementos principais (APSYSTEMS, 2018):

- ✓ Microinversor APsystems;
- ✓ Unidade de Comunicação de Energia (ECU) APsystems;
- ✓ Monitor de Energia e Análise (EMA) APsystems, baseado em um sistema de monitoramento web.

Cada módulo fotovoltaico é conectado a um microinversor APsystems individualmente. Isso permite que cada módulo possua um rastreador de ponto de potência máxima (MPPT) exclusivo, o que assegura que a máxima energia de cada módulo seja alcançada independente do desempenho dos demais módulos fotovoltaicos do sistema. Isso se faz necessário, visto que nos experimentos serão depositadas diferentes densidades de amostras de sujidade nas superfícies de 3 módulos, denominados módulos experimentais, mantendo a superfície do quarto módulo limpa, que servirá de referência para avaliar o impacto provocado por cada densidade de sujidade na geração de energia elétrica.

Os microinversores utilizados no sistema são do fabricante APsystems, modelo YC500A (220V) e seus dados elétricos encontram-se na Tabela 3. Cada microinversor pode gerenciar até dois módulos fotovoltaicos com MPPT's independentes, no entanto optou-se por utilizar apenas um módulo por microinversor. A Figura 22 apresenta os microinversores instalados.

Para a aquisição de dados de geração de energia elétrica utilizou-se a própria ECU do sistema fotovoltaico. Os microinversores enviam os dados de desempenho para a ECU através dos próprios cabos de alimentação, no qual o sinal de dados é multiplexado em frequência diferente da rede de energia (60Hz). A ECU, por sua vez, reporta automaticamente as informações ao servidor web EMA. O *software* EMA exibe o desempenho de todo o sistema e informa sobre quaisquer eventos anormais. A Figura 23 exemplifica o processo para a aquisição dos dados de geração de energia elétrica.

Tabela 3 - Dados elétricos microinversores fotovoltaicos

| Dados da entrada (CC) | |
|--|---------------|
| MPPT faixa de tensão | 22 - 45V |
| Faixa de tensão de operação | 16 - 52V |
| Tensão máxima de entrada | 55V |
| Tensão de partida | 22V |
| Corrente máxima de entrada | 12A x 2 |
| Dados de saída (CA) | |
| Potência nominal de saída CA | 500W |
| Tensão nominal de saída | 220V |
| Corrente máxima de saída | 2,27A |
| Faixa de tensão de saída padrão | 176 - 242V |
| Faixa de tensão de saída estendida | 150 - 298V |
| Frequência nominal de saída | 60 Hz |
| Faixa padrão de frequência de saída | 57,5 - 62Hz |
| Faixa estendida de frequência de saída | 55,1 - 64,9Hz |
| Fator de potência | >0,99 |
| Distorção harmônica total | <3% |
| Eficiência | |
| Eficiência de pico | 95,5% |
| Consumo de potência noturna | 120mW |

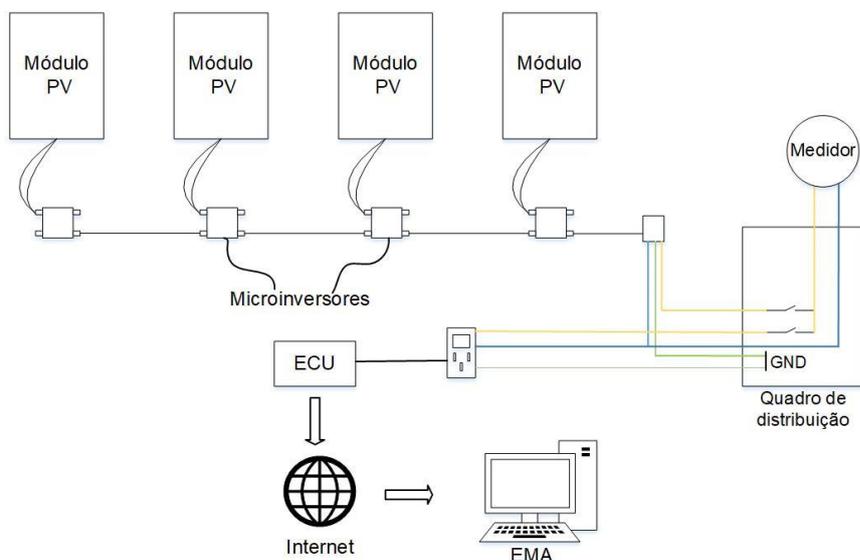
Fonte: adaptado de APsystems, 2018.

Figura 22 - Microinversores da APsystem instalados



Fonte: Autora, 2018.

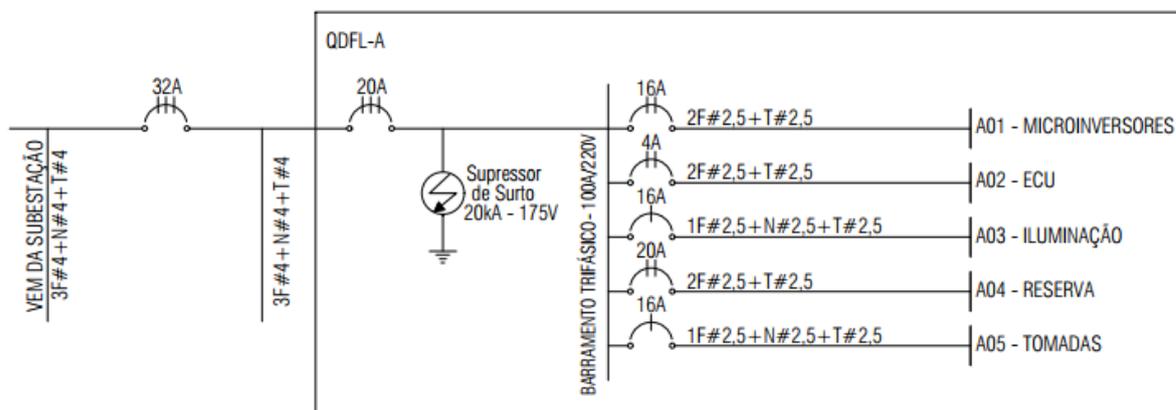
Figura 23 - Fluxograma de aquisição de dados da geração de energia elétrica



Fonte: adaptado de APsystems, 2018.

O diagrama elétrico da instalação do sistema fotovoltaico é ilustrado Figura 24.

Figura 24 - Diagrama elétrico da instalação do sistema fotovoltaico



Fonte: Autora, 2018.

Cada módulo fotovoltaico possui 1,65m de comprimento e 0,99m de largura, resultando em uma área útil de 1,63m². O sistema completo possui uma área útil de 6,53 m² (Equação 3.3). A Figura 25 mostra os 4 módulos fotovoltaicos instalados.

$$A_{Total} = 4 * 1,63 = 6,53m^2 \quad (3.3)$$

Figura 25 - Sistema fotovoltaico utilizado no projeto de pesquisa



Fonte: Autora, 2018.

3.3.2 Recursos físicos utilizados

Os recursos físicos necessários para a realização dos experimentos compreendem os equipamentos, instrumentos e materiais de consumo listados no Quadro 1.

Quadro 1 - Recursos físicos utilizados na realização dos experimentos

| Instrumentos de medição | Variável a ser medida |
|---|---|
|  | <p>Balança de precisão BEL Engineering modelo S2202</p> <p>Massa de poeira/sujidade - g</p> |
|  | <p>Medidor de energia solar modelo SP-2000</p> <p>Irradiância solar – W/m²</p> |
|  | <p>Termo-higrômetro Digital Instrutemp modelo ITHT 2250</p> <p>Umidade relativa do ar - %, temperatura própria dos módulos e atmosférica - °C</p> |



Estação meteorológica
Davis Vantage Pro2

Velocidade do vento –
m/s², temperatura
atmosférica - °C e
umidade relativa do ar -
%



Termômetro digital de 4
canais Minipa modelo
MT-1044

Temperatura própria dos
módulos fotovoltaicos -
°C

Equipamentos

Função



Estufa Fanem modelo
320/3

Realizar a secagem das
amostras de material
particulado



Peneira 100 mesh

Classificar as amostras
conforme granulometria
desejada



Gerador fotovoltaico

Gerar energia elétrica

| Materiais de consumo | Função | |
|---|--|--|
|  | <p>Amostras de sujidade (minério, carvão, pedreira e construção civil)</p> | <p>Utilizadas para simular diferentes densidades de sujidades nas superfícies dos módulos para avaliar a redução da capacidade de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos em função do depósito da sujidade.</p> |
|  | <p>Espunja/pano de algodão</p> | <p>Limpar as superfícies dos módulos fotovoltaicos</p> |
|  | <p>Prato de vidro</p> | <p>Utilizado para realizar a desumidificação das amostras na estufa</p> |
|  | <p>Pulverizador</p> | <p>Pulverizar as amostras nos módulos fotovoltaicos</p> |
|  | <p>Recipiente/frasco de vidro</p> | <p>Utilizado para armazenar as amostras</p> |

Fonte: Autora, 2018.

3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais a seguir descrevem o passo a passo para a realização dos ensaios em campo que foram executados entre os dias 26/09/2018 e 03/10/2018 das 10:00 às 16:00h.

3.4.1 Preparação das amostras

O primeiro passo na preparação das amostras consiste em sua secagem para remoção de umidade, adequando-as ao peneiramento que as classificará em granulometria. A secagem é realizada em estufa a temperatura de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ durante

o período de 24h. O objetivo da secagem é facilitar o armazenamento e o processo de peneiramento, pois as amostras úmidas podem provocar a deterioração e corrosão dos recipientes onde são guardadas e das peneiras, também podem entupir a malha da peneira dificultando a realização do processo de peneiramento.

As amostras são constituídas por materiais de granulometria diferentes, desde partículas muito grosseiras até mais finas, portanto se faz necessário realizar o peneiramento das amostras. Segundo a definição da norma ABNT MB-3402, as partículas sedimentáveis são consideradas aquelas que atravessam uma peneira de 0,84mm, onde esse valor corresponde ao tamanho da abertura da malha da peneira. Com base nessa definição e em um estudo realizado por Conti et al. (2009), onde constatou-se que as partículas sedimentáveis na RMGV possuem diâmetro que varia entre (5 a 100) μm , adotou-se uma peneira de alumínio de 100 *mesh* (equivalente a uma abertura de malha de 150 μm) para realizar o peneiramento mecânico das amostras.

Após peneiradas, as amostras foram pesadas em uma balança de precisão e armazenadas em recipientes de vidro como mostrado na Figura 26. No total são 3 recipientes para cada tipo de amostra que contém as seguintes quantidades de massa por recipiente: 4,07g, 8,15g e 16,30g, onde os respectivos tempos sem limpeza simulados podem ser observados na Tabela 4. Lembrando que o módulo fotovoltaico possui área de 1,63m², portanto o cálculo para obter o valor da massa contida no recipiente de 7 dias, por exemplo, é realizado de acordo com a Equação 3.4.

Tabela 4 - Quantidade de sujidade e o respectivo tempo simulado sem limpeza para cada módulo fotovoltaico

| Módulo Fotovoltaico | Massa da sujidade (g) | Tempo sem limpeza (dias) |
|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| Módulo 01 | 0,00 | 0 |
| Módulo 02 | 4,07 | 7 |
| Módulo 03 | 8,15 | 14 |
| Módulo 04 | 16,30 | 30 |

Fonte: Autora, 2018.

Figura 26 - Armazenamento das amostras em recipientes de vidro



Fonte: Autora, 2018.

$$m_{\text{frasco}_7\text{dias}} = \text{densidade superficial amostra}_{7\text{dias}} * \text{área}_{\text{módulo}} \quad (3.4)$$

$$= 2,5 \times 1,63 = 4,07g$$

3.4.2 Limpeza e pulverização das amostras sobre os módulos fotovoltaicos

Previamente à pulverização da amostra na superfície do módulo fotovoltaico é necessário realizar a sua limpeza, de forma a remover qualquer poeira que possa ter. Em cada um dos dias dos experimentos, os módulos foram limpos com bucha, detergente e água em abundância e posteriormente foram utilizados panos de algodão para auxiliar na secagem, conforme recomendado por Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski (2013). Ao término dos experimentos, foi realizado o mesmo processo de limpeza nos módulos fotovoltaicos.

Posteriormente à limpeza, cada módulo foi “poluído” uniformemente por pulverização de água contendo o poluente selecionado e esperou-se um tempo suficiente para que a água pulverizada evaporasse e a temperatura operacional de cada módulo estabilizasse, de acordo com o método utilizado por Kaldellis, Fragos e Kapsali (2011).

A Tabela 5 apresenta os dias, o tipo e as massas das sujidades utilizadas nos experimentos e a Figura 27 ilustra o resultado da aplicação da sujidade tipo carvão sobre os módulos realizada no dia 03/10/2018, onde é possível visualizar os diferentes níveis de sujidade dos módulos.

Tabela 5 - Cronograma dos experimentos

| Data | Tipo de sujidade | Massa da sujidade (g) |
|------------|------------------|-------------------------|
| 26/09/2018 | Minério | 0,00; 8,15; 16,30 |
| 28/09/2018 | Construção Civil | 0,00; 4,07; 8,15; 16,30 |
| 01/10/2018 | Pedreira | 0,00; 4,07; 8,15; 16,30 |
| 02/10/2018 | Minério | 0,00; 4,07 |
| 03/10/2018 | Carvão | 0,00; 4,07; 8,15; 16,30 |

Fonte: Autora, 2018.

Figura 27 - Módulos fotovoltaicos com aplicação da sujidade tipo carvão



Fonte: Autora, 2018.

3.4.3 Medição das variáveis de interesse

Os parâmetros meteorológicos, incluindo a temperatura atmosférica, a umidade relativa do ar, a velocidade e a direção do vento são medidos através de sensores instalados na estação meteorológica Davis Vantage Pro2 do IFES localizada próxima ao sistema fotovoltaico. A irradiância solar é medida usando o piranômetro modelo SP-2000. Os dados da geração de energia elétrica de cada módulo fotovoltaico foram obtidos através do sistema de monitoramento em tempo real da APsystems.

A temperatura própria de cada módulo fotovoltaico é registrada na parte de trás dos módulos através de três canais do termômetro Minipa MT-1044 e do medidor de contato do termo-higrômetro ITHT 2250. Com o intuito de aumentar a área de contato entre o sensor e o módulo utilizou-se pasta térmica. Os valores de temperatura de

cada módulo foram lidos e registrados manualmente. Todas as medições são realizadas com uma frequência de 5min das 10 às 16h.

Estão listadas na Tabela 6 as variáveis que foram medidas durante a execução dos experimentos.

Tabela 6 - Variáveis a serem medidas durante a execução dos experimentos

| Variáveis a serem medidas |
|---------------------------------------|
| Temperatura própria [°C] |
| Temperatura atmosférica [°C] |
| Umidade relativa do ar [%] |
| Velocidade do vento [m/s] |
| Irradiância solar [W/m ²] |
| Potência elétrica gerada [W] |

Fonte: Autora, 2018.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As partículas de sujidade são caracterizadas para certificação de que os procedimentos de obtenção, secagem e peneiramento as classificou conforme necessário. Os métodos de caracterização incluem o dimensionamento de partículas, análise morfológica e análise de composição química (SAID et al., 2018). Portanto, as amostras coletadas foram analisadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PROPEMM) do IFES Campus Vitória para comprovar a eficácia do peneiramento mecânico e obter análise da composição química das partículas.

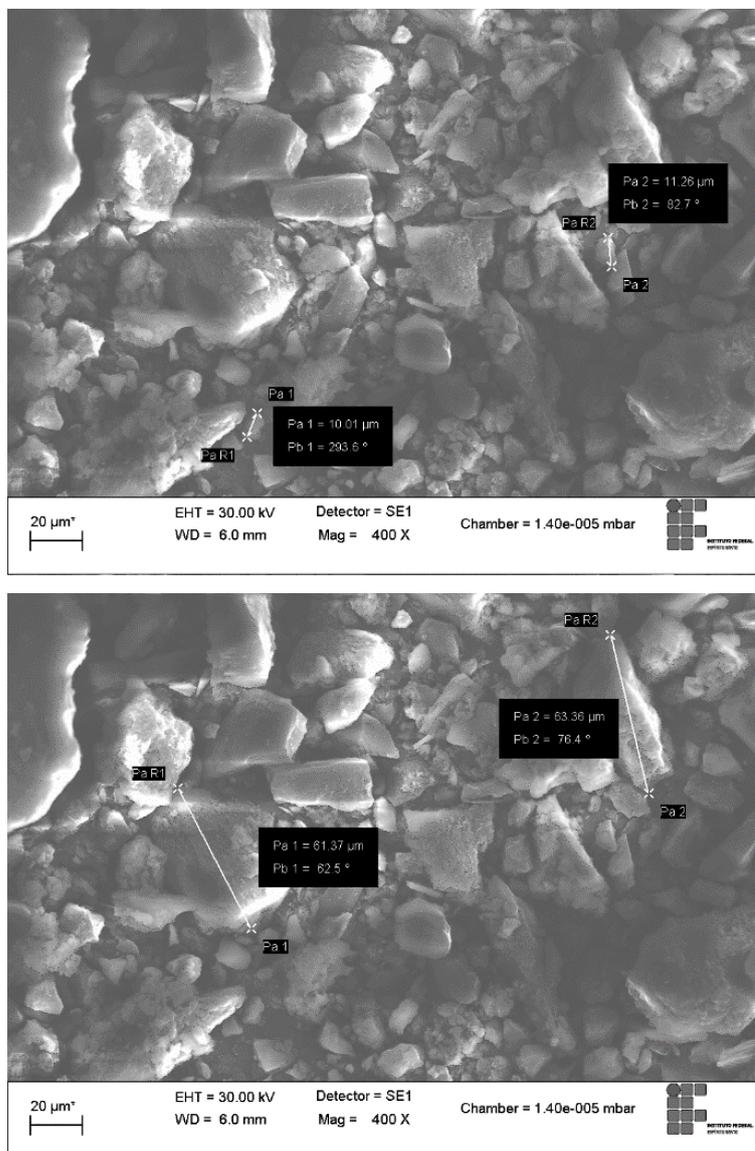
3.5.1 Análise do tamanho das partículas

A técnica do peneiramento mecânico realizada depois da secagem das amostras assegura que as partículas tenham tamanhos inferiores à 150µm, no entanto, utilizou-se o MEV para certificar a eficiência desta técnica.

A Figura 28 é um exemplo das imagens obtidas pela análise do MEV e corresponde à amostra de pó de carvão mineral. A figura indica que as partículas da amostra compostas de diferentes formas e tamanhos. Na parte superior da imagem estão destacadas as medidas de partículas de amostra com diâmetros de cerca de 10µm, esse número possui uma boa representatividade do diâmetro das menores partículas. Em contrapartida, a parte inferior da imagem destaca as medidas de partículas

maiores indicando que os diâmetros dessas partículas são de 63 μ m. Portanto, conclui-se que a maioria das partículas da amostra de pó de carvão mineral possuem diâmetros no intervalo de 10 e 63 μ m.

Figura 28 - Tamanho das partículas da amostra de pó de carvão mineral

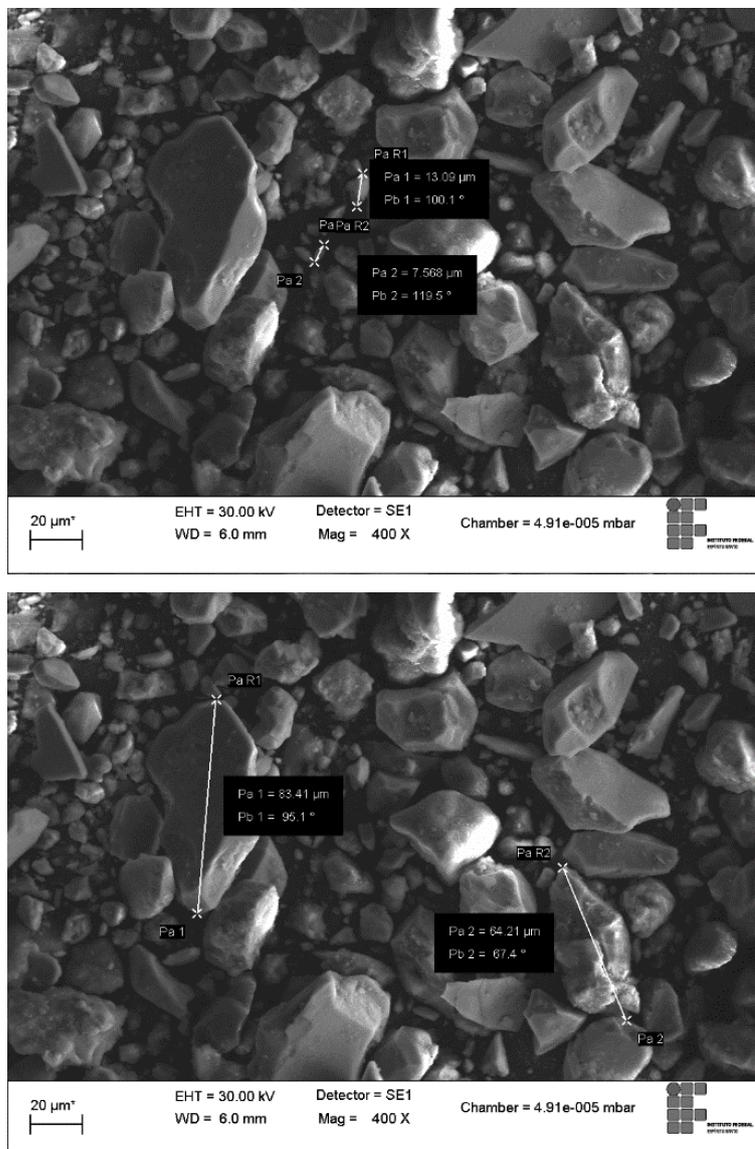


Fonte: Autora, 2018.

A Figura 29 corresponde à amostra de pó de minério de ferro e também indica que as partículas são compostas de diferentes formas e tamanhos. Na parte superior da imagem são apresentadas partículas de amostra com diâmetros de cerca de 7,6 μ m, esse número possui uma boa representatividade do diâmetro das menores partículas. Em contrapartida, a parte inferior da imagem indica que os diâmetros das partículas

maiores são de 83 μ m. Portanto, conclui-se que a maioria das partículas da amostra de pó de minério de ferro possuem diâmetros no intervalo de 7,6 e 83 μ m.

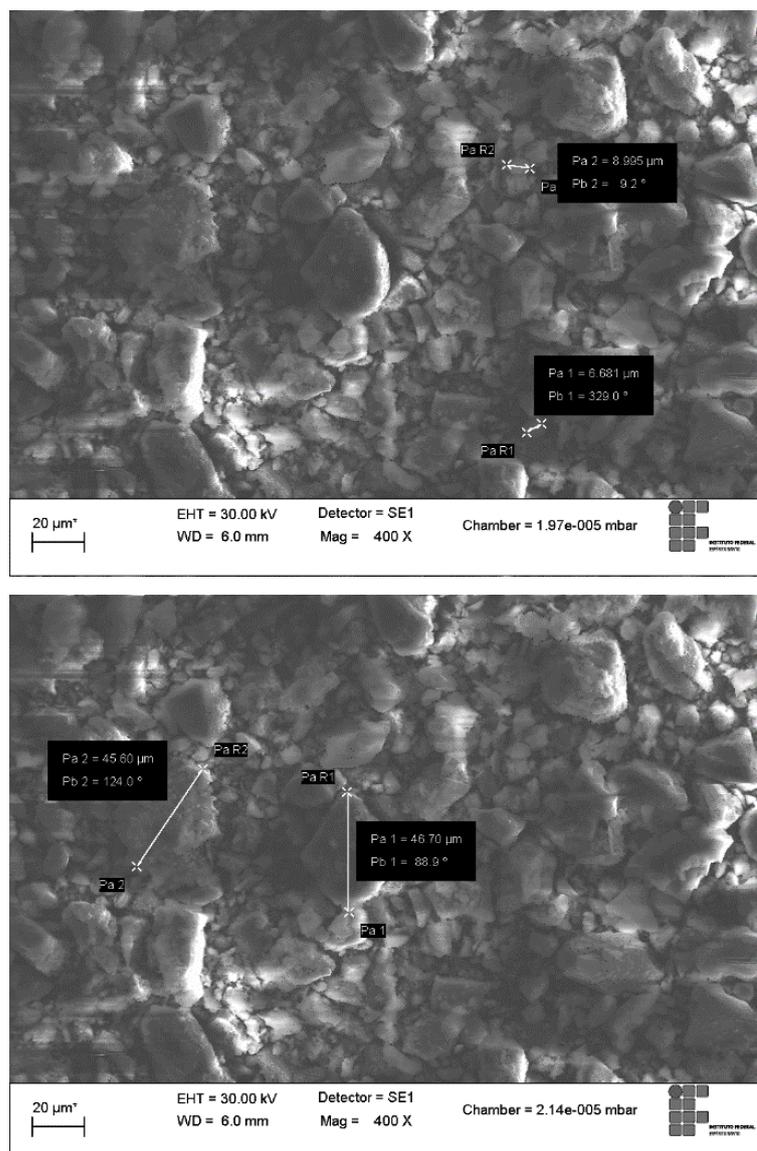
Figura 29 - Tamanho das partículas da amostra de pó de minério de ferro



Fonte: Autora, 2018.

A Figura 30 corresponde à amostra de pó de construção civil e também indica que as partículas são compostas de diferentes formas e tamanhos. Na parte superior da imagem são apresentadas partículas de amostra com diâmetros de cerca de 6,7 μ m, esse número possui uma boa representatividade do diâmetro das menores partículas. Em contrapartida, a parte inferior da imagem indica que os diâmetros das partículas maiores são de 46,7 μ m. Portanto, conclui-se que a maioria das partículas da amostra de pó de construção civil possuem diâmetros no intervalo de 7 e 47 μ m.

Figura 30 - Tamanho das partículas da amostra de pó de construção civil



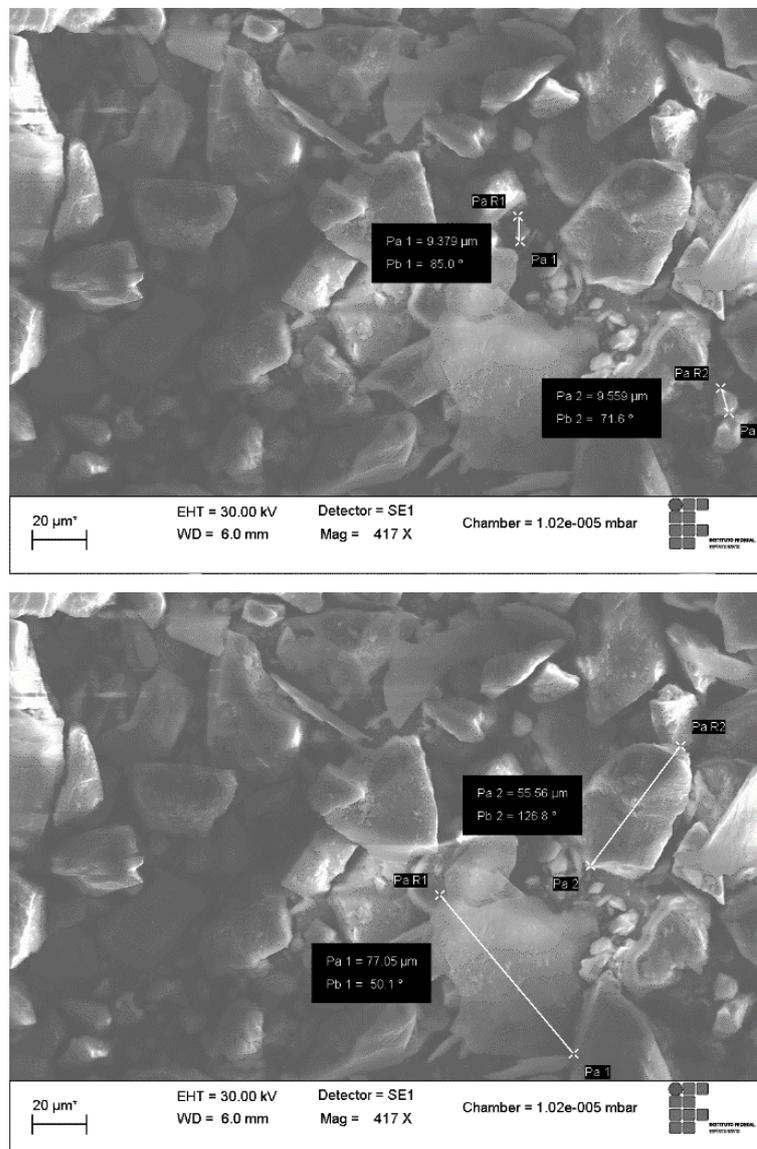
Fonte: Autora, 2018.

A Figura 31 corresponde à amostra de pó de pedreira e também indica que as partículas são compostas de diferentes formas e tamanhos. Na parte superior da imagem são apresentadas partículas de amostra com diâmetros de cerca de 9,4μm, esse número possui uma boa representatividade do diâmetro das menores partículas. Em contrapartida, a parte inferior da imagem indica que os diâmetros das partículas maiores são de 77μm. Portanto, conclui-se que a maioria das partículas da amostra de pó de construção civil possuem diâmetros no intervalo de 9,5 e 77μm.

Segundo Conti et al. (2009), os diâmetros das partículas sedimentáveis da região de estudo varia entre 5 e 100μm. Portanto, pode-se concluir que os tamanhos das

partículas das amostras são compatíveis com os tamanhos das partículas típicas da região de estudo.

Figura 31 - Tamanho das partículas da amostra de pó de pedra



Fonte: Autora, 2018.

3.5.1 Análise da composição química das partículas

A natureza das partículas das amostras, incluindo composição química e cor, exerce um papel importante no grau de redução na transmissão da cobertura do vidro e consequentemente no desempenho do módulo fotovoltaico (SAID et al., 2018), fato que salienta a importância de se realizar a análise da composição química das partículas.

A análise dos elementos químicos das partículas das amostras foi realizada utilizando o MEV. A Figura 32 ilustra os resultados da composição química da amostra de carvão. Pode-se observar que o carbono tem a maior concentração química seguida do oxigênio. O resto da composição inclui silício, alumínio, ferro, enxofre, cálcio, potássio e magnésio.

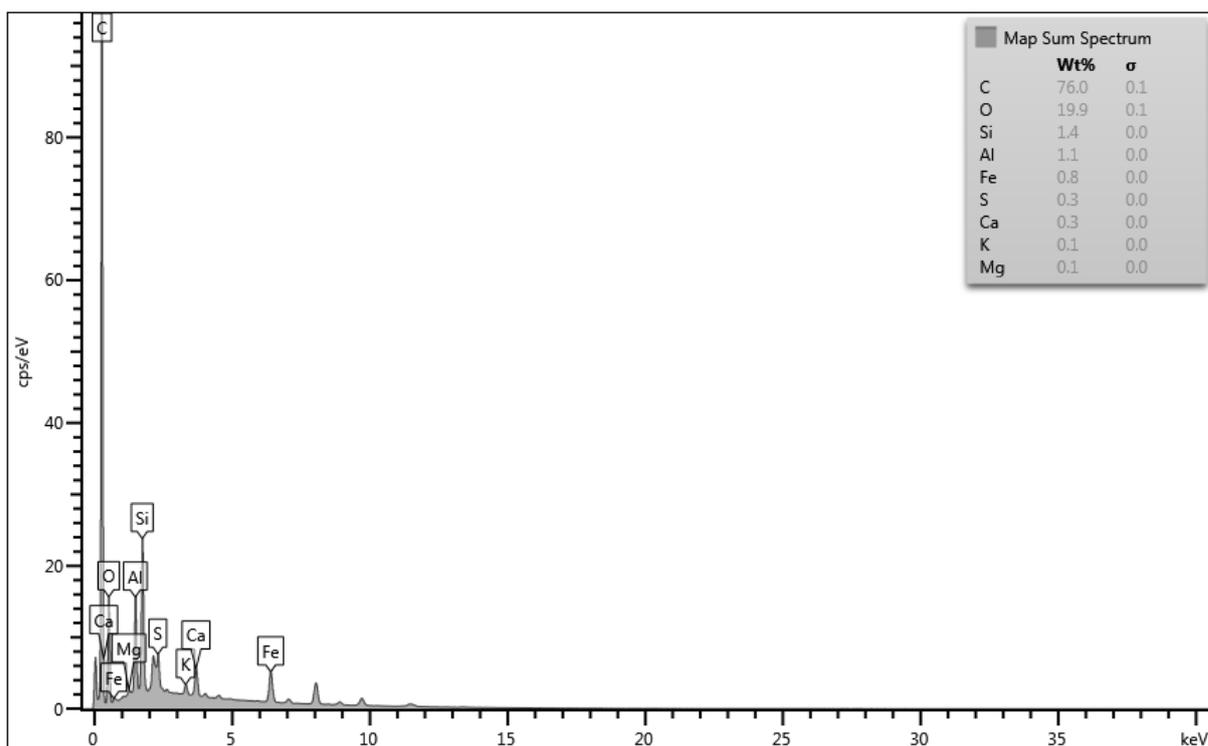
Figura 33 ilustra os resultados da composição química da amostra de minério de ferro. Pode-se observar que o ferro tem a maior concentração química seguida do oxigênio e carbono. O resto da composição inclui alumínio, silício, cobre, cálcio, magnésio e titânio.

A Figura 34 ilustra os resultados da composição química da amostra de pó de construção civil. Pode-se observar que o oxigênio tem a maior concentração química seguida do carbono, cálcio e silício. O resto da composição inclui alumínio, magnésio, cobre, ferro, enxofre, potássio, sódio, itérbio, titânio, manganês e cloro.

A Figura 35 ilustra os resultados da composição química da amostra de pó de pedreira. Pode-se observar que o oxigênio tem a maior concentração química seguida do carbono e silício. O resto da composição inclui alumínio, ferro, cálcio, potássio, sódio, cobre, magnésio, titânio e bário.

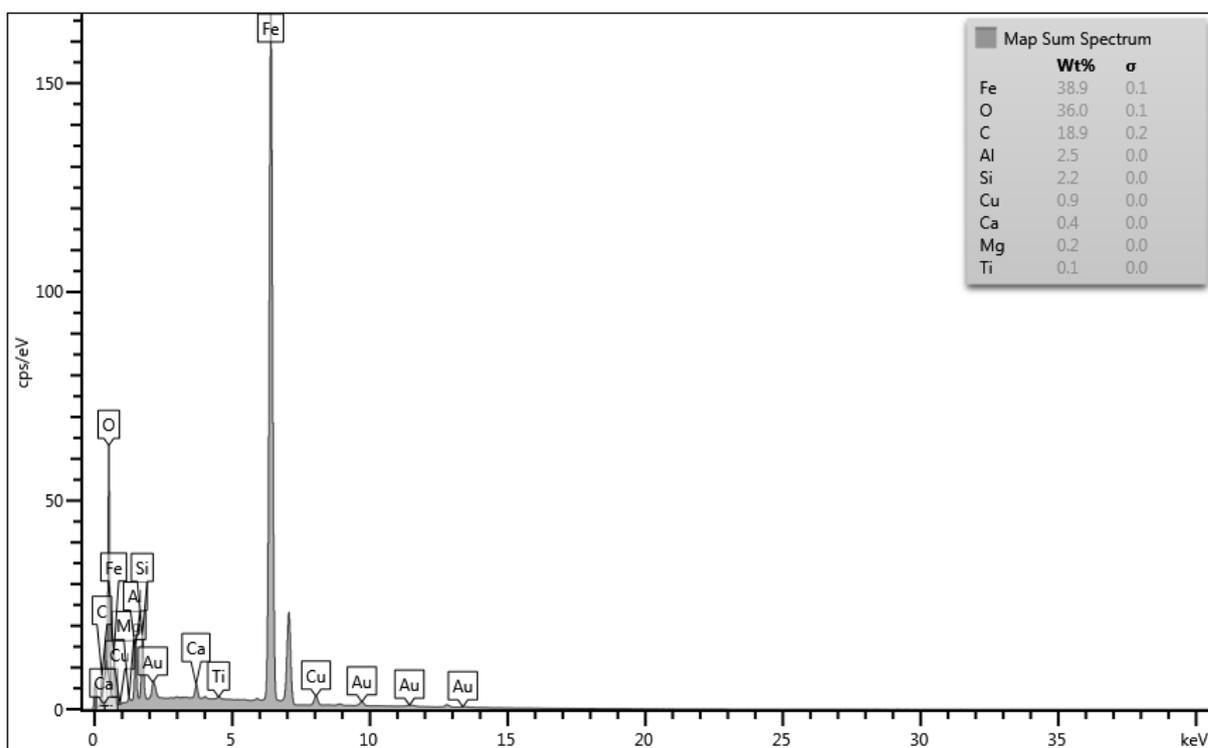
Para todas amostras, verificou-se que suas composições químicas são compatíveis com as composições químicas das partículas típicas da região de estudo (MÉRI SANTOS; REIS JÚNIOR, 2011).

Figura 32 - Composição química da amostra de carvão



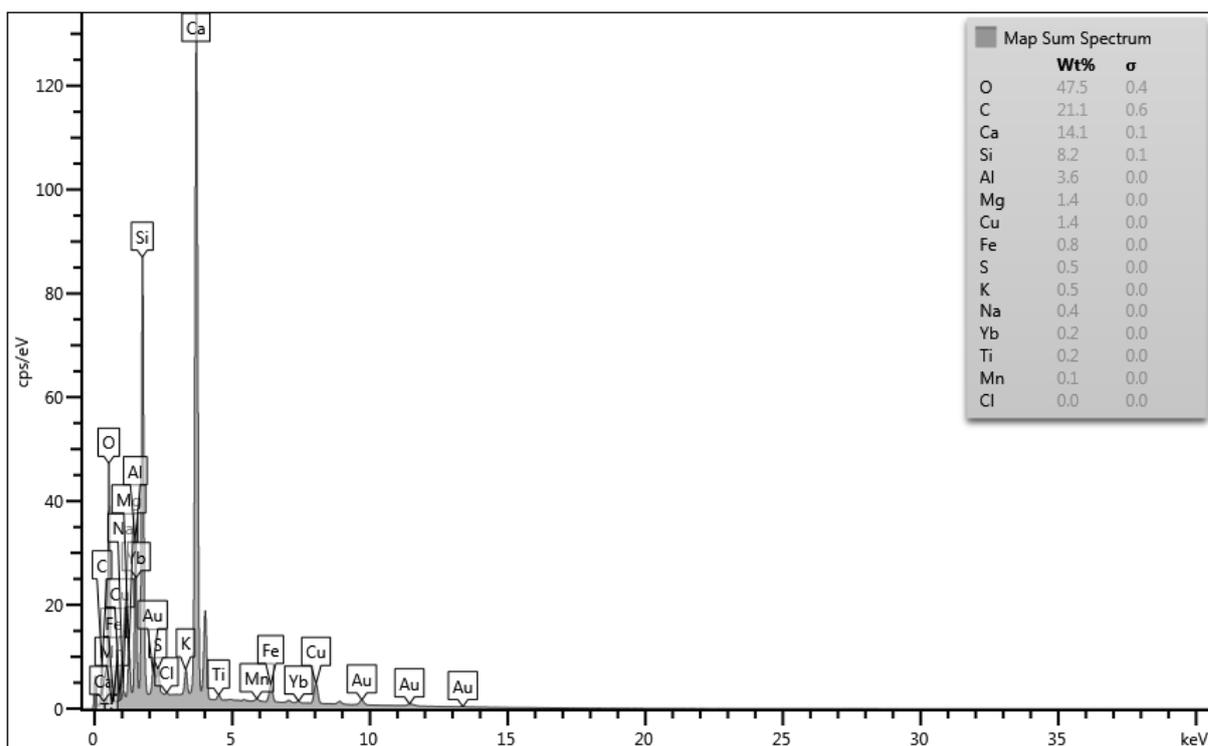
Fonte: Autora, 2018.

Figura 33 - Composição química da amostra de minério de ferro



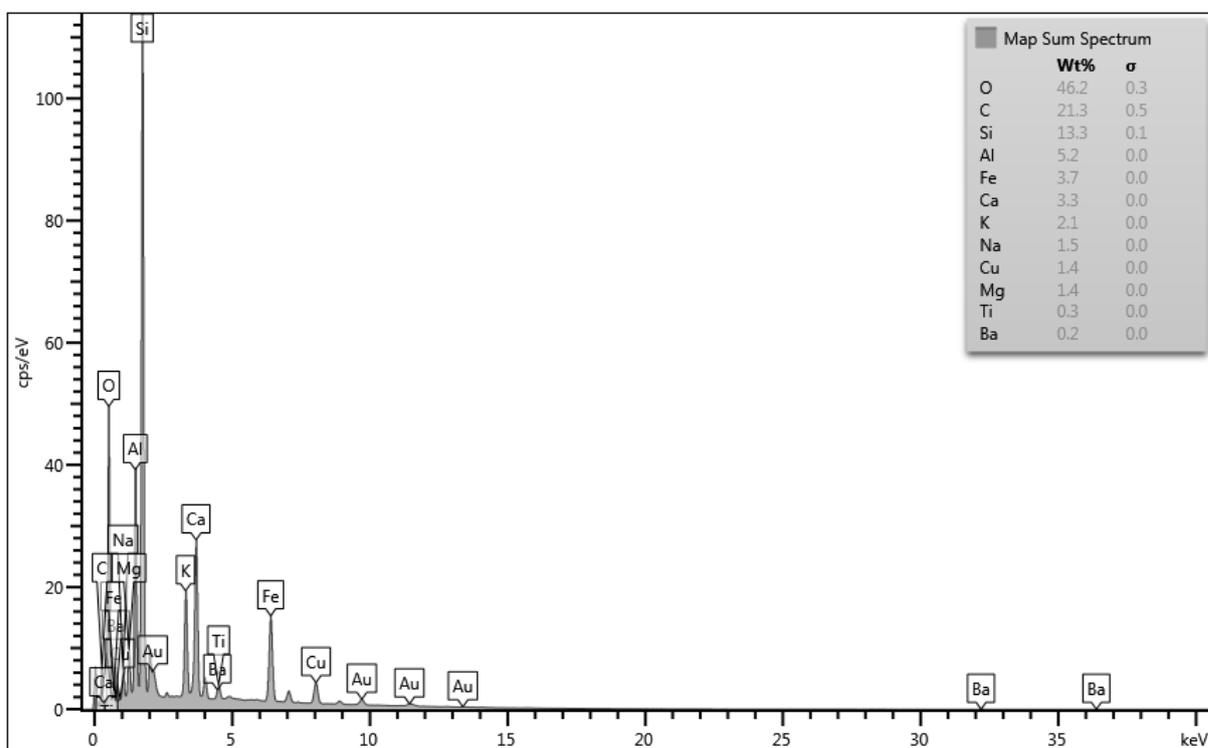
Fonte: Autora, 2018.

Figura 34 - Composição química da amostra de pó de construção civil



Fonte: Autora, 2018.

Figura 35 - Composição química da amostra de pó de pedraira



Fonte: Autora, 2018.

3.6 TESTE DE HIPÓTESE

A estimativa do intervalo de confiança dos parâmetros e o teste estatístico de hipóteses são métodos fundamentais usados na etapa de análise de dados de um experimento comparativo, por exemplo, em comparar a média de uma população com um valor especificado. De acordo com Montgomery e Runger (2006), o objetivo do teste de hipótese é determinar se uma dada afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações é verdadeira.

O Teste Z é um teste de hipótese no qual assume-se que a variável em estudo tenha distribuição normal com variância populacional conhecida. Seja q uma variável aleatória com média μ e desvio padrão σ e seja \bar{q} um estimador para μ , $\sigma_{\bar{q}}$ o desvio padrão deste estimador e n o número de amostras, a estatística do teste Z é dada pela Equação 3.5 (MONTGOMERY; RUNGER, 2006).

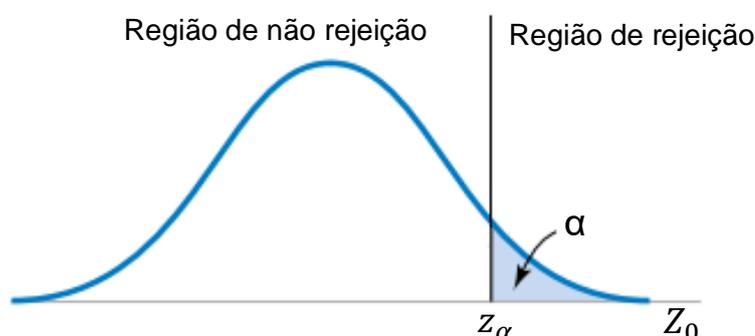
$$Z_0 = \frac{\bar{q} - \mu}{\sigma_{\bar{q}}} = \frac{\bar{q} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (3.5)$$

Suponha que se deseja testar as hipóteses:

$$\begin{aligned} H_0: \mu &\leq \mu_0 \\ H_1: \mu &> \mu_0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

A hipótese nula $H_0: \mu \leq \mu_0$ será aceita se $Z_0 < z_\alpha$ e será rejeitada (que implica em aceitar a hipótese alternativa – H_1) se $Z_0 > z_\alpha$, conforme ilustra a Figura 36.

Figura 36 - Zona de rejeição do teste Z



Fonte: Autora, 2018.

Dado o exposto, o teste Z é utilizado para testar se o módulo com menos sujidade (μ) gera mais energia do que o módulo com um maior nível de sujidade (μ_0). Portanto, é esperado que a hipótese nula seja rejeitada.

O resultado do teste Z é conhecido como p-valor e representa a probabilidade de rejeitar a hipótese nula H_0 com os dados fornecidos.

$$p < 1 - \alpha \quad (3.7)$$

Onde:

p é o p-valor obtido no teste Z;

α é o nível de significância estabelecido para o experimento.

Se a Equação 3.7 for verdadeira para um determinado nível de significância α , então a hipótese nula pode ser rejeitada (MONTGOMERY; RUNGER, 2006). Para o trabalho em questão, adotou-se um nível de significância de 5%.

3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Previamente à execução dos experimentos com deposição de sujidade foi necessário realizar o ensaio com os módulos limpos, registrando os dados da geração de energia elétrica. Este ensaio é fundamental, pois apesar dos módulos serem do mesmo lote de fabricação, podem haver eventuais diferenças construtivas entre as partes do sistema que influencie nos valores da geração de energia elétrica, dando origem a outra variável espúria, a qual deverá ser mitigada se constatada.

Os dados da geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos foram coletados no dia 31/08/2018, das 10h10min às 16h, de 5 em 5min, totalizando 68 medições. Para analisar os dados da caracterização dos módulos fotovoltaicos, inicialmente foi obtida a potência elétrica gerada por cada módulo em sistema por unidade (pu) e posteriormente foram calculados a média e o desvio padrão para cada um dos 3 módulos experimentais, considerando o módulo 01 como referência/controle. A Tabela 7 apresenta os valores da média e do desvio padrão em pu para cada módulo fotovoltaico.

O resultado de medição de uma grandeza física é uma estimativa do valor dessa grandeza. Portanto, é necessário dar alguma indicação quantitativa da qualidade desse resultado. Sem essa indicação, não é possível comparar os resultados de medição, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos em especificações ou normas. Para expressar o quão corretamente o resultado da medição representa o valor da grandeza medida utiliza-se o conceito da incerteza de medição (INMETRO, 2012).

Tabela 7 - Média e desvio padrão das potências elétricas gerada pelos módulos fotovoltaicos

| Módulos | Média | Desvio Padrão (σ) | Incerteza Expandida |
|------------------------|-------|----------------------------|---------------------|
| Módulo 01 (referência) | 1,000 | - | - |
| Módulo 02 | 0,999 | 0,023 | 0,046 |
| Módulo 03 | 1,018 | 0,023 | 0,046 |
| Módulo 04 | 1,001 | 0,024 | 0,048 |

Fonte: Autora, 2018.

Para avaliar as incertezas de medição do presente trabalho serão utilizados os conceitos estatísticos da abordagem da incerteza-padrão do Tipo A existentes na tradução do *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM) realizada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

De acordo com o INMETRO (2012), na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza q que varia aleatoriamente e para a qual n observações independentes q_k foram obtidas sob as mesmas condições de medições, é a média aritmética das n observações:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3.8)$$

O desvio padrão caracteriza a dispersão dos valores de q_k observados em torno de sua média \bar{q} , ou seja, quantifica quão bem \bar{q} estima o valor esperado e pode ser usado como uma medida de incerteza de \bar{q} (INMETRO, 2012) e é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (3.9)$$

Em muitas situações práticas de medição, o cálculo do intervalo de dispersão é realizado adotando um nível de confiança de 95%, que equivale a dois desvios padrão. Desse modo, cada conjunto de medições é representado pela média aritmética das n medições, que representa uma estimativa do valor real da potência elétrica gerada, acrescida da incerteza da medição para um determinado nível de confiança.

Analisando os valores obtidos na Tabela 7 para o módulo 03, por exemplo, o valor da potência elétrica gerada estará no intervalo de $(1,018 \pm 0,046)$ pu com um nível de confiança de 95%. Como a incerteza expandida é menor do que 5% para um nível de

confiança de 95%, conclui-se que a dispersão das medidas obtidas é pequena e, portanto, a média representa bem as amostras. Sendo assim, em uma primeira análise, o módulo 02 gera menos energia do que o módulo de referência, o módulo 03 gera mais do que o módulo de referência e o módulo 04 gera mais do que o módulo de referência.

Do exposto, constata-se que será necessário corrigir os valores de potência elétrica gerados por cada módulo experimental, como por exemplo, os dados de potência elétrica em pu gerados pelo módulo 03 deverão ser divididos por 1,018pu, com o intuito de expurgar suas diferenças próprias de desempenho.

O Teorema Central do Limite estabelece que quando o tamanho da amostra é suficientemente grande ($n > 30$), a distribuição amostral se aproxima de uma distribuição normal (INMETRO, 2012; MORETTIN; BUSSAB, 2004). Esse teorema permite a aplicação de procedimentos estatísticos que requerem que os dados sejam aproximadamente normais, como é o caso do teste de hipótese.

Dessa maneira, para auxiliar as conclusões obtidas anteriormente, a Tabela 8 apresenta o resultado do p-valor em três casas decimais para o teste Z que representa a probabilidade do módulo de referência gerar mais energia elétrica do que os módulos experimentais.

Tabela 8 - p-valores para o teste de hipóteses da caracterização dos módulos fotovoltaicos

| Módulos | p-valor |
|-----------|---------|
| Módulo 02 | 0,653 |
| Módulo 03 | 0,000 |
| Módulo 04 | 0,325 |

Fonte: Autora, 2018.

O resultado do teste Z para o módulo de referência e o módulo experimental 03 mostra que a hipótese nula (módulo de referência gerar mais do que o módulo 03) foi rejeitada (p-valor=0), isso implica em aceitar hipótese alternativa e afirmar com 100% de confiança que o módulo 03 gera mais energia do que o módulo de referência.

Em contrapartida, apesar do módulo de referência possuir uma média maior do que o módulo 02, o teste Z mostra que o módulo de referência gera mais energia do que o módulo 02 apenas 65,3% das vezes. De maneira análoga, o módulo de referência

gera mais energia do que o módulo 04 apenas 32,5% das vezes. Visto que o nível de confiança obtido para ambas as hipóteses é muito inferior a 95%, a diferença da geração de energia entre o módulo de referência e os módulos experimentais 02 e 04 não é estatisticamente significativa, o que mostra que esses módulos possuem características de fabricação e montagem muito semelhantes.

No entanto, pode-se afirmar através da análise inicial que, na média o módulo 02 gera 0,1% (0,001pu) a menos, o módulo 03 gera 1,8% (0,018pu) a mais e o módulo 04 gera 0,1% (0,001pu) a mais que o módulo de referência. Com isso, os valores de potência elétrica medidos de cada módulo experimental com sujidade serão divididos pela média do módulo experimental limpo.

3.8 ANÁLISE DOS DADOS DA GERAÇÃO

Neste tópico serão apresentadas as etapas realizadas para obter a análise dos dados da geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos.

3.8.1 Correção da potência medida

Com o intuito de expurgar as interferências de variáveis como irradiância solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar nos resultados os módulos fotovoltaicos foram instalados na mesma inclinação e expostos às mesmas condições ambientais. Portanto, a única variável espúria a ser mitigada é a temperatura própria de operação dos módulos fotovoltaicos.

Para obter a potência elétrica gerada esperada caso não houvesse a influência da temperatura própria de operação, inicialmente calculou-se o fator de correção de temperatura utilizando a Equação 3.10 (GLEASON, 2009).

$$K_T = 1 + (C_T * (T_m - T_{ref})) \quad (3.10)$$

Onde:

K_T é o fator de correção de temperatura;

C_T é o coeficiente de temperatura do módulo fotovoltaico obtido em seu *datasheet*;

T_m é a temperatura própria de operação medida;

T_{ref} é a temperatura de referência utilizada para normalizar as temperaturas dos módulos fotovoltaicos.

Arbitrou-se uma temperatura de referência próxima a temperatura de operação do módulo de referência, uma vez que os estudos são comparativos. Esse procedimento diminui a distância entre temperatura operacional dos módulos e temperatura de referência, diminuindo a inserção de erros e incertezas.

Posteriormente obteve-se a potência elétrica corrigida para uma temperatura de referência conforme a Equação 3.11, eliminando desta forma a influência da temperatura própria de operação dos módulos fotovoltaicos nos resultados medidos.

$$P_C = P_m * K_T \quad (3.11)$$

Onde:

K_T é o fator de correção de temperatura;

P_m é a potência elétrica medida;

P_C é a potência corrigida expurgando a interferência da temperatura própria de operação do módulo.

Em seguida, calculou-se a potência elétrica gerada em pu por cada módulo fotovoltaico e realizou-se uma nova correção nesses valores, referente aos fatores encontrados no processo de caracterização dos módulos fotovoltaicos (Tabela 7) e é feita conforme Equação 3.12.

$$P_C' = \frac{P_C}{K_C} \quad (3.12)$$

Onde:

K_C é o fator de caracterização que corresponde à média do módulo fotovoltaico experimental limpo obtido na Seção 3.7;

P_C é a potência corrigida expurgando a interferência da temperatura própria de operação do módulo;

P_C' é a potência corrigida expurgando os efeitos das eventuais diferenças construtivas entre as partes do sistema.

Por fim, calculou-se a média e a incerteza combinada da potência gerada (P_{C2}) pelos módulos experimentais.

3.8.2 Erro e incerteza das medições

Devido à necessidade de eliminar a influência da temperatura própria dos módulos nos resultados, tornou-se indispensável realizar a sua medição. A medição foi realizada através de três canais do termômetro Minipa MT-1044 e do termo-higrômetro ITHT 2250. A Tabela 9 apresenta os valores do erro e da incerteza padrão dos sensores de temperatura calibrados.

Tabela 9 - Calibração dos instrumentos

| Instrumento | Erro (°C) | Incerteza padrão (°C) |
|--------------------|-----------|-----------------------|
| Termo-higrômetro | 0,0 | 0,2 |
| Termômetro canal 1 | -0,2 | 0,1 |
| Termômetro canal 2 | -0,2 | 0,1 |
| Termômetro canal 3 | -0,2 | 0,1 |

Fonte: Autora, 2018.

Através da calibração dos instrumentos foi possível eliminar o erro da medição de temperatura, conforme Equação 3.13.

$$T_c = T_m - erro \quad (3.13)$$

Onde:

T_c é a temperatura corrigida;

T_m é a temperatura medida pelo instrumento.

Nos certificados de calibração também consta a incerteza padrão dos sensores de temperatura, no entanto o efeito dessa incerteza nos resultados da potência elétrica medida é insignificante, pois afetaria apenas a primeira casa decimal e a potência medida pelo sistema da APsystems é um número não decimal. Em termos quantitativos, a incerteza dos instrumentos de temperatura é da ordem de 0,22%, enquanto a incerteza das medições de potência é da ordem de 2,30%, ou seja, a incerteza da temperatura é aproximadamente 10 vezes menor, podendo ser desconsiderada.

A incerteza da potência elétrica obtida na Equação 3.12 é composta pela incerteza padrão da potência elétrica medida e pela incerteza padrão da caracterização dos módulos fotovoltaicos apresentadas na Tabela 7. Essas duas incertezas foram combinadas conforme a Equação 3.14 (INMETRO, 2012).

$$u_{P_C'}^2 = \left(\frac{\partial P_C'}{\partial P_C}\right)^2 \cdot u(P_C)^2 + \left(\frac{\partial P_C'}{\partial K_C}\right)^2 \cdot u(K_C)^2 \quad (3.14)$$

Onde:

$u_{P_C'}$ é a incerteza combinada da potência elétrica medida;

$u(P_C)$ é a incerteza padrão da potência elétrica medida;

$u(K_C)$ é a incerteza padrão da caracterização dos módulos fotovoltaicos;

$\frac{\partial P_C'}{\partial P_C}$ é a derivada parcial da Equação 3.12 em relação a P_C ;

$\frac{\partial P_C'}{\partial K_C}$ é a derivada parcial da Equação 3.12 em relação a K_C .

É importante salientar que neste trabalho foi utilizada uma incerteza expandida de dois desvios padrão, ou seja, a confiabilidade da medição é de aproximadamente 95%.

Do exposto, os valores obtidos da potência corrigida, incerteza combinada expandida e nível de confiança permitiram determinar os valores máximos e mínimos da redução da capacidade de geração de energia elétrica dos módulos experimentais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho e as discussões acerca dos mesmos, e estão separados por tipo de sujeidade.

4.1 SUJIDADE: PÓ DE CARVÃO MINERAL

A Tabela 10 apresenta as médias da potência elétrica gerada em pu correspondente a cada nível de sujeidade pó de carvão mineral com suas respectivas incertezas associadas.

Tabela 10 – Potência elétrica gerada sob efeito da sujeidade pó de carvão mineral

| Densidade de sujeidade (g/m ²) / dias sem limpeza | Potência gerada | | Redução da capacidade de geração de energia elétrica (%) | |
|---|-----------------|--------------------------|--|---------------------|
| | Média (pu) | Incerteza Expandida (pu) | Limite superior (%) | Limite inferior (%) |
| 0,0 | 1,000 | - | - | - |
| 2,5 / 7 dias | 0,817 | 0,078 | 26,1 | 10,5 |
| 5,0 / 14 dias | 0,663 | 0,079 | 41,6 | 25,8 |
| 10 / 30 dias | 0,462 | 0,078 | 61,7 | 46,0 |

Fonte: Autora, 2018.

Analisando os resultados, o módulo fotovoltaico com sujeidade correspondente a 7 dias sem limpeza teve uma redução na geração de energia de 10,5 a 26,1%; o módulo correspondente a 14 dias sem limpeza teve uma redução de 25,8 a 41,6% e o módulo com sujeidade correspondente a 30 dias teve uma redução de 46,0 a 61,7%, para um nível de confiança de 95%. A redução na capacidade de geração de energia elétrica ocasionada por esse tipo de sujeidade é expressiva, um mês sem efetuar nenhuma limpeza reduz em média 54% a geração de energia do módulo.

Auxiliando essas conclusões, a Tabela 11 apresenta a probabilidade do módulo mais sujo (linha) gerar mais energia elétrica do que o módulo mais limpo (coluna), como por exemplo, a probabilidade do módulo com sujeidade correspondente à 7 dias sem limpeza gerar mais energia elétrica do que o módulo de referência (totalmente limpo).

Como o p-valor encontrado para cada hipótese é igual a zero, isso implica que a hipótese nula foi rejeitada, concluindo que para esse caso específico os módulos mais limpos geram mais energia elétrica do que os módulos mais sujos com 100% de confiabilidade, ou seja, a hipótese alternativa é verdadeira para todos os testes

realizados. Este formato de apresentação do resultado do teste Z será empregado no restante do trabalho.

Tabela 11 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de carvão mineral

| Módulos | Referência (totalmente limpo) | 7 dias | 14 dias |
|---------|-------------------------------|--------|---------|
| 7 dias | 0,000 | - | - |
| 14 dias | 0,000 | 0,000 | - |
| 30 dias | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Fonte: Autora, 2018.

4.1.1 Regressão linear

Uma vez que foi identificado que a capacidade de geração de energia elétrica do módulo experimental é impactada pela sujidade pó de carvão mineral, e que o aumento da densidade superficial ocasiona um decréscimo na geração de energia elétrica, agora será proposto um modelo empírico que correlacione a capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico em função da caracterização de sujidade depositada sobre sua superfície. Posteriormente essa modelagem poderá ser utilizada em análises econômicas que visam encontrar o ponto ótimo para realizar a limpeza do módulo fotovoltaico e/ou em análises de viabilidade econômica de implantação do sistema fotovoltaico.

Utilizou-se a técnica de regressão linear para obter o modelo matemático. As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados obtidos na regressão linear de grau 1 e grau 2, respectivamente e ambas foram obtidas utilizando a ferramenta de análise de dados do editor de planilhas Microsoft® Office Excel.

As informações a serem observadas nos resultados obtidos da regressão linear são:

- o grau de correlação entre a energia elétrica gerada e a densidade de deposição de sujidade é representado pelo R^2 ajustado;
- o Erro padrão da estatística de regressão indica o quão os desvios estão dispersos em torno da reta de regressão;
- o valor-p indica a probabilidade de a hipótese nula ser aceita (coeficiente angular ser igual a zero), ou seja, a probabilidade da variável densidade de deposição de sujidade não ter influência significativa sobre a geração de energia elétrica;

- o F de significação indica a qualidade da regressão. A regressão é boa, é significativa se F for menor do que 0,05 (nível de confiança de 95%).

Tabela 12 - Resumo dos resultados da regressão linear de grau 1 para a sujidade pó de carvão mineral

| Estatística de regressão | |
|--------------------------|--------|
| R múltiplo | 0,9886 |
| R ² | 0,9773 |
| R ² ajustado | 0,9660 |
| Erro padrão | 0,0422 |
| Observações | 4 |

| ANOVA | | | | | |
|-----------|----|--------|--------|---------|-------------------|
| | gl | SQ | MQ | F | F de significação |
| Regressão | 1 | 0,1533 | 0,1533 | 86,1891 | 0,0114 |
| Resíduo | 2 | 0,0036 | 0,0018 | | |
| Total | 3 | 0,1569 | | | |

| | Coefficientes | Erro padrão | Stat t | valor-P | 95% inferiores | 95% superiores |
|------------|---------------|-------------|---------|---------|----------------|----------------|
| Interseção | 0,9670 | 0,0327 | 29,5985 | 0,0011 | 0,8264 | 1,1076 |
| X | -0,0529 | 0,0057 | -9,2838 | 0,0114 | -0,0775 | -0,0284 |

Fonte: Autora, 2018.

Tabela 13 - Resumo dos resultados da regressão linear de grau 2 para a sujidade pó de carvão mineral

| Estatística de regressão | |
|--------------------------|--------|
| R múltiplo | 1,0000 |
| R ² | 1,0000 |
| R ² ajustado | 0,9999 |
| Erro padrão | 0,0021 |
| Observações | 4 |

| ANOVA | | | | | |
|-----------|----|--------|--------|------------|-------------------|
| | gl | SQ | MQ | F | F de significação |
| Regressão | 2 | 0,1569 | 0,0784 | 16977,6210 | 0,0054 |
| Resíduo | 1 | 0,0000 | 0,0000 | | |
| Total | 3 | 0,1569 | | | |

| | Coefficientes | Erro padrão | Stat t | valor-P | 95% inferiores | 95% superiores |
|----------------|---------------|-------------|----------|---------|----------------|----------------|
| Interseção | 1,0006 | 0,0021 | 485,8229 | 0,0013 | 0,9744 | 1,0268 |
| X | -0,0808 | 0,0010 | -77,2699 | 0,0082 | -0,0941 | -0,0675 |
| X ² | 0,0027 | 0,0001 | 27,7323 | 0,0229 | 0,0015 | 0,0039 |

Fonte: Autora, 2018.

A Tabela 14 apresenta uma comparação entre as duas regressões, para posteriormente escolher o modelo mais adequado para este caso específico.

Tabela 14 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de carvão mineral

| Indicadores | Regressão grau 1 | Regressão grau 2 |
|-------------------------|------------------|------------------|
| R ² ajustado | 0,9660 | 0,9999 |
| Erro padrão | 0,0422 | 0,0021 |
| Interseção | 0,0011 | 0,0013 |
| Valor-P X | 0,0114 | 0,0082 |
| X ² | - | 0,0229 |
| F de significação | 0,0114 | 0,0054 |

Fonte: Autora, 2018.

Analisando a Tabela 14, a regressão linear de grau 2 representa melhor a correlação existente entre a redução da capacidade de geração de energia elétrica e a densidade de deposição de pó de carvão mineral presente na superfície dos módulos fotovoltaicos, pois o valor-P é menor, a qualidade da regressão é melhor (F de significação), o erro padrão é cerca de 20 vezes menor e o R² ajustado é aproximadamente igual a 1, ou seja, o ajustamento da equação de regressão aos dados amostrais é excelente.

Este formato de apresentação do resultado da escolha do grau da regressão linear será empregado no restante do trabalho.

A Equação 4.1 apresenta o modelo matemático e a Figura 37 ilustra o resultado gráfico da regressão linear de grau 2 para a sujidade pó de carvão mineral.

$$P_{out} = 0,0027d^2 - 0,0808d + 1,0006 \quad (4.1)$$

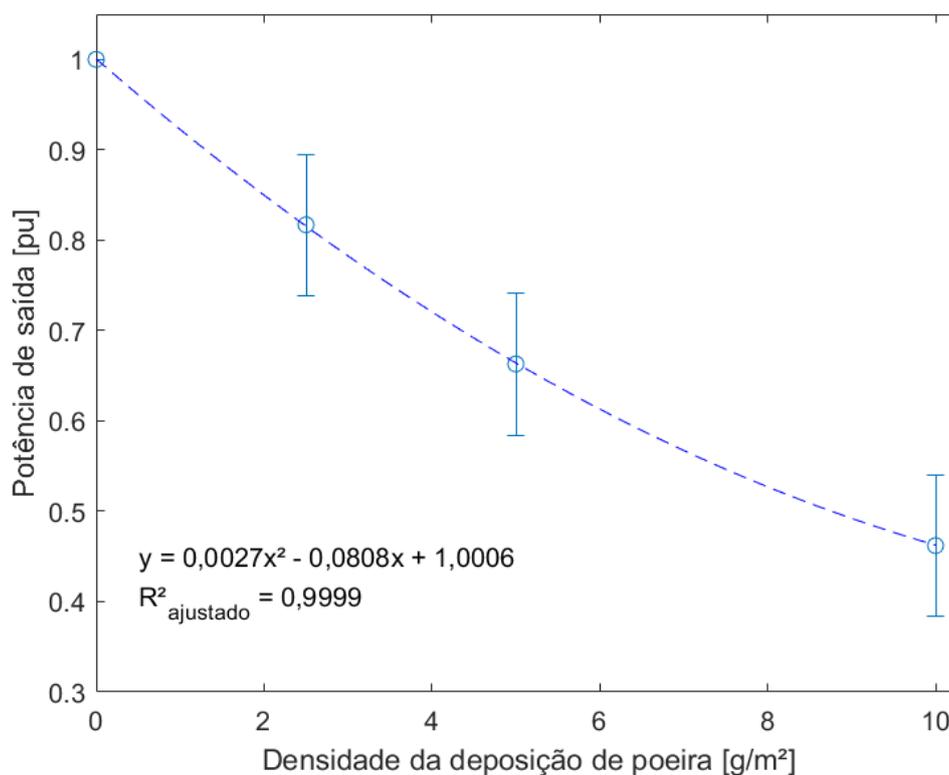
Onde:

P_{out} representa a capacidade de geração de energia elétrica, em pu;

d representa a densidade da deposição de sujidade sobre a superfície do módulo fotovoltaico, em g/m².

Adicionalmente às análises estatísticas efetuadas, por inspeção visual na Figura 37, nota-se também que, adequadamente, quando a densidade de sujeira é nula a potência gerada é unitária.

Figura 37 - Regressão linear da sujidade pó de carvão mineral



Fonte: Autora, 2018.

4.2 SUJIDADE: PÓ DE CONSTRUÇÃO CIVIL

De maneira análoga, a Tabela 15 apresenta as médias da potência elétrica gerada em pu correspondente a cada nível de sujidade com suas respectivas incertezas associadas para a sujidade pó de construção civil.

Explorando os resultados obtidos na Tabela 15, constatou-se que o acréscimo da deposição de sujidade na superfície do módulo fotovoltaico provoca um decréscimo na potência elétrica gerada pelo mesmo, não tão expressiva quanto a da sujidade pó de carvão mineral, mas ainda assim é um impacto que deve ser considerado na análise do custo de geração de energia fotovoltaica.

Os resultados do teste de hipóteses apresentados na Tabela 16 contribuem para verificar se a hipótese de que o acréscimo de sujidade ocasiona uma redução na geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico e também é válida para esse tipo de sujidade.

Tabela 15 - Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de construção civil

| Densidade de sujidade (g/m ²) / dias sem limpeza | Potência gerada | | Redução da capacidade de geração de energia elétrica (%) | |
|--|-----------------|--------------------------|--|---------------------|
| | Média (pu) | Incerteza Expandida (pu) | Limite superior (%) | Limite inferior (%) |
| 0,0 | 1,000 | - | - | - |
| 2,5 / 7 dias | 0,927 | 0,052 | 12,5 | 2,1 |
| 5,0 / 14 dias | 0,858 | 0,049 | 19,1 | 9,3 |
| 10 / 30 dias | 0,777 | 0,052 | 27,6 | 17,1 |

Fonte: Autora, 2018.

Tabela 16 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de construção civil

| Módulos | Referência (totalmente limpo) | 7 dias | 14 dias |
|---------|-------------------------------|--------|---------|
| 7 dias | 0,000 | - | - |
| 14 dias | 0,000 | 0,051 | - |
| 30 dias | 0,000 | 0,000 | 0,026 |

Fonte: Autora, 2018.

Analisando a Tabela 16, a hipótese nula foi rejeitada com 100% de confiabilidade para os seguintes testes:

- ✓ Módulo com 7 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 14 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 30 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 30 dias de sujidade gerar mais do que o módulo com 7 dias de sujidade.

Portanto, para esses testes, a hipótese alternativa é verdadeira, ou seja, os módulos mais limpos geram mais do que os mais sujos com 100% de confiabilidade.

Para os demais testes, a hipótese alternativa também é verdadeira com pelo menos 95% de confiabilidade. Portanto, pode-se afirmar com pelo menos 95% de confiabilidade que em todos os testes a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, os módulos

fotovoltaicos mais limpos geram mais energia elétrica do que os mais sujos, confirmando a hipótese científica do trabalho.

A Tabela 17 apresenta os valores dos indicadores referentes à regressão linear de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de construção civil.

Tabela 17 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de construção civil

| Indicadores | Regressão grau 1 | Regressão grau 2 |
|-------------------------|------------------|------------------|
| R ² ajustado | 0,9654 | 0,9981 |
| Erro padrão | 0,0177 | 0,0041 |
| Interseção | 0,0002 | 0,0013 |
| Valor-P X | 0,0116 | 0,0381 |
| X ² | - | 0,1057 |
| F de significação | 0,0116 | 0,0251 |

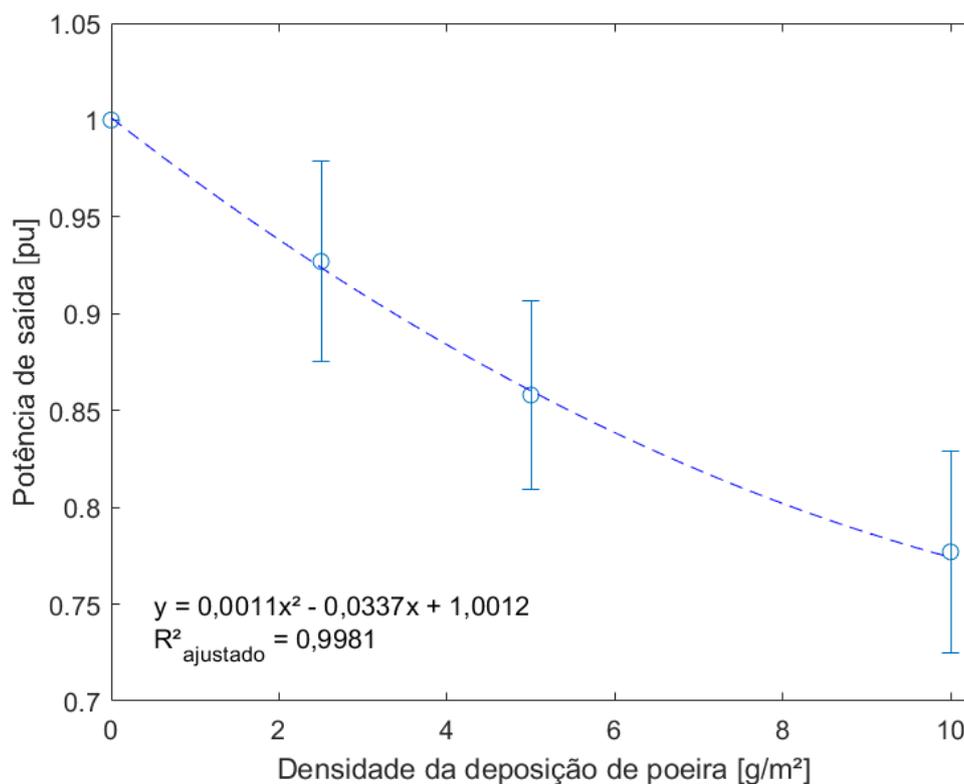
Fonte: Autora, 2018.

Analisando a Tabela 17, nota-se que o erro padrão da regressão de grau 2 é menor, logo a dispersão dos dados amostrais em torno da reta de regressão é menor; o R² ajustado é maior, isso implica numa correlação melhor entre as variáveis dependente e independente e a diferença entre o valor-p e o F de significação entre as duas regressões não é muito significativa. Portanto, adotou-se o modelo da regressão linear de grau 2 para representar a relação entre a redução da capacidade de energia elétrica e a densidade de deposição de sujidade.

A Equação 4.2 apresenta o modelo matemático e o resultado gráfico da regressão linear pode ser observado na Figura 38.

$$P_{out} = 0,0011d^2 - 0,0337d + 1,0012 \quad (4.2)$$

Figura 38 - Regressão linear da sujidade pó de construção civil



Fonte: Autora, 2018.

4.3 SUJIDADE: PÓ DE PEDREIRA

Os resultados referentes a análise dos dados da potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos sob efeito da sujidade pó de pedreira constam na Tabela 18.

Tabela 18 - Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de pedreira

| Densidade de sujidade (g/m ²) / dias sem limpeza | Potência gerada | | Redução da capacidade de geração de energia elétrica (%) | |
|--|-----------------|--------------------------|--|---------------------|
| | Média (pu) | Incerteza Expandida (pu) | Limite superior (%) | Limite inferior (%) |
| 0,0 | 1,000 | - | - | - |
| 2,5 / 7 dias | 0,979 | 0,057 | 7,8 | 0,0 |
| 5,0 / 14 dias | 0,950 | 0,056 | 10,6 | 0,0 |
| 10 / 30 dias | 0,903 | 0,066 | 16,2 | 3,1 |

Fonte: Autora, 2018.

Para esse tipo de sujidade a hipótese científica também foi confirmada, no entanto, o efeito da sujidade na redução da geração de energia elétrica é bem inferior aos demais

tipos de sujidades já analisados. Adicionalmente, pode-se observar que a faixa de redução da capacidade de geração de energia elétrica do módulo com densidade de 5,0g/m² (14 dias) possui um intervalo consideravelmente comum à faixa de redução do módulo com densidade de 2,5g/m² (7 dias). Da mesma forma, a faixa de redução do módulo com densidade de 10g/m² (30 dias) possui um intervalo comum à do módulo com sujidade correspondente a 14 dias.

Analisando a Tabela 19, a hipótese nula foi rejeitada com pelo menos 97% de confiabilidade para os seguintes testes:

- ✓ Módulo com 7 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 14 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 30 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 30 dias de sujidade gerar mais do que o módulo com 7 dias de sujidade.

Portanto, para esses testes, a hipótese alternativa é verdadeira, ou seja, os módulos mais limpos geram mais do que os mais sujos com pelo menos 97% de confiabilidade.

Para os demais testes, não é possível fazer nenhuma afirmação, visto que o nível de confiança obtido para as hipóteses nula e alternativa é inferior a 95%. Portanto, não é possível afirmar que o módulo com sujidade de 30 dias gera menos do que o módulo com sujidade de 14 dias e que o módulo com sujidade de 14 dias gera menos do que o módulo com sujidade de 7 dias. Esse resultado era esperado, já que a faixa de redução da capacidade de geração de energia elétrica desses módulos são semelhantes.

Tabela 19 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de pedra

| Módulos | Referência (totalmente limpo) | 7 dias | 14 dias |
|---------|-------------------------------|--------|---------|
| 7 dias | 0,001 | - | - |
| 14 dias | 0,000 | 0,228 | - |
| 30 dias | 0,000 | 0,032 | 0,125 |

Examinando os dados da Tabela 20, pode-se verificar que os indicadores da regressão linear de grau 2 são inferiores ao da regressão linear de grau 1. O valor-p do termo que multiplica x^2 da equação do segundo grau é aproximadamente 1, ou seja, a hipótese nula foi aceita – esse coeficiente é igual a zero – reduzindo à uma equação de grau 1.

Tabela 20 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de pedra

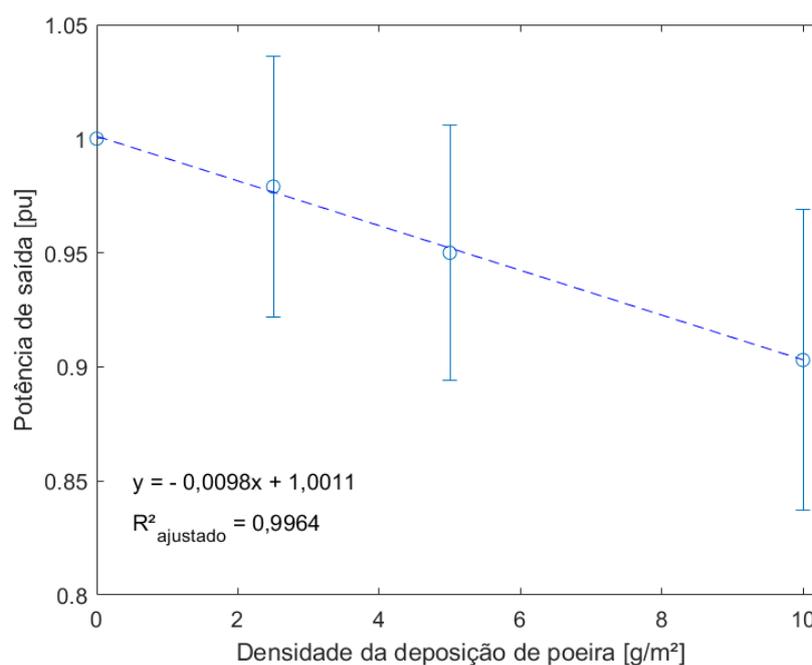
| Indicadores | Regressão grau 1 | Regressão grau 2 |
|-------------------------|------------------|------------------|
| R ² ajustado | 0,9664 | 0,9929 |
| Erro padrão | 0,0025 | 0,0035 |
| Interseção | 0,0000 | 0,0022 |
| Valor-P X | 0,0012 | 0,1111 |
| X ² | - | 0,9851 |
| F de significação | 0,0012 | 0,0488 |

Fonte: Autora, 2018.

A Equação 4.3 apresenta o modelo matemático e a Figura 39 ilustra o resultado gráfico da regressão linear de grau 1 para a sujidade pó de pedra.

$$P_{out} = -0,0098d + 1,0011 \quad (4.3)$$

Figura 39 - Regressão linear da sujidade pó de pedra



Fonte: Autora, 2018.

4.4 SUJIDADE: PÓ DE MINÉRIO DE FERRO

Semelhante ao que foi realizado para os demais tipos de sujidade, a Tabela 21 apresenta as médias da potência elétrica gerada em pu correspondente a cada nível de sujidade com suas respectivas incertezas associadas para a sujidade pó de minério de ferro.

Tabela 21 - Potência elétrica gerada sob efeito da sujidade pó de minério de ferro

| Densidade de sujidade (g/m ²) / dias sem limpeza | Potência gerada | | Redução da capacidade de geração de energia elétrica (%) | |
|--|-----------------|--------------------------|--|---------------------|
| | Média (pu) | Incerteza Expandida (pu) | Limite superior (%) | Limite inferior (%) |
| 0,0 | 1,000 | - | - | - |
| 2,5 / 7 dias | 0,947 | 0,065 | 11,8 | 0,0 |
| 5,0 / 14 dias | 0,866 | 0,082 | 21,6 | 5,3 |
| 10 / 30 dias | 0,774 | 0,098 | 32,4 | 12,8 |

Fonte: Autora, 2018.

Para esse tipo de sujidade a hipótese científica também foi confirmada e a interseção entre a faixa de redução da capacidade de geração de energia elétrica dos módulos é menor, quando comparado com a análise da seção anterior.

Analisando a Tabela 22, a hipótese nula foi rejeitada com aproximadamente 100% de confiabilidade para os seguintes testes:

- ✓ Módulo com 7 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 14 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 30 dias de sujidade gerar mais do que o módulo de referência (limpo);
- ✓ Módulo com 30 dias de sujidade gerar mais do que o módulo com 7 dias de sujidade.

Portanto, para esses testes, a hipótese alternativa é verdadeira, ou seja, os módulos mais limpos geram mais do que os mais sujos com aproximadamente 100% de confiabilidade.

Para os demais testes, pode-se considerar que a hipótese nula foi rejeitada com 93% de confiabilidade. Portanto, para esse caso específico pode-se afirmar com pelo menos 93% de confiabilidade que em todos os testes a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, os módulos fotovoltaicos mais limpos geram mais energia elétrica do que os mais sujos.

Tabela 22 - p-valores para teste de hipóteses da sujidade pó de minério de ferro

| Módulos | Referência (totalmente limpo) | 7 dias | 14 dias |
|---------|-------------------------------|--------|---------|
| 7 dias | 0,000 | - | - |
| 14 dias | 0,000 | 0,066 | - |
| 30 dias | 0,000 | 0,001 | 0,065 |

Fonte: Autora, 2018.

Analisando a Tabela 23, pode-se verificar que o valor-p do termo que multiplica x^2 da equação do segundo grau é um valor muito grande. Para se rejeitar a hipótese nula é desejável que $\text{valor-p} < 0,05$. Portanto, como não é possível rejeitar a hipótese nula com 95% de confiança, optou-se por utilizar uma equação de grau 1 para correlacionar as variáveis.

Tabela 23 - Comparação dos resultados obtidos nas regressões de grau 1 e grau 2 para a sujidade pó de minério de ferro

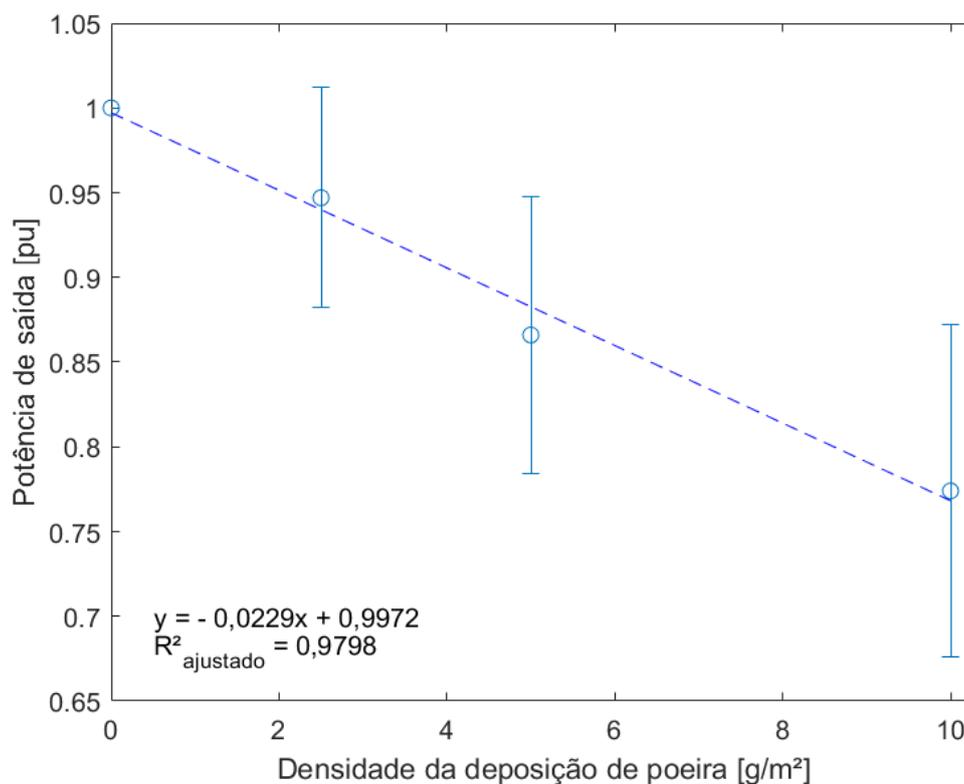
| Indicadores | Regressão grau 1 | Regressão grau 2 |
|-------------------------|------------------|------------------|
| R ² ajustado | 0,9798 | 0,9763 |
| Erro padrão | 0,0140 | 0,0152 |
| Interseção | 0,0001 | 0,0092 |
| Valor-P X | 0,0068 | 0,1593 |
| X ² | - | 0,5556 |
| F de significação | 0,0068 | 0,0889 |

Fonte: Autora, 2018.

A Equação 4.4 apresenta o modelo matemático e a Figura 40 ilustra o resultado gráfico da regressão linear de grau 1 para a sujidade pedreira.

$$P_{out} = -0,0229d + 0,9972 \quad (4.4)$$

Figura 40 - Regressão linear da sujidade pó de minério de ferro



Fonte: Autora, 2018.

4.5 ANÁLISE ENTRE OS TIPOS DE SUJIDADE

A partir das análises anteriores comprovou-se que os diferentes tipos de sujidade impactam de formas diferentes na capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico. Com o intuito de verificar qual tipo de sujidade possui um maior impacto na geração de energia elétrica, realizou-se o teste estatístico Z comparando os efeitos da redução da geração de energia elétrica entre as diferentes sujidades para cada densidade de deposição da sujidade (g/m^2).

A Tabela 24 apresenta a probabilidade do módulo com sujidade x (linha) gerar mais energia elétrica do que o módulo com sujidade y (coluna) considerando um valor de densidade de deposição de sujidade igual a $2,5\text{g/m}^2$.

Conclui-se que as sujidades construção civil, pedra e minério impactam menos na capacidade de geração de energia elétrica do que a sujidade carvão com pelo menos 99,4% de confiança.

Tabela 24 - p-valores para teste de hipóteses dos diferentes tipos de sujidade correspondente a 7 dias sem limpeza

| Tipos Sujidade | Construção Civil | Minério | Pedreira |
|---------------------|---------------------|---------|----------|
| Carvão | 0,006 | 0,004 | 0,000 |
| Construção Civil | - | 0,335 | 0,103 |
| Minério | - | - | 0,241 |

Fonte: Autora, 2018.

Para os demais testes, não é possível fazer nenhuma afirmação, visto que o nível de confiança obtido para as hipóteses nula e alternativa é inferior a 95%. Portanto, é possível afirmar apenas para a sujidade pó de carvão mineral que a redução da capacidade de geração de energia elétrica é significativamente maior quando comparado com a redução das demais sujidades.

De maneira análoga, a Tabela 25 apresenta o teste de hipóteses considerando um valor de densidade de deposição de sujidade igual a 5,0g/m², que equivale a 14 dias sem realizar limpeza na superfície do módulo.

Tabela 25 - p-valores para teste de hipóteses dos diferentes tipos de sujidade correspondente a 14 dias sem limpeza

| Tipos Sujidade | Construção Civil | Minério | Pedreira |
|---------------------|---------------------|---------|----------|
| Carvão | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Construção Civil | - | 0,433 | 0,011 |
| Minério | - | - | 0,042 |

Fonte: Autora, 2018.

Conclui-se que as sujidades pó de construção civil, pedreira e minério de ferro impactam menos na capacidade de geração de energia elétrica do que a sujidade pó de carvão mineral com 100% de confiança.

Pode-se afirmar também que a sujidade pedreira provoca um impacto menor do que as sujidades pós de construção civil e minério de ferro na capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico com pelo menos 95,8% de confiança.

Em contrapartida, não se pode diferenciar qual a redução da capacidade de geração é mais significativa quando se compara a sujidade pó de construção civil e pó de minério de ferro.

Analisando os dados obtidos na Tabela 26, pode-se afirmar novamente que as sujidades pó de construção civil, pó de pedreira e pó de minério de ferro provocam uma influência menor na capacidade de geração de energia elétrica do que a sujidade pó de carvão mineral com 100% de confiança.

Tabela 26 - p-valores para teste de hipóteses dos diferentes tipos de sujidade correspondente a 30 dias sem limpeza

| Tipos Sujidade | Construção Civil | Minério | Pedreira |
|---------------------|---------------------|---------|----------|
| Carvão | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Construção Civil | - | 0,483 | 0,001 |
| Minério | - | - | 0,008 |

Fonte: Autora, 2018.

Semelhante ao encontrado na Tabela 25, obteve-se que a sujidade pó de pedreira provoca um impacto menor do que as sujidades pó de construção civil e pó de minério de ferro na capacidade de geração de energia elétrica com pelo menos 99,2% de confiança. Adicionalmente, não foi possível diferenciar qual a redução da capacidade de geração é mais significativa quando se compara a sujidade pó de construção civil e pó de minério de ferro.

4.6 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NOS DIFERENTES BAIROS

Neste tópico será realizada uma análise baseada nas Tabelas 24, 25 e 26 e na Figura 11, com o objetivo de verificar em quais bairros da RMGV uma microusina geraria mais ou menos energia elétrica.

A Tabela 27 apresenta as contribuições percentuais extraídas da Figura 11 de cada tipo de sujidade estudada nas estações de monitoramento e no ponto de coleta da RMGV.

Desta forma, realizando uma análise qualitativa, presume-se que uma microusina instalada próxima ao ponto de coleta do Hotel SENAC (Ilha do Boi) irá gerar menos energia elétrica do que uma microusina instalada nos demais bairros listados na

Tabela 27. Esse impacto negativo na capacidade de geração de energia elétrica de uma microusinha instalada na Ilha do Boi possivelmente se dá devido ao elevado nível de pó de minério de ferro presente na região.

Tabela 27 - Contribuição percentual das sujidades estudadas nas estações de monitoramento

| Estação de monitoramento e ponto de coleta | Contribuição de cada sujidade (%) | | | |
|--|-----------------------------------|----------|---------|--------|
| | Construção Civil | Pedreira | Minério | Carvão |
| Laranjeiras | 20 | 4 | 8 | 1 |
| Jardim Camburi | 33 | 0 | 10 | 3 |
| SENAC – Ilha do Boi | 0 | 0 | 75 | 5 |
| Enseada do Suá | 11 | 0 | 35 | 5 |
| Vitória centro | 5 | 0 | 9 | 3 |
| Vila Velha centro | 13 | 0 | 20 | 1 |
| Ibes | 7 | 22 | 23 | 2 |
| Cariacica | 0 | 48 | 10 | 0 |

Fonte: Autora, 2018.

Adicionalmente, observa-se que uma microusinha instalada no centro de Vitória supostamente terá sua capacidade de geração de energia elétrica menos afetada pela deposição de sujidade quando comparada com uma microusinha instalada em qualquer um dos demais bairros.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados dos experimentos obtidos neste trabalho, verificou-se que a hipótese científica foi confirmada para os tipos de sujidade carvão, construção civil e minério. Em contrapartida, para a sujidade pedreira não foi possível confirmar em todos os casos a hipótese proposta.

Adicionalmente, foi possível quantificar experimentalmente a redução da capacidade de geração do módulo fotovoltaico, no qual a redução mais expressiva foi ocasionada pela sujidade pó de carvão mineral – em média 54% para um nível de sujidade de 10g/m².

Realizou-se uma análise estatística comparando os efeitos da redução de energia elétrica provocados pelos diferentes tipos de sujidades com o intuito de verificar se essa redução é significativamente diferente em função da sujidade. Assim, concluiu-

se que independente da densidade de poeira depositada na superfície do módulo, a sujidade carvão possui um impacto maior quando comparado com as demais sujidades e não foi possível diferenciar o impacto ocasionado pelas sujidades construção civil e minério na capacidade de geração de energia elétrica.

Desenvolveu-se um modelo matemático de avaliação quantitativa do impacto que a sujidade superficial dos módulos fotovoltaicos tem na sua capacidade de geração de energia elétrica para todos os tipos de sujidades apresentados.

Em uma análise final foi possível constatar que possivelmente uma microusina instalada na Ilha do Boi sofrerá um impacto maior na capacidade de geração de energia elétrica devido à alta concentração de pó de minério de ferro. Em contrapartida, uma microusina instalada no centro de Vitória supostamente gerará mais energia elétrica do que uma microusina instalada em qualquer um dos demais bairros.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A energia solar vem ganhando espaço no cenário de geração de energia elétrica em virtude do crescimento acelerado da economia e do aumento da preocupação ambiental. Esse tipo de energia vem se destacando devido ao baixo impacto ambiental, à boa possibilidade de produção em regiões com alto nível de radiação solar e à redução do valor dos sistemas fotovoltaicos. Além de se tratar de uma fonte versátil, permitindo sua instalação em locais remotos, edifícios residenciais e comerciais (PEREIRA et al., 2017).

Sabe-se que o desempenho do módulo fotovoltaico é altamente influenciado por fatores ambientais externos como a deposição de poeira, irradiância solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (MEKHILEF; SAIDUR; KAMALISARVESTANI, 2012). Especificamente o acúmulo de poeira na superfície do módulo fotovoltaico pode atenuar a irradiância solar absorvida pelas células, reduzindo sua capacidade de geração de energia elétrica. Adicionalmente, provoca aumento da temperatura própria de operação do módulo fotovoltaico, que poderá induzir a degradação estrutural e reduzir a vida útil do módulo.

Do exposto, constata-se que a deposição de sujidade além de impactar na degradação da vida útil do sistema fotovoltaico, ocasiona perdas econômicas que devem ser consideradas no projeto de viabilidade econômica de implantação de um sistema fotovoltaico. Dessa forma, neste trabalho foi realizado um estudo para avaliar a diminuição da capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico a partir da caracterização de sujidade depositada sobre o mesmo.

A partir da análise das informações obtidas nos experimentos comprovou-se que a capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico é impactada de acordo com a característica de sujidade depositada sobre ele e que o aumento da densidade superficial de sujidade ocasiona um decréscimo na geração de energia elétrica.

Conforme relatado na literatura, foi possível verificar que a perda na capacidade de geração de energia não depende apenas da periodicidade de limpeza dos módulos fotovoltaicos, mas também do tipo de sujidade depositada sobre eles. Neste trabalho ficou comprovado que o carvão impacta de maneira mais expressiva na redução da geração de energia elétrica quando comparado com os demais tipos de

sujidade. Adicionalmente a sujidade pó de pedreira impacta menos na geração de energia elétrica quando comparado com as demais sujidades.

Para a região de estudo, presume-se que uma microusinha instalada na Ilha do Boi sofrerá uma redução maior na capacidade de geração de energia elétrica, enquanto que uma microusinha instalada no centro de Vitória gerará mais energia quando comparada com microusinhas instaladas nos demais bairros.

Além disso, foi possível quantificar experimentalmente as perdas de desempenho ocasionadas por cada tipo e nível de sujidade. Esses dados futuramente poderão ser utilizados para estimar um limite máximo aceitável de sujidade depositada sobre o módulo de modo a não impactar sua produção e, conseqüentemente, estabelecer a necessidade de limpeza. Desse modo, otimizará os custos do processo de produção, visto que a limpeza dos módulos fotovoltaicos é complexa e custosa.

Através dos modelos desenvolvidos identificou-se uma correlação entre a redução da capacidade de geração de energia elétrica e a sujidade depositada sobre a superfície do módulo. Portanto, agora será possível estimar qual será o impacto ocasionado por cada tipo e nível de sujidade na geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico.

Sabe-se que a literatura publicada sobre o impacto econômico causado pelo acúmulo de sujidade na geração de energia fotovoltaica demanda estudos adicionais, visto que ainda não considera esses efeitos na elaboração da viabilidade econômica de implantação de um sistema fotovoltaico. Portanto, com base na estimativa da redução da capacidade de geração de energia elétrica obtido através dos modelos empíricos desenvolvidos, será possível ter mais subsídios e menor incerteza na estimativa da energia elétrica gerada e também nos custos de manutenção e operação ao considerar a limpeza dos módulos fotovoltaicos.

Vale ressaltar que nos experimentos realizados considerou-se que o vento não contribui com a limpeza dos módulos fotovoltaicos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Dado o exposto neste trabalho, os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

- ✓ refazer os experimentos, com o intuito de utilizar os dados da geração de energia elétrica para validar os modelos matemáticos obtidos;

- ✓ realizar experimentos com misturas de tipos de sujidades, objetivando se aproximar da realidade da poeira sedimentada da RMGV;
- ✓ comprovar as hipóteses de que microusinas instaladas na Ilha do Boi geram menos energia elétrica e que microusinas instaladas no centro de Vitória geram mais energia elétrica do que microusinas instaladas nos demais bairros;
- ✓ analisar a transmitância das amostras para correlacionar com a redução da capacidade de geração da energia elétrica;
- ✓ obter o impacto econômico causado pelo acúmulo de poeira na geração de energia elétrica fotovoltaica, de forma a incluir esse impacto na análise da viabilidade econômica de instalação de um gerador fotovoltaico e auxiliar na obtenção do ponto ótimo para realizar a limpeza dos módulos fotovoltaicos na RMGV.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Brasil chega a 13 GW de capacidade instalada de energia eólica.** Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/noticias/brasil-chega-a-13-gw-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>>. Acesso em: 2 mar. 2018.
- ABNT MB-3402. Atmosfera - Determinação da taxa de poeira sedimentável total. **Seta**, v. 5, n. 1, p. 1–5, 1991.
- ABSOLAR. **ENERGIA SOLAR NO BRASIL: FONTE DE ECONOMIA, OPORTUNIDADES E INVESTIMENTOS.** Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-no-brasil-fonte-de-economia-oportunidades-e-investimentos.html>>. Acesso em: 2 mar. 2018.
- ALONSO-GARCÍA, M. C.; RUIZ, J. M.; CHENLO, F. Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 90, n. 3, p. 329–340, 2006.
- AMBIENTE ENERGIA. **Aneel prevê que geração distribuída chegue a 12 milhões de consumidores até 2024.** Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/09/aneel-preve-que-geracao-distribuida-chegue-12-milhoes-de-consumidores-ate-2024/30300>>. Acesso em: 26 mar. 2018.
- ANDREON, I. M. **Doenças respiratórias e poluição atmosférica, pós anos 2000, na cidade de Vitória, Espírito Santo, Brasil.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- ANEEL. RESOLUÇÃO ANEEL Nº 278, DE 19 DE JULHO DE 2000. 2000.
- ANEEL. Micro e minigeração distribuídas. **Cadernos Temáticos ANEEL**, v. 2 ed, p. 34, 2016.
- ANEEL. **Fontes de Energia Exploradas no Brasil.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>>. Acesso em: 2 mar. 2018.
- APSYSTEMS. Instalação / Manual do usuário APsystems YC500A / I (220V). 2018.
- ARJYADHARA, P.; S.M, A.; CHITRALEKHA, J. Analysis of Solar PV cell Performance with Changing Irradiance and Temperature. **International Journal Of Engineering**

And Computer Science, v. 2, n. 1, p. 214–220, 2013.

BERGIN, M. H. et al. Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 4, n. 8, p. 339–344, 2017.

BESSO, R. **Sistema Solar Fotovoltaico Conectado À Rede - Estudo De Caso No Centro De Tecnologia Da UFRJ**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

BHOL, R. et al. Environmental effect assessment on performance of solar PV panel. **IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2015**, 2015.

CHANGWOON, H.; NOCHANG, P.; JAESEONG, J. Lifetime prediction of silicon PV module ribbon wire in three local weathers. **Photovoltaic Module Reliability Workshop 2012**, n. November, 2012.

CONTI, M. M. et al. Chemical and morphological characterization of dustfall (dry deposition) in Vitória-ES Brazil. v. 99, n. 2, p. 2744, 2009.

CPFL ENERGIA. **Visão Externa**. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/sites-tematicos/energia-solar/visao-externa/Paginas/default.aspx>>.

Acesso em: 26 fev. 2018.

DE FARIA, H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. September 2015, p. 469–475, 2017.

DUBEY, S.; SANDHU, G. S.; TIWARI, G. N. Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 697–705, 2009.

EL-SHOBOKSHY, M. S.; HUSSEIN, F. M. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. **Solar energy**, v. 51, n. 6, p. 505–511, 1993.

ENERGIA SOLAR SOL CENTRAL. **Qual a diferença entre W, Wh, Wp e kWh?**

Disponível em: <<http://www.solcentral.com.br/faqconc/qual-a-diferenca-entre-w-wp-e-wh-e-kwh/>>. Acesso em: 4 jan. 2018.

EPE. Balanço Energético Nacional Brazilian Energy Balance. p. 292, 2018.

ERA. **Benefícios das Energias Renováveis**. Disponível em: <<http://www.energias-renovaveis-angola.com/EnergiasRenováveis/BenefíciosdasEnergiasRenováveis.aspx>>. Acesso em: 4 nov. 2017.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, L. A.; MORGAN, E. S. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, n. June, p. 1499–1511, 2017.

GLEASON, B. PV System Commissioning. **Focus**, n. February, p. 38–42, 2009.

GONÇALVES JÚNIOR, A. A.; DE SOUZA, A. R. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. 1. ed. Barueri: Manole, 2008.

GOOGLE MAPS. **IFES - Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/IFES/@-20.3110923,-40.3207711,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0xb83d79f16aa66d:0x768d740d3df82694!8m2!3d-20.3110973!4d-40.3185824?hl=pt-PT&authuser=0>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

GRIJÓ, M. T. S. P. DE M. **O Impacto Da Produção De Energia Solar Fotovoltaica No Crescimento Económico**. [s.l.] Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 2014.

HAMROUNI, N.; JRAIDI, M.; CHÉRIF, A. Solar radiation and ambient temperature effects on the performances of a PV pumping system. **Revue des Energies Renouvelables**, v. 11, p. 1–95, 2008.

HASAN, A.; ALNOMAN, H.; SHAH, A. Energy Efficiency Enhancement of Photovoltaics by Phase Change Materials through Thermal Energy Recovery. **Energies**, v. 9, n. 10, p. 782, 2016.

HEGAZY, A. A. Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. **Renewable energy**, v. 22, n. 4, p. 525–540, 2001.

HICKEL, B. M. et al. Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos FV: revisão e medições de campo. **Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belo Horizonte, 04 a 07 de abril de 2016**, n. April, p.

1–8, 2016.

HOEFLING SANTOS, F. et al. A IMPORTÂNCIA DA DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO LOCAL PARA UM CORRETO DIMENSIONAMENTO DAS TECNOLOGIAS DE. n. August, 2015.

IEA. **Renewables**. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/renewables/>>. Acesso em: 16 out. 2017.

INCAPER SISTEMA DE INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS. **Meteorologia - Vitória/ES**. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>>. Acesso em: 8 out. 2018.

INMETRO. Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)**, v. 1, p. 126, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatísticas por Cidade e Estado**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). Inventário de emissões atmosféricas da Região da Grande Vitória. p. 46, 2011.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). Guia da Qualidade do Ar. 2015.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). Relatório da qualidade do ar da Grande Vitória 2014. p. 1–12, 2017.

IPEA. Petróleo: da crise aos carros flex. **59**, 2010.

IRENA. **Energy Transition**. Disponível em: <<http://www.irena.org/energytransition>>. Acesso em: 28 fev. 2018a.

IRENA. **Benefits**. Disponível em: <<http://www.irena.org/benefits>>. Acesso em: 28 fev. 2018b.

JIANG, B.; JI, J.; YI, H. The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall. **Renewable Energy**, v. 33, n. 11, p. 2491–2498, 2008.

KALDELLIS, J. K.; FRAGOS, P.; KAPSALI, M. Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2717–2724, 2011.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M. Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements. **Energy**, v. 36, n. 8, p. 5154–5161, 2011.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M.; KAVADIAS, K. A. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. **Renewable Energy**, v. 66, p. 612–624, 2014.

KEMPE, M. D. Modeling of rates of moisture ingress into photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 90, n. 16, p. 2720–2738, 2006.

KINNO, T. et al. Development of intelligent protection system for photovoltaic systems. **2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, ICEPE-ST 2013**, 2013.

LORENZO, E.; MORETÓN, R.; LUQUE, I. Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns. v. 00, 1994.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; KAMALISARVESTANI, M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2920–2925, 2012.

MENDES, M. A. et al. **Analysis of financial impacts caused by pollution from thermal power plants in Brazilian public health system**. Industry Applications (INDUSCON), 2016 12th IEEE International Conference on. **Anais...**Curitiba: 2016

MÉRI SANTOS, J.; REIS JÚNIOR, N. C. Caracterização e quantificação de partículas sedimentadas na região da Grande Vitória. 2011.

MICHELS, R. N. et al. Yield from photovoltaic modules under real working situations in west Paraná - Brazil. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, p. 19, 2015.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3rd. ed. New York, 2006.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. DE O. **Estatística Básica**. 5. ed. São Paulo, 2004.

O'HARA, S. L.; CLARKE, M. L.; ELATRASH, M. S. Field measurements of desert dust deposition in Libya. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 21, p. 3881–3897, 2006.

ODEH, S.; BEHNIA, M. Improving photovoltaic module efficiency using water cooling. **Heat Transfer Engineering**, v. 30, n. 6, p. 499–505, 2009.

OMUBO-PEPPLE, V.; ISRAEL-COOKEY, C. Effects of temperature, solar flux and relative humidity on the efficient conversion of solar energy to electricity. **European Journal of**, v. 35, n. 2, p. 173–180, 2009.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2016. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf%5Cnhttp://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html>.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, p.530, 2014.

POMILIO, J. A. **Energia elétrica e fontes renováveis**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap2.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2017.

QUASCHNING, V.; HANITSCHT, R. Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. **Solar Energy**, v. 56, n. 6, p. 513–520, 1996.

REN21. Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial. **Ren21**, p. 1–31, 2016.

REN21. **Renewables 2018 Global Status Report**, 2018.

SAID, S. A. M. et al. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. October 2017, p. 743–760, 2018.

SAID, S. A. M.; AL-AQEELI, N.; WALWIL, H. M. The potential of using textured and anti-reflective coated glasses in minimizing dust fouling. **Solar Energy**, v. 113, p. 295–

302, 2015.

SAID, S. A. M.; WALWIL, H. M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. **Solar Energy**, v. 107, p. 328–337, 2014.

SÁLY, V.; RUZINSKÝ, M.; REDI, P. Indoor study and ageing tests of solar cells and encapsulations of experimental modules. **Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology**, v. 2001–Janua, p. 59–62, 2001.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, n. February, p. 590–601, 2017.

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**, v. 22, p. 698–733, 2013.

SHADDEL, M.; JAVAN, D. S.; BAGHERNIA, P. Estimation of hourly global solar irradiation on tilted absorbers from horizontal one using Artificial Neural Network for case study of Mashhad. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 59–67, 2016.

SHIRAKAWA, M. A. et al. Microbial colonization affects the efficiency of photovoltaic panels in a tropical environment. **Journal of Environmental Management**, v. 157, p. 160–167, 2015.

SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A. G.; PALYVOS, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 92, n. 11, p. 1393–1402, 2008.

TALESUN. TP660P - Módulo solar policristalino. p. 7–8, 2018.

TAMIZHMANI, G. et al. Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long -Term Monitoring and Model Development For Energy Rating. p. 936–939, 2003.

TEO, H. G.; LEE, P. S.; HAWLADER, M. N. A. An active cooling system for photovoltaic modules. **Applied Energy**, v. 90, n. 1, p. 309–315, 2012.

TIEPOLO, G. M. et al. Estudo Do Potencial De Participação Das Fontes Renováveis

De Energia Na Matriz Elétrica Do Estado Do Paraná. **Revista Brasileira de Energia**, v. 20, n. 2, p. 79–90, 2014.

VASEL, A.; IAKOVIDIS, F. The effect of wind direction on the performance of solar PV plants. **Energy Conversion and Management**, v. 153, n. August, p. 455–461, 2017.

WANG, Z.; WANG, F.; SU, S. Solar irradiance short-term prediction model based on BP neural network. **Energy Procedia**, v. 12, p. 488–494, 2011.

ZORRILLA-CASANOVA, J. et al. Analysis of dust losses in photovoltaic modules. **World Renewable Energy Congress 2011 -- Sweden**, n. July 2014, p. 2985–2992, 2011.

ZORRILLA-CASANOVA, J. et al. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**, v. 15, n. 3–4, p. 326–334, 2013.