



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



MARIANA MYRIAM FRAGA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE SUJIDADES NO  
DESEMPENHO DE MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS EM MINAS GERAIS**

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa de Freitas Cunha Lins

Coorientadora: Dra. Renata Braga Soares

Belo Horizonte

3 de Julho de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



# **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE SUJIDADES NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM MINAS GERAIS**

Aluna: Mariana Myriam Fraga

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa de Freitas Cunha Lins

Coorientadora: Dra. Renata Braga Soares

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Química, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
**MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**

Belo Horizonte

3 de Julho de 2018

“ Digo a verdade: Tudo o que vocês ligarem  
na terra terá sido ligado no céu,  
e tudo o que vocês desligarem  
na terra terá sido desligado no céu.”

Mateus 18:18 Bíblia Sagrada

## **Agradecimentos**

Sou grata a Deus pelo seu imenso Amor com que tem me amado durante toda vida. É um descanso saber que sou filha querida de um Pai Todo Poderoso, que nos deu seu Filho para que possamos passar a eternidade ao seu lado, e nos enviou o Espírito Santo para nos ensinar todas as coisas até chegar o dia de encontrarmos com Ele face a face. Sem Ele, esse trabalho jamais existiria.

Sou grata à minha família. Agradeço aos meus pais que possibilitaram não só esse trabalho como sempre me incentivaram a sonhar alto. Obrigada pelo carinho, dedicação e amor com que tem me ensinado a viver. Vocês são exemplos de doação, superação e um impulso para nunca desistir de lutar por aquilo que Deus quer que vivamos, mesmo enxergando a nossa pequenez. E como não agradecer àquela que tem estado comigo desde que nasceu! Maira, seu cuidado com as pessoas ao seu redor sempre irá me inspirar a ser melhor. Obrigada pelas palavras de encorajamento do jeitinho que só você sabe falar. Agradeço ao Ricardo, que chegou na família para somar e dividir os momentos ao nosso lado.

Sou grata ao meu doce e fofo namorado. Bruno, obrigada por ser meu companheiro nessa jornada! A faculdade e o mestrado não seriam os mesmos sem você. Eu me alegro em saber que ao seu lado, voarei vôos incrivelmente altos propostos e financiados por Deus.

Agradeço à minha orientadora Vanessinha pela doçura e disponibilidade com que sempre me tratou. Obrigada professora, você sempre será um exemplo brilhante para mim. Foi um prazer imensurável dividir esse tempo a senhora. Agradeço também à minha coorientadora Renata por tantas lições compartilhadas e por todo incentivo.

Agradeço ao meu supervisor durante o período de estágio na CEMIG, Tiago, que imaginou muita garra. Obrigada também ao Juliano Fraga por todo o esforço na execução do projeto. Foram muitos galões de água desmineralizada carregados para cima daquele telhado. Agradeço aos demais professores, que gastaram tempo e paciência ao responder tantas dúvidas.

## Resumo

Em meio à preocupações com o meio ambiente e a sustentabilidade, fontes de energias renováveis são alternativas para o fornecimento de energia elétrica ao redor do mundo. Realidade no suprimento de energia elétrica em situações especiais (navios, foguetes, sondas), a energia solar fotovoltaica já corresponde à parcelas consideráveis na matriz energética de muitos países. O Brasil tem presenciado uma expansão exponencial da sua capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica nos últimos anos, resultado da implementação de programas governamentais brasileiros. Devido à essa expansão, torna-se apropriada e incentivada a investigação dos fatores externos que influenciam o desempenho dos módulos fotovoltaicos, como a poeira depositada sobre a superfície das placas. O presente trabalho visa avaliar o impacto da poeira depositada no desempenho dos módulos fotovoltaicos pertencentes à Usina Fotovoltaica Mineirão, localizada no estádio de futebol Mineirão, em Belo Horizonte, bem como realizar a caracterização física e química desse material. A usina é composta de 5910 módulos fotovoltaicos de silício policristalino. Dois grupos de módulos diametralmente opostos foram selecionados e acompanhados por 43 dias, na segunda metade do inverno do ano de 2016. Em cada grupo, um conjunto de módulos foi separado como referência e mantido limpo durante todo o estudo. No 23º dia, ocorreu uma precipitação moderada (7 mm) e no 30º dia, alguns módulos adicionais foram limpos. A poeira coletada foi caracterizada por difração de raios-X e por fluorescência de raios-X. A distribuição granulométrica e o formato das partículas também foi analisado. O material depositado foi responsável por uma redução na potência de pico de aproximadamente 13,7% no período seco e de 6,5% no período seguinte ao 23º dia. A poeira também reduziu a produção de energia em 16,5% no período seco e em 8% após a precipitação do 23º dia. O tamanho médio de partícula no grupo orientado para o sudoeste foi de 35,3 µm e de 28,7 µm no grupo orientado para nordeste. No entanto, essa diferença não foi suficiente para impactar o desempenho dos grupos. A poeira coletada era composta principalmente de quartzo, hematita e calcita. Partículas de material orgânico também foram encontradas. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de limpezas periódicas dos módulos de forma a manter um bom desempenho de geração de energia.

**Palavras-chave:** energia solar, deposição de poeira, módulos fotovoltaicos, desempenho, caracterização de poeira.

## **Abstract**

Due to concerns with the environment and sustainability, renewable energy sources are an alternative to power supply around the world. The solar photovoltaic energy is a reality in the power supply of special situations (ships, rockets, probes), and it already corresponds to a considerable share in the power matrix of many countries. In Brazil, the installed capacity of photovoltaic energy has been exponentially increased, as a result of Brazilian government program implementations. Because of this expansion, the investigation of external factors that influence the performance of photovoltaic modules is appropriate and motivated, such as the deposited dust on the surface. The present work aims to evaluate the impact of deposited dust in the performance of photovoltaic modules from the Photovoltaic Power Plant “Mineirão”, located on the soccer stadium “Mineirão”, in Belo Horizonte, as well as to characterize the material physically and chemically. The plant is composed of 5910 photovoltaic modules of polycrystalline silica. Two groups of modules diametrically opposite were selected and monitored for 43 days, in the second half of the winter of 2016. In each group, a set of modules were separated as reference and maintained clean during the whole study. On day 23, a moderated rainfall occurred (7 mm), and on day 30, some additional modules were cleaned. The collected dust were characterized by X-ray diffraction and X-ray fluorescence. The granulometric distribution and the particle shape were also analyzed. The deposited material was responsible for a reduction in peak power of approximately 13.7% in the dry period, and 6.5% in the period after day 23. Dust has also reduced the energy generation in 16.5% in the dry period, and 8% after the rainfall of day 23. The average particle size of the group oriented southwest and northeast were 35.3  $\mu\text{m}$  and 28.7  $\mu\text{m}$  respectively. However, this difference was not enough to have an impact on the group’s performance. The collected dust was mainly composed of quartz, hematite and calcite. Organic particles were also found. The obtained results reinforce the necessity of periodical cleaning in order to maintain a good performance of power generation.

**Keywords:** solar energy, dust deposition, photovoltaic module, performance, dust characterization.

## Sumário

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	v
1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	4
2.1 Objetivos principais.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3 Revisão Bibliográfica.....	5
3.1 Energia Fotovoltaica.....	5
3.1.1 Semicondutores e o Modelo das Bandas de Energia.....	5
3.1.2 Dopantes e o Fundamento das Células Fotovoltaicas.....	6
3.2 O Sol e a Irradiação Solar Global.....	8
3.3 A Deposição de poeira e a Energia Fotovoltaica.....	9
3.3.1 Fatores que influenciam a deposição de poeira e a degradação do desempenho.....	10
3.3.2 Sombreamentos e o Impacto na Resposta Elétrica.....	16
3.3.3 Fundamentos do acúmulo de partículas na superfície.....	17
3.3.4 Estratégias para Mitigação do Problema.....	19
4 Metodologia.....	20
4.1 Descrição do Estádio.....	20
4.2 Descrição da Planta.....	21
4.3 Descrição do estudo e da coleta de dados.....	22
4.4 Setores estudados.....	23
4.5 Normalização de valores.....	24
4.6 Coleta do material depositado.....	25
4.7 Análise do material coletado.....	25
4.8 Limpeza dos setores.....	26
4.9 Eventos de precipitação.....	27
5 Resultados e Discussão.....	28
5.1 Dados de irradiância solar.....	28
5.2 Dados de precipitação.....	30
5.3 Acompanhamento do desempenho dos módulos.....	31
5.3.1 Análise da potência de saída.....	32

5.3.1.1 Potência instantânea.....	32
5.3.1.2 Potência de pico.....	35
5.3.2 Análise da geração de energia.....	38
5.3.2.1 Energia gerada diária.....	38
5.3.2.2 Efeito da orientação dos módulos.....	40
5.4 Caracterização do material coletado.....	40
6 Conclusão.....	46
Referências.....	47
Anexos.....	51
Anexo A – Geração diária de energia e insolação dos setores de módulos em estudo.....	51

## Lista de Figuras

Figura 1: Evolução da capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica total global 2000-2016.....	1
Figura 2: Evolução das conexões de geração de energia solar fotovoltaica nos últimos anos, exibindo um crescimento exponencial influenciado por iniciativas governamentais.....	2
Figura 3: Dopantes do tipo n e dopantes do tipo p.....	7
Figura 4: Funcionamento de células fotovoltaicas.....	7
Figura 5: Espectro da radiação solar acima da atmosfera (AM0) e na superfície com o sol na altura $41,8^\circ$ (AM1,5).....	8
Figura 6: Mapa da Irradiação Solar Global em 2016.....	9
Figura 7: Histograma de publicações sobre poeira e sujidades por ano, os fatores relacionados ao crescimento ou redução no número de publicações e o tipo de coletor predominante por período.....	10
Figura 8: Variantes no acúmulo de poeira na superfície dos módulos.....	11
Figura 9: Intensidade de deposição de poeira ao redor do mundo.....	12
Figura 10: Comparação do desempenho típico de módulos fotovoltaicos em várias condições em função do tempo para três localidades, duas no Oriente Médio (Omã e Egito) e nos Estados Unidos.....	12
Figura 11: Quantidade de poeira acumulada em amostras em oito orientações diferentes para sete ângulos de inclinação em uma região árida.....	14
Figura 12: Potência de saída normalizada máxima para diferentes classes de particulado em função da densidade de poeira depositada.....	15
Figura 13: Degradação da potência de saída (W) para várias irradiâncias solares em função da espessura da camada de poeira.....	16
Figura 14: Corrente produzida em função da voltagem aplicada em condições de sombreamento leve e em sombreamento intenso.....	17
Figura 15: Processo de cementação de particulado por umidade.....	18
Figura 16: Camada de minerais depositados visível.....	18
Figura 17: Planta Geral de Implantação da Usina.....	21
Figura 18: Esquema de strings e inversores com destaque para os módulos referentes ao inversor B.....	22
Figura 19: Módulos Fotovoltaicos da Usina Mineirão com destaque para as áreas sombreadas.....	22

Figura 20: Grupos S e N escolhidos para o estudo.....	24
Figura 21: Comparação visual entre módulos limpos e sujos.....	25
Figura 22: Perfil diário de irradiância para o dia 17 (ensolarado) (a) e o dia 13 (nublado) (b).....	28
Figura 23: Irradiâncias de pico durante os 43 dias de estudo para os dois grupos.....	29
Figura 24: Radiação solar total diária durante os 43 dias de estudo para os dois grupos..	30
Figura 25: Dados de precipitação coletados da Estação Meteorológica Pampulha – INMET.....	31
Figura 26: Perfil diário de potência para o dia 17 (ensolarado) – Grupo N (a), Grupo S (b) .....	33
Figura 27: Perfil diário de potência para o dia 13 (nublado) – Grupo N (a), Grupo S (b).....	34
Figura 28: Perda de potência absoluta e relativa para o setor 7 (Grupo S) no dia 20 (ensolarado).....	35
Figura 29: Potência de pico durante todo o estudo para os setores 6 e 7 (Grupo S) e irradiância solar.....	36
Figura 30: Potência de pico normalizada durante todo o estudo para os setores 5 e 7 (Grupo S).....	37
Figura 31: Energia gerada pelos setores 5 e 7 (Grupo S) e a radiação solar total diária..	38
Figura 32: Energia gerada normalizada gerada para os setores 52 e 54 durante todo o estudo.....	39
Figura 33: Perda direcional média do Grupo S nos 43 dias do estudo.....	41
Figura 34: Espectro de difração de raios-X para a poeira coletada no Grupo S.....	41
Figura 35: Espectro de difração de raios-X para a poeira coletada no Grupo N.....	42
Figura 36: Vista aérea do estádio de futebol Mineirão.....	42
Figura 37: Região do estádio de futebol Mineirão com destaque para companhias mineradoras (vermelho) e companhias cimenteiras (azul).....	43
Figura 38: Distribuição granulométrica do material coletado nos Grupos N e S.....	44
Figura 39: Microscopia eletrônica de varredura da poeira coletada.....	45

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Cronograma de limpeza do trabalho realizado.....	26
Tabela 2: Valores médios para a potência de pico normalizada durante os três diferentes períodos.....	38
Tabela 3: Valores médios para a energia gerada normalizada durante os três diferentes períodos.....	40
Tabela A.1: Irradiação solar diária dos setores de módulos em estudo.....	51

## 1. Introdução

De acordo com o *Global Market Outlook for Solar Power 2017-2021*, o ano de 2016 foi recorde em capacidade instalada anual de energia solar fotovoltaica no mundo, com novos 76,6 GW instalados e conectados às redes de transmissão. Este valor é 50% maior que a capacidade que foi instalada no ano anterior (2015), de 51,2 GW. Em termos de capacidade acumulada, a potência instalada mundial aumentou cerca de 33% de 2015 para 2016, indo de 229,9 GW para a marca de 306,5 GW (Figura 1). Considerando que a capacidade total acumulada em 2006 era de 6,6 GW, em uma década, a potência instalada mundial aumentou mais de 4500% (Solar Power Europe, 2017).

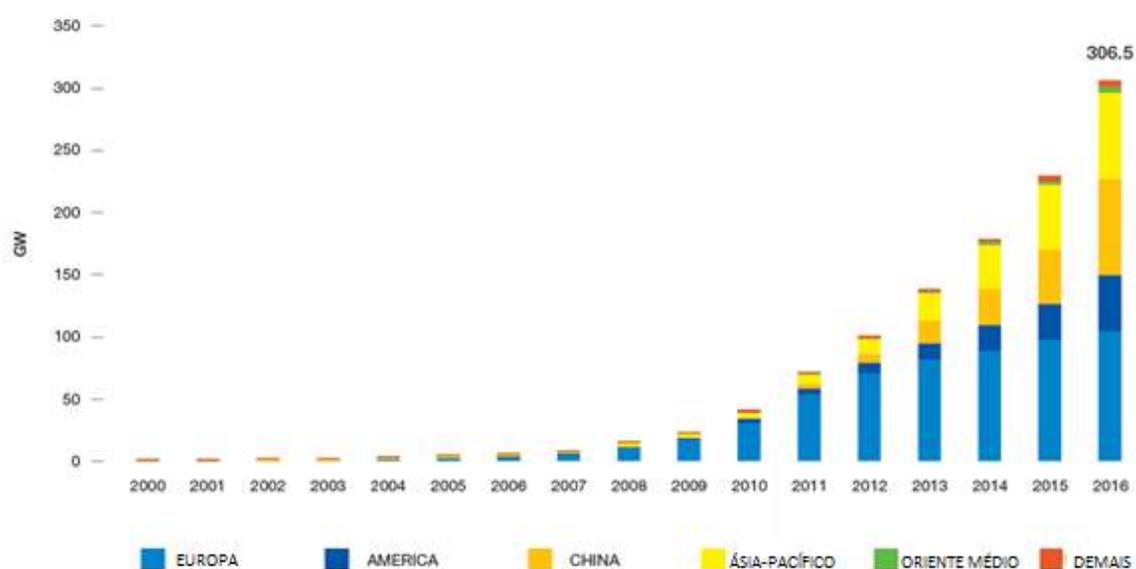


Figura 1: Evolução da Capacidade Instalada de Geração de Energia Solar Fotovoltaica Total Global 2000-2016. Fonte: SolarPower Europe (2017).

Em 2016, a China ocupou a primeira posição do ranking, representando  $\frac{1}{4}$  do mercado total e uma capacidade instalada de 77,9 GW. Em segundo e terceiro lugar, estão o Japão (42,9 GW) e os Estados Unidos da América (42,4 GW), respectivamente. A Alemanha, que já foi a primeira do ranking, caiu para o quarto lugar com cerca de 13,4% do mercado com 41,1 GW de capacidade instalada. Segundo a *Solar Power Europe* (2017), a capacidade total instalada de geração de energia fotovoltaica no mundo deve ultrapassar as marcas de 400 GW em 2018, de 500 GW em 2019, de 600 GW em 2020 e 700 GW em 2021.

Embora o Brasil possua um alto potencial para aproveitamento da energia fotovoltaica, a capacidade instalada de energia fotovoltaica no país ainda é muito baixa quando comparada aos países citados anteriormente. Visando aumentar a geração de

energia renovável não-convencional, vários programas governamentais têm sido implantados, como o Sistema de Compensação de Energia Elétrica revisado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da Resolução Normativa nº687/2015. Esse sistema incentiva os consumidores a instalarem pequenos geradores conectados à rede de distribuição de energia elétrica e fornecerem o excedente de energia no sistema elétrico nacional. Os consumidores recebem em troca abatimentos na fatura de consumo de energia elétrica proporcional à energia fornecida para o Sistema Elétrico Nacional (SIN) (ANEEL, 2015). Outro incentivo foi a inclusão dos equipamentos para produção de energia solar e eólica no programa “Mais Alimentos” desde novembro de 2015, possibilitando financiamentos à juros mais baixos. Semelhantemente, o programa Apoio BNDES autorizou o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, pela Lei 13.203 de dezembro de 2015, a financiar projetos de geração distribuída em escolas públicas e em hospitais com taxas de juros diferenciadas (MME, 2017).

Esses incentivos, somados ao cenário mundial propício, têm promovido um crescimento expressivo da geração distribuída no Brasil (Figura 2). Em setembro de 2017, o país alcançou um total de 13334 conexões de geração de energia solar fotovoltaica abaixo de 5 MW cada, totalizando uma capacidade instalada de 109,5 MW. (ANEEL, 2018).

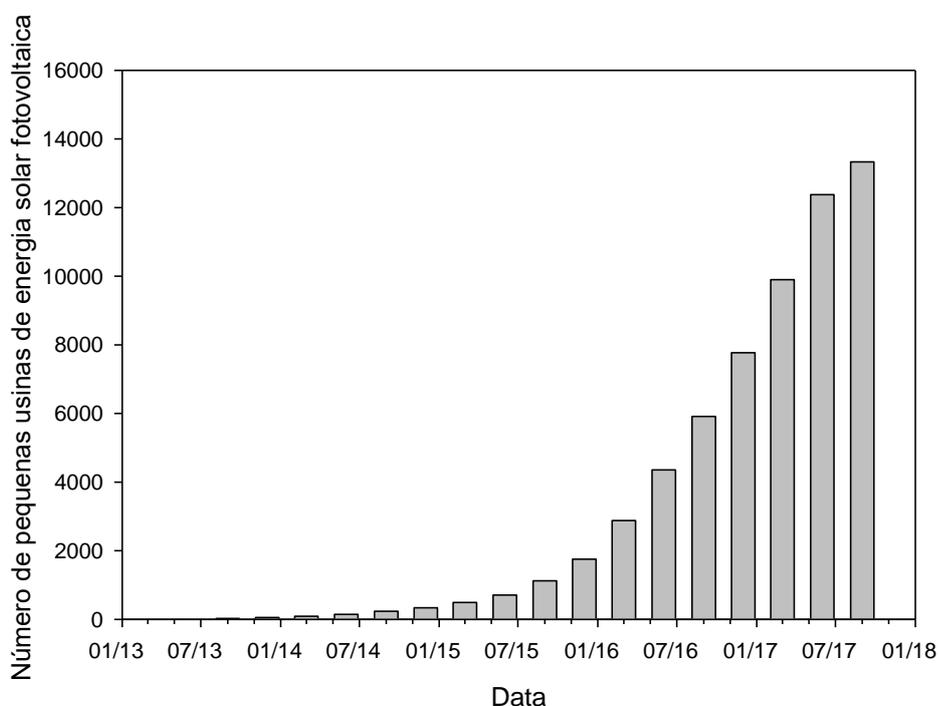


Figura 2: Evolução das conexões de geração de energia solar fotovoltaica nos últimos anos, exibindo um crescimento exponencial influenciado por iniciativas governamentais.

Fonte: Dados da ANEEL (2018).

Uma expansão dessa magnitude implica no aumento da demanda por práticas adequadas à realidade brasileira, de acordo com fatores externos específicos da localização e que afetam os sistemas fotovoltaicos durante sua operação. Entre esses fatores, o efeito do particulado depositado no vidro que cobre os módulos tem sido estudado ao redor do mundo revelando um caráter altamente regional, sazonal e em função do tempo de exposição (Sarver et al., 2013).

A localização geográfica, a sazonalidade, o regime de chuvas da região, as características de construção da usina como posicionamento e tipo dos módulos e as características físico-químicas da poeira são responsabilizados pelas variações na eficiência da produção de energia provocadas pelo material depositado nos módulos fotovoltaicos. Diante de uma questão tão dependente da região, faz-se necessário entender melhor as especificidades locais do problema da poeira e assim os custos de manutenção e operação das usinas fotovoltaicas.

Em função da lacuna existente de dados desse tipo para a região de Belo Horizonte, o presente trabalho se dedica a compreender as semelhanças e diferenças entre a situação local e o contexto mundial referentes à degradação do desempenho de módulos fotovoltaicos devido à deposição de poeira. Um trabalho experimental, tendo como base os trabalhos realizados em outros países, será desenvolvido ao acompanhar e comparar o desempenho de módulos limpos e sujos de uma usina fotovoltaica operante em Belo Horizonte. Em um ambiente não controlado, esse estudo almeja mensurar a parcela de energia não gerada e a potência não atingida devido à poeira depositada na superfície ao comparar o desempenho de módulos de referência, limpos, e de módulos sujo, por 43 dias, durante a segunda metade do inverno, bem como caracterizar química e fisicamente o material coletado.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivos principais**

Esse trabalho almeja avaliar e mensurar o impacto da poeira depositada no desempenho de módulos, em termos de potência e energia geradas, em uma planta de geração de energia fotovoltaica no estado de Minas Gerais, Brasil, e compreender a relação entre o impacto e as características físicas e químicas do material coletado.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Quantificar o impacto da poeira depositada no desempenho dos módulos em função da sazonalidade (período seco e período após a chuva);
- Propor uma metodologia eficiente e de acordo com as especificidades dessa usina para a limpeza dos módulos fotovoltaicos;
- Coletar e caracterizar o particulado depositado em função da composição utilizando Difração de raios-X (DRX), Fluorescência de raios-X (FRX) e Espectroscopia dispersiva em energia (EDS);
- Caracterizar o particulado depositado morfológica e fisicamente utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Classificação granulométrica.
- Avaliar possíveis diferenças na composição e no impacto da poeira em função dos posicionamentos e orientações dos módulos na usina;

### **3. Revisão Bibliográfica**

A revisão bibliográfica está dividida em três partes. A primeira parte explora os fundamentos da energia fotovoltaica e das células fotovoltaicas. A segunda parte detalha as características da irradiação solar e as intensidades observadas ao redor do mundo. Por fim, a terceira e última parte aborda as publicações sobre o impacto das sujidades depositadas em módulos fotovoltaicos nos mais diversos ambientes e os fundamentos extraídos desses estudos.

#### **3.1 Energia Fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida pela conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, o efeito fotovoltaico consiste na criação de uma diferença de potencial através da absorção de luz. Em 1883, Charles Fritts produziu a primeira célula fotovoltaica composta basicamente por uma amostra de selênio semicondutor recoberta com pó de ouro. Pioneira, essa célula apresentava uma eficiência menor que um por cento. Em 1954, os pesquisadores dos Laboratórios Bell, Gerald Pearson, Calvin Fuller e Daryl Chapin descobriram de maneira acidental que semicondutores de silício dopado com certas impurezas eram muito sensíveis à luz, possibilitando a fabricação da primeira célula solar comercial (Chapin et al., 1954). Desde então, muito tem sido estudado e entendido para o aperfeiçoamento das células solares como o Modelo da Banda de energia que explica a geração de energia por materiais semicondutores dopados.

##### **3.1.1 Semicondutores e o Modelo das Bandas de Energia**

Embora os elétrons em átomos isolados possam ocupar apenas estados de energia bem definidos, para moléculas com muitos átomos, as interações entre os elétrons se misturam. Nos sólidos, os níveis de energia se tornam inseparáveis, sendo então chamados de Bandas de Energia. Essas bandas vão sendo preenchidas com os elétrons em ordem crescente do nível de energia. A última banda completamente ocupada é chamada Banda de Valência (BV), enquanto a banda imediatamente após esta, isto é, com o nível energético maior, é chamada Banda de Condução (BC). A Banda de Condução pode estar parcialmente ocupada ou totalmente vazia. O salto de energia entre a Banda de Condução e a Banda de Valência é chamado *Band Gap* (Quaschnig, 2005).

Os materiais são divididos em condutores, semicondutores e isolantes em função da *Band Gap* e da ocupação da Banda de Condução. Nos materiais condutores, as duas bandas podem se sobrepor e a Banda de Condução é parcialmente preenchida, permitindo a condutividade elétrica característica. Já os materiais isolantes apresentam uma distância energética muito grande entre as duas bandas. Nesses materiais, a Banda de Condução fica totalmente vazia.

Os materiais semicondutores, utilizados na produção das células fotovoltaicas, possuem a banda de valência totalmente preenchida por elétrons e a banda de condução totalmente vazia à temperaturas muito baixas. Além disso, essas duas bandas de energia estão separadas por um gap de energia da ordem de poucos eV. Assim, fótons na faixa do visível com energia suficiente promovem a excitação dos elétrons da Banda de Valência para a Banda de Condução (Quaschnig, 2005).

### **3.1.2 Dopantes e o Fundamento das Células Fotovoltaicas**

O silício é o semicondutor mais utilizado em células fotovoltaicas. Esse elemento possui quatro elétrons na camada de valência que se ligam aos vizinhos formando uma rede cristalina. O silício dopado do tipo n tem átomos como o fósforo, com cinco elétrons na Banda de Valência. Quando átomos pentavalentes são adicionados à rede cristalina de silício, deixam elétrons livres que passam para a Banda de Condução. Já o silício dopado tipo p tem átomos com três elétrons na camada de valência, como o boro. Esses átomos trivalentes tem um elétron a menos para satisfazer as quatro ligações requeridas pelos átomos da rede cristalina de silício. Essa ausência permite que, com pouca energia, um elétron possa se movimentar e ocupar a lacuna criada. É importante ressaltar que cada um dos dois tipos de silício dopado não são carregados eletricamente (mesmo número de prótons e elétrons), mas sim que eles tem elétrons livres ou buracos que podem ser facilmente movidos (Figura 3) (Quaschnig, 2005).

A base do funcionamento das células fotovoltaicas é a junção tipo p-n, isto é, duas regiões diferentes com dopagens p e n em contato (passo 1). Nesse contato, um campo elétrico é criado quando os elétrons livres do lado n passam para o lado p e são capturados pelas lacunas (passo 2). O lado p fica com excesso de elétrons, negativo, enquanto o lado n, deficiente em elétrons, fica positivo. Esse processo ocorre até que o campo elétrico criado pela separação de cargas impeça a passagem de mais elétrons livres pela junção.

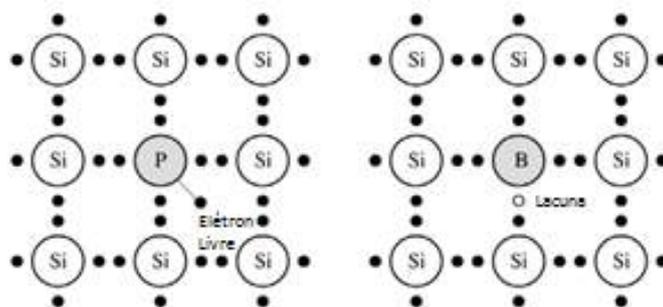


Figura 3: Dopantes do tipo n e dopantes do tipo p. Fonte: Quaschnig (2005).

Ao incidir um fóton com energia superior ao Band Gap do semiconductor nessa configuração (passo 3), o elétron do lado p, que estava carregado negativamente, é excitado para a Banda de Condução e um par elétron-lacuna é formado. Esse elétron é acelerado pelo campo elétrico da junção p-n até o lado n, criando uma corrente (passo 4). A corrente é conduzida por um fio externo em contato com as duas extremidades do silício (NEED, 2015). Esse processo é exemplificado na Figura 4 e compreende os fundamentos do funcionamento de uma célula fotovoltaica.

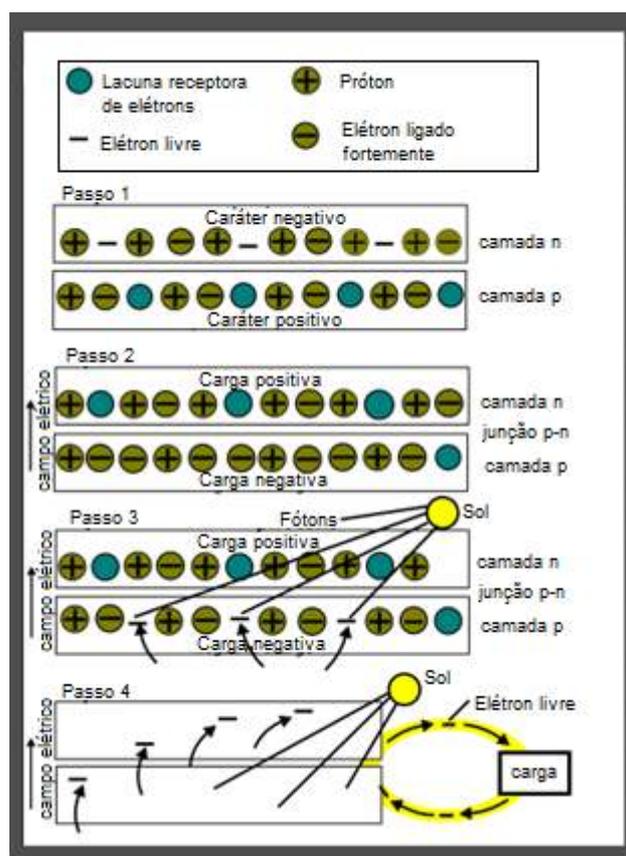


Figura 4: Funcionamento de células fotovoltaicas. Fonte: NEED (2015).

### 3.2 O Sol e a Irradiação Solar Global

O sol, ponto central do nosso sistema solar, é a fonte de energia renovável mais abundante disponível para a Terra. Devido à reação constante de fusão nuclear que ocorre no astro, ondas eletromagnéticas são emitidas em direção à Terra, correspondendo à 99,97% de toda energia que chega ao planeta (Quaschnig, 2005).

A maior parte da energia radiante do sol está concentrada nas partes visível e próxima do visível do espectro, como mostrado na Figura 5. A luz visível corresponde a aproximadamente 43% do total emitido, 49% estão no infravermelho próximo e 7% no ultravioleta. E menos de 1% da radiação solar é emitida como raios X, raios gama e ondas de rádio.

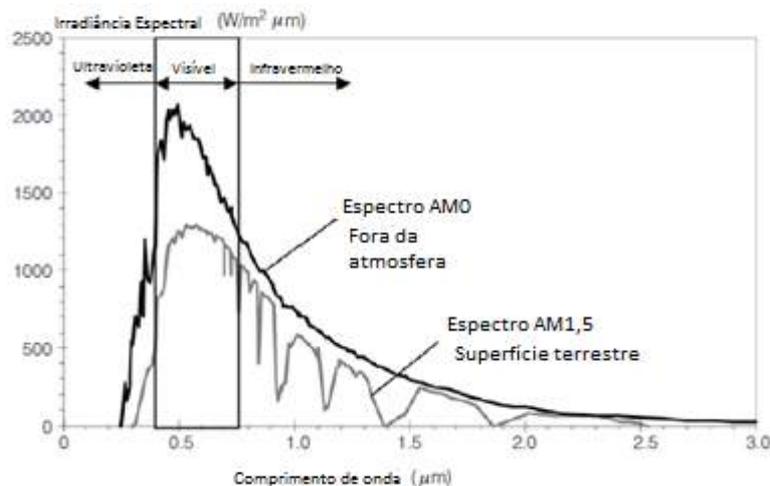


Figura 5: Espectro da radiação solar acima da atmosfera (AM0) e na superfície com o sol na altura  $41,8^\circ$  (AM1,5). Fonte: Quaschnig (2005).

A densidade de fluxo de radiação é a quantidade de energia radiante que passa através de um certo plano na unidade de tempo e de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), compreendendo a radiação vinda de todas as direções. A densidade média de fluxo de radiação solar que chega a órbita da Terra é dada pela Constante Solar ( $1367 \pm 2 \text{ W}/\text{m}^2$ ). No entanto, parte dessa radiação é perdida ou absorvida ao atravessar a atmosfera, de modo que a irradiância, densidade de fluxo de radiação incidente em uma superfície, medida na superfície terrestre é bem menor que a Constante Solar (Quaschnig, 2005). Como mostrado na Figura 5, a redução da intensidade da irradiância não ocorre por igual para as diferentes faixas de comprimento de onda, afetando o formato do espectro da radiação solar que alcança a superfície terrestre.

Inúmeros fatores impactam a irradiância e a insolação que atinge a superfície terrestre. No verão, devido a inclinação da Terra, a irradiância e a insolação são maiores.

No início ou fim do dia, devido à maior massa de ar a ser atravessada, uma parcela maior da irradiância é absorvida e dispersa pelos gases e partículas (Quaschnig, 2005). Quanto maior a cobertura de nuvens, menor a insolação, motivo das diferenças nas irradiâncias entre a região Norte, com muitas nuvens, e a região Nordeste do Brasil, com poucas chuvas. Embora, a irradiância aumente com a redução da latitude, as características geográficas específicas como altitude e proximidade com o mar podem ser predominantes.

O potencial de aproveitamento da energia solar dos países é avaliado através dos valores de irradiação solar, isto é, a irradiância integrada em um intervalo de tempo especificado. Como mostrado no Mapa de Irradiação solar do ano de 2016 disponibilizado pela Solargis (Figura 6), o Brasil conta com uma posição geográfica estratégica e tem um dos maiores potenciais para aproveitamento de energia solar. Em 2016, o país apresentou valores diários médios de irradiação solar entre 4,5 e 6,5 kWh/m<sup>2</sup>. Isto é quase o dobro de países da Europa, como a Alemanha e Inglaterra, que apresentaram valores diários médios entre 2 e 3,5 kWh/m<sup>2</sup>.

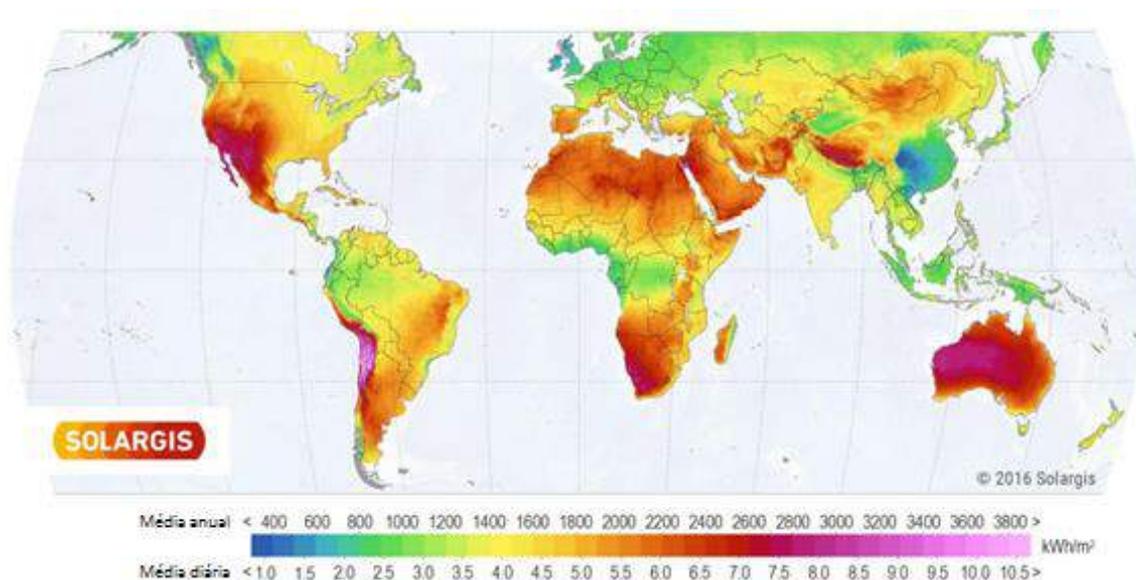


Figura 6: Mapa de Irradiação Solar Global em 2016. Fonte: Solargis (2016).

### 3.3 A Deposição de poeira e a Energia Fotovoltaica

A expansão do mercado de energia solar desde a década de 80, em especial recentemente nas regiões desérticas, (regiões da China, Arábia Saudita, Qatar, Austrália entre outros) é refletida no aumento exponencial das publicações sobre deposição de

poeira nos coletores de energia solar, como mostrado na Figura 7. Nessa Figura também são apresentados vários fatores como a redução dos preços, a produção chinesa massiva de componentes fotovoltaicos e a implantação de expansões (Costa et al, 2016). Nesta seção, o aprendizado resultante de muitas dessas publicações será detalhado.

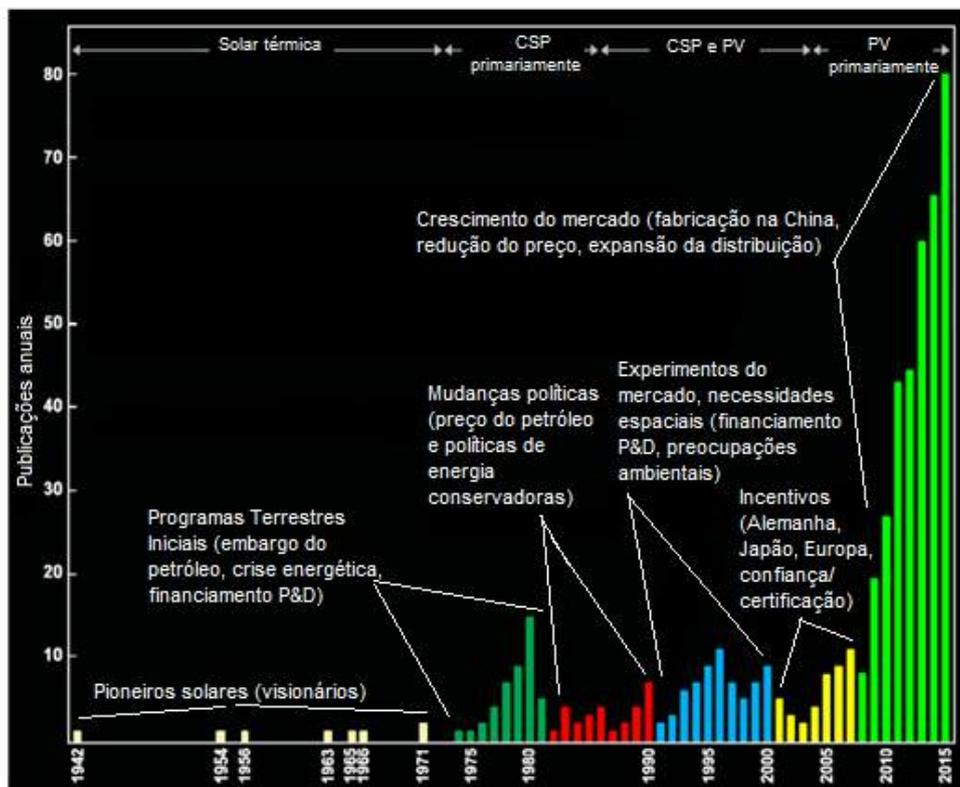


Figura 7: Histograma de publicações sobre poeira e sujidades por ano, os fatores relacionados ao crescimento ou redução no número de publicações e o tipo de coletor predominante por período.

Fonte: Costa et al. (2016).

### 3.3.1 Fatores que influenciam a deposição de poeira e a degradação do desempenho

Recentemente, os fatores externos que impactam o desempenho dos módulos fotovoltaicos tem sido alvos recorrentes de pesquisas científicas. Entre esses fatores, a deposição de material no recobrimento externo dos módulos (Costa et al., 2016), que longe de ser um problema inédito, ainda está distante de ser completamente compreendido e mitigado (Appels et al., 2013, Cabanillas & Munguía, 2011, El-Shobokshy & Hussein, 1993, Elminir et al., 2006, Kimber et al., 2006, Mejia & Kleissl, 2013, Said & Walwil, 2014, Sarver et al., 2013, Schill et al., 2015). Sujidades nos módulos impactam diretamente a transferência de luz, transmitância, até a célula fotovoltaica propriamente dita. Assim, comprometem significativamente a eficiência na produção de energia e,

segundo Sarver et al. (2013), até hoje não foram encontrados efeitos benéficos do material depositado.

O termo sujidade é empregado para o acúmulo de matéria sobre os módulos como neve, poeira, folhas e fezes de pássaros. Enquanto o termo poeira, mais específico, refere-se à qualquer material particulado com diâmetro menor que 500  $\mu\text{m}$ . A poeira pode ser composta por material orgânico (pólen, células humanas, microfibras) e por minerais como por exemplo, areia, argila e calcário erodido (Sarver et al., 2013). Esses particulados, transferidos pelo vento, são provenientes do solo, da poluição produzida por indústrias, automóveis, queimadas, entre muitas outras fontes. Assim, tanto as características da poeira quanto o perfil de deposição tem caráter altamente regional e sazonal, especificidades que resultam nos mais diversos percentuais de perda de eficiência (Sarver et al., 2013).

A dificuldade em estabelecer modelos e parâmetros para o impacto da sujidade no desempenho dos módulos muitas vezes reside na interdependência dos fatores como esquematizado na Figura 8 por Maghami et al. (2016).

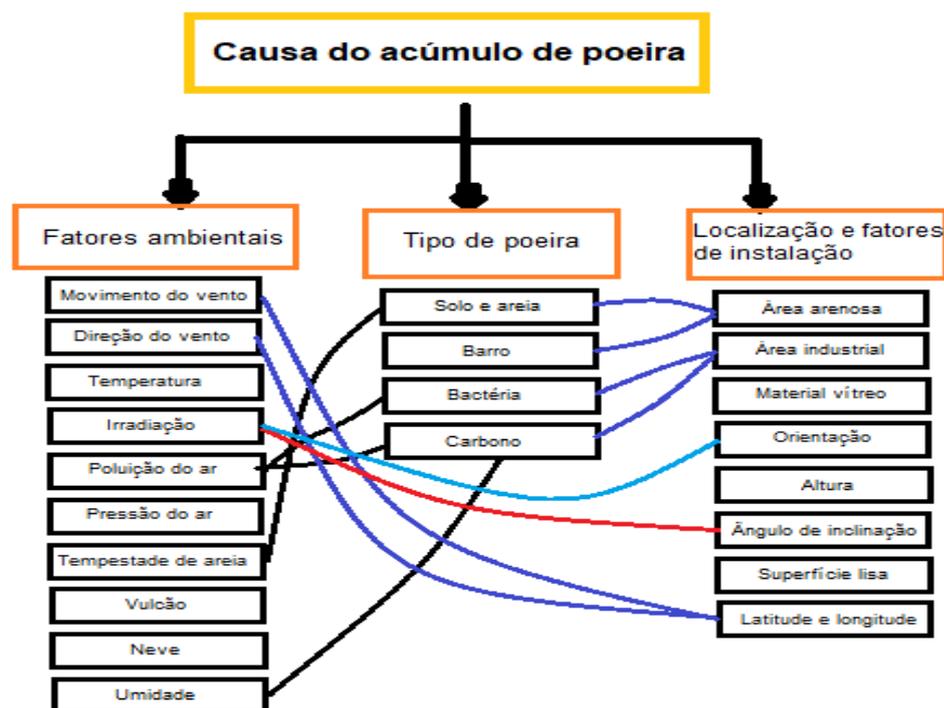


Figura 8: Variantes no acúmulo de poeira na superfície dos módulos. Fonte: Maghami et al. (2016)

Entre os fatores responsáveis pelas variações na deposição da poeira, a localização geográfica atrelada ao clima tem grande influência. De acordo com estudo do padrão de deposição ao redor do mundo (Ghazi et al., 2014), o Oriente Médio e o norte da África,

destacados na Figura 9 em azul escuro, são as zonas que registram o maior acúmulo de poeira.

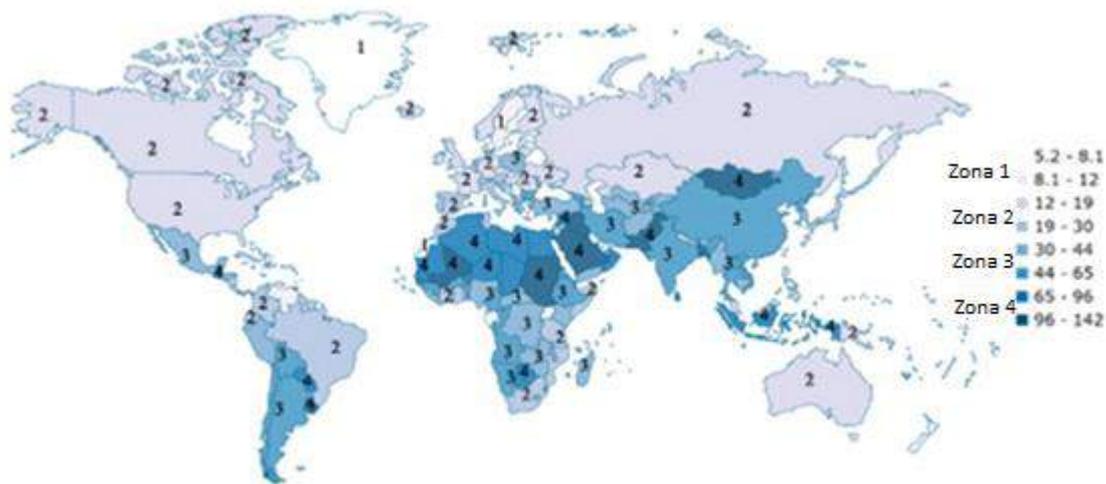


Figura 9: Intensidade de deposição de poeira ao redor do mundo.

Fonte: Adaptado de Maghami et al. (2016).

Poucas horas de exposição nessas regiões resultam em uma redução no desempenho equivalente à meses de exposição nas regiões mais temperadas ou tropicais. Essa observação é exemplificada na Figura 10, através de uma comparação realizada pelo desempenho típico em função do tempo de exposição de módulos dispostos em Omã e Egito, no Oriente Médio, e em Chicago, Estados Unidos. Segundo El-Nashar (2003), locais áridos e com tempestades de areia são ainda mais afetados pela quantidade de material depositado somado à escassez de água para limpeza. A localização geográfica interfere também nas características do material depositado, como será visto adiante.

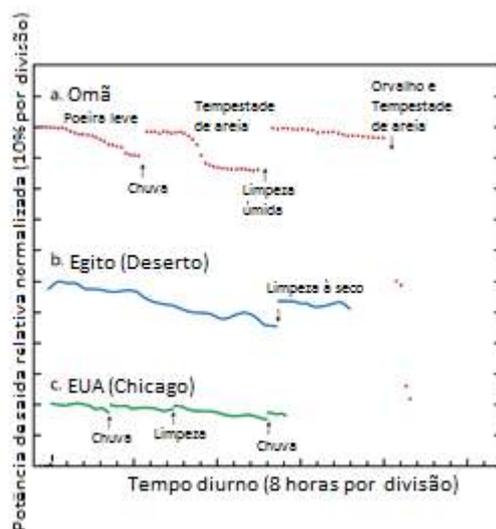


Figura 10: Comparação do desempenho típico de módulos fotovoltaicos em várias condições em função do tempo para três localidades, duas no Oriente Médio (Omã e Egito) e nos Estados Unidos.

*Fonte: Kazmerski et al. (2016).*

Diretamente relacionados à localização da usina, o regime de chuvas e as estações do ano também impactam na deposição. Maiores efeitos da poeira no desempenho de módulos tem sido observados em períodos de seca (Schill et al., 2015), principalmente em locais em que este coincide com o verão, época de maior geração de energia (Kimber et al., 2006). No inverno, devido à maior densidade do ar, maiores índices de poluição tem sido observados, impactando negativamente na geração. No outono, os ventos típicos espalham a poluição, reduzindo o problema. Na primavera e no verão, as chuvas removem parte do material depositado nos módulos, especialmente para módulos mais inclinados (Asl-Soleimani et al., 2001).

Além da localização geográfica e da época do ano, as características da planta podem aumentar ou diminuir a deposição da poeira e, conseqüentemente, a geração de energia. Módulos com inclinações muito pequenas têm apresentado maiores perdas de eficiência quando comparados à módulos mais inclinados (Mejia & Kleissl, 2013; Said & Walwil, 2014). De acordo com Elminir et al. (2006), Figura 11, os módulos mais inclinados apresentaram menores densidades de poeira depositada, em todas as orientações. Isso porque as partículas tendem a rolar ou cair da superfície em função da inclinação. Ainda de acordo com Elminir et al. (2006), diferentes orientações resultaram em diferentes densidades de poeira depositada para uma mesma inclinação. A prevalência dos ventos nordeste na região desse estudo coincidiu com a localização das cimenteiras, carregando emissões dessas indústrias até os módulos e em maior quantidade para aqueles orientados à nordeste. A influência da direção e a velocidade dos ventos na sedimentação de poeira sobre os módulos também foi observada. De acordo com estudos realizados por Goossens et al. (1993) no deserto do Neguev (Israel) e em túneis de vento por Goossens e Kerschaefer (1999), ventos com maiores velocidades para maiores concentrações de poeira suspensa na atmosfera resultaram em valores maiores de densidade de poeira depositada.

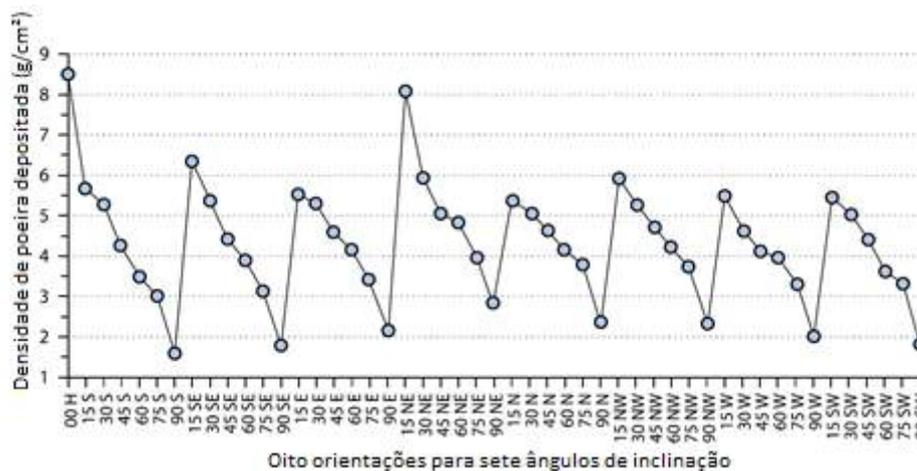


Figura 11: Quantidade de poeira acumulada em amostras em oito orientações diferentes para sete ângulos de inclinação em uma região árida. Fonte: Elminir et al. (2006).

O tipo de célula também deve ser considerado. Células de filmes finos apresentaram maiores reduções no desempenho pela poeira quando comparadas com células de silício mono cristalino (Ferrada et al., 2015). Recobrimentos de acrílico e de policloreto de vinila apresentaram maiores reduções de transmitância que os recobrimentos de vidros, fato atribuído à rugosidade do polímero e à possibilidade da penetração da poeira na superfície polimérica (Garg, 1974, Nahar & Gupta, 1990).

As características do particulado tem efeito considerável na dispersão desse material sobre os módulos. A natureza das partículas depositadas varia com a localização geográfica. Estudos da composição da poeira no Oriente Médio e no norte da África tem reportado composições baseadas em silício e cálcio, provenientes da areia do deserto e da calcita, respectivamente. Outros elementos provenientes de emissões locais também foram encontrados em menores quantidades (Elminir et al., 2006, Kazem et al., 2016, Kazmerski et al., 2016). Poeira coletada na superfície de módulos fotovoltaicos em Helwan, Egito, analisada por Espectroscopia Dispersiva em Energia (EDS), era composta por materiais relacionados ao cimento (silício, cálcio, alumínio e ferro), provenientes de indústrias locais no Cairo e vizinhança. Quantidades consideráveis de cloro e sódio foram encontradas nas regiões próximas ao Mar Mediterrâneo e ao Golfo da Pérsia (Elminir et al., 2006).

Matéria orgânica como pólen e fibras vegetais foram coletadas em regiões tipicamente agrícolas em Leuven (Bélgica) e em Sonora (México) (Appels et al., 2013, Cabanillas & Munguía, 2011). Em Sonora, foi reportada a presença de fuligem na composição da poeira. De acordo com Sarver et al. (2013), tanto matéria orgânica urbana

quanto rural depositadas nos módulos contribuem para intensificar a fixação das partículas na superfície.

Características como tamanho e morfologia da partícula, carga elétrica e composição química estão correlacionadas com a degradação do desempenho de células fotovoltaicas, de acordo com El-Shoboksky & Hussein (1993). Nesse estudo realizado em laboratório, foram utilizadas cinco variedades de poeira artificial baseadas nos particulados frequentemente encontrados na atmosfera como cimento e calcário, de três granulometrias diferentes, e partículas carbonosas (Figura 12). Partículas menores apresentaram maiores efeitos no desempenho dos módulos porque se espalham mais facilmente nos painéis de forma mais uniforme, reduzindo os vazios entre os grãos que permitiriam a passagem da luz. Foi observado por Goossens & Kerschaefer (1999) que as partículas mais finas causam danos irreversíveis ao interagir com o revestimento anti-reflexivo dos módulos. Partículas carbonosas impactaram mais na geração de energia não apenas pelo tamanho menor das partículas, mas também porque elas absorvem radiação solar mais facilmente que outros tipos de poeira comparados, afetando desse modo, não apenas a quantidade de luz que chega ao interior da célula, mas também a temperatura dos módulos (El-Shoboksky & Hussein, 1993).

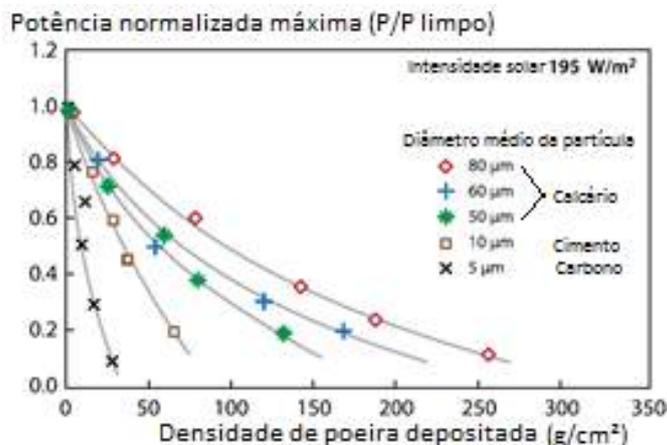


Figura 12: Potência de saída normalizada máxima para diferentes classes de particulado em função da densidade de poeira depositada. Fonte: El-Shoboksky & Hussein (1993).

Além das variações em função das características do material depositado, as características da radiação incidente também interferem no impacto da poeira nos módulos fotovoltaicos. Mailutha et al. (1994), em um estudo realizado em condições controladas e artificiais, verificaram que, com o aumento da irradiância, a degradação do desempenho fotovoltaico em função da camada de poeira depositada diminuiu. Para irradiâncias maiores como 700 W/m<sup>2</sup>, foram observadas menores reduções na potência

de saída, enquanto para irradiâncias menores, como  $400 \text{ W/m}^2$ , a redução devido ao material depositado chegou a 25% (Figura 13).

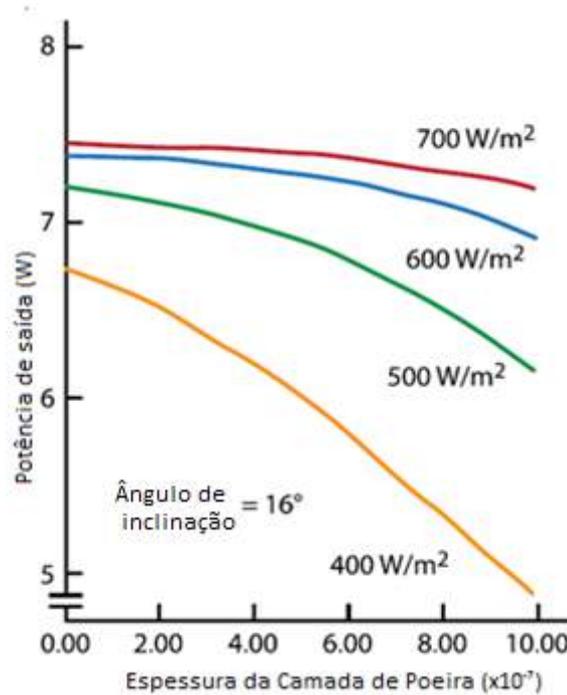


Figura 13: Degradação da potência de saída (W) para várias irradiâncias solares em função da espessura da camada de poeira. Fonte: Mailutha et al. (1994).

### 3.3.2 Sombreamentos e o Impacto na Resposta elétrica dos módulos

Existem dois tipos de sombreamento causados por sujidades: sombreamento intenso e sombreamento leve. Sombreamentos intensos ocorrem quando sólidos, como, por exemplo, poeira acumulada ou fezes de pássaros, bloqueiam a passagem da luz solar criando sombras com contornos bem definidos. Sombreamentos leves ocorrem quando partículas suspensas na atmosfera ou poeira dispersa na superfície dos módulos reduzem a intensidade global da irradiância solar a ser absorvida pelas células solares (Maghami et al., 2016).

Cada um desses dois tipos de sujidade provoca efeitos diversos no desempenho dos módulos, como mostrado na Figura 14. Para os sombreamentos leves, devido à redução da irradiância absorvida, a corrente gerada é afetada, enquanto a voltagem permanece a mesma. Para sombreamentos intensos, o impacto varia se o sombreamento ocorre em apenas algumas células do módulo ou se em todas. Quando o sombreamento do módulo é total, nenhuma energia é produzida. Já o sombreamento parcial causa uma

queda na voltagem dos módulos, mas como as células não sombreadas recebem a luz solar normalmente, a corrente é mantida constante (Maghami et al., 2016).

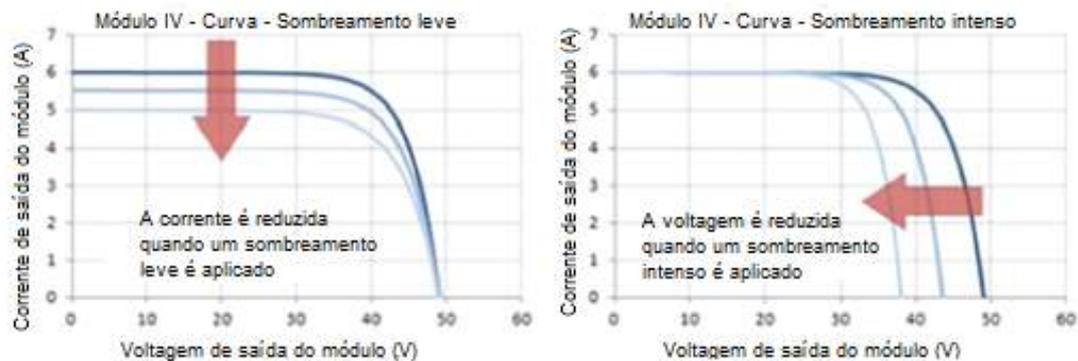


Figura 14: Corrente produzida em função da voltagem aplicada em condições de sombreamento leve e em sombreamento intenso. Fonte: Maghami et al. (2016).

Além disso, quando as sujidades cobrem parcialmente os módulos, as células sombreadas funcionam como uma resistência para a corrente gerada pelas outras células, causando o aquecimento que pode inclusive danificar o módulo. Para minimizar a formação dos chamados pontos quentes utilizam-se diodos para *by-pass*. Assim, a corrente gerada pelas células não sombreadas passa pelo *by-pass* ao invés de passar pelas células inativas da *string* (conjunto de células em série).

### 3.3.3 Fundamentos do acúmulo de partículas na superfície

Segundo Sarver et al. (2013), o processo de acúmulo de material na superfície é dividido em quatro etapas: (1) Sedimentação da poeira na superfície; (2) Adesão primária; (3) Adesão secundária; (4) Alterações nas condições (chuvas, limpezas, contaminação).

O comportamento aerodinâmico da sedimentação é diretamente influenciado por efeitos que dependem das características do particulado. Partículas maiores são afetadas pela gravidade e inércia, enquanto partículas menores estão mais propensas às forças de interação com outras partículas (Sarver et al., 2013). Embora muito tenha sido estudado sobre a deposição, a relação entre a composição do material suspenso na atmosfera local e do material depositado na superfície ainda não é completamente entendida. Diferenças entre as concentrações suspensas e na superfície tem sido relatadas (Yahya e Sambo, 1991).

A adesão do material sedimentado está diretamente relacionada às características da própria superfície como: composição química, morfologia, condutividade, carga, propriedades óticas, dureza, temperatura, entre outras. A cementação de sais solúveis em

água, deposição de materiais orgânicos, tensão superficial e a interação entre as partículas são alguns dos mecanismos de adesão de sujidades. A cementação de sais solúveis é intensificada em locais de grandes variações de temperatura somado à alta umidade, resultando na precipitação de orvalho pela manhã. Nessas condições, particulados com sais solúveis formam uma gota que retém a porção insolúvel do particulado. A medida em que a água dessa gota vai evaporando, forma-se uma base fixa para o particulado, como mostrado na Figura 15. As camadas de sais dissolvidos e, posteriormente, recristalizados, ficam espessas demais para serem dissolvidas e removidas pela chuva (Cuddihy, 1980). Elminir et al. (2006) obtiveram uma imagem dessa camada de minerais depositados em uma amostra de vidro, como mostrado na Figura 16.

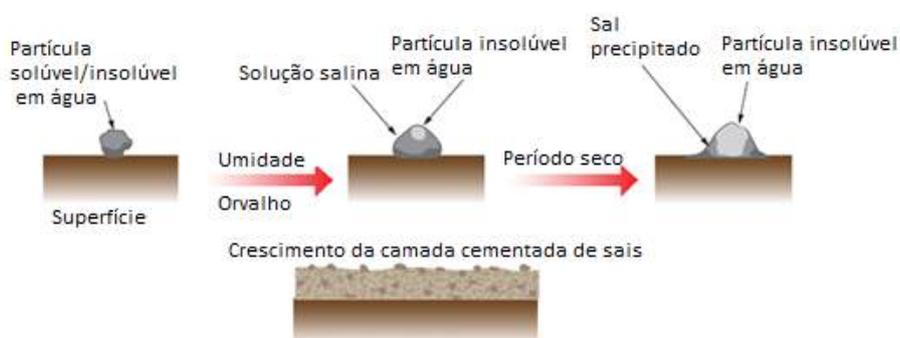


Figura 15: Processo de cementação de particulado por umidade. Fonte: Cuddihy (1980).

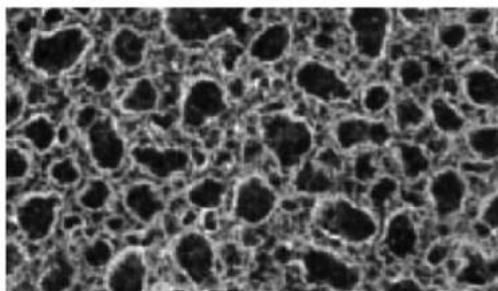


Figura 16: Camada de minerais depositados visível. Fonte: Elminir et al. (2006).

A adesão secundária é o fortalecimento da ligação que pode ocorrer por condensação e/ou reações químicas entre o material particulado e a superfície. Dessa forma, a limpeza se torna ainda mais complicada. Alterações no processo de acúmulo e no próprio material acumulado ocorrem com o tempo, com as mudanças nas condições climáticas, no nível de umidade e, inclusive, quando a superfície é submetida à limpeza (Sarver et al., 2013).

### 3.3.4 Estratégias para mitigação do problema

Entender mais a fundo o comportamento e os mecanismos de deposição de material na superfície dos módulos é fundamental para criar estratégias de mitigação do problema. Diferentes abordagens vêm sendo estudadas tanto para remover o material já aderido (restauração) quanto para evitar a deposição e aderência de poeira (prevenção). Limpezas para retirar a poeira depositada podem incluir a utilização de grandes quantidades de água, soluções detergentes, panos para limpeza à seco e ou jatos de ar. A boa periodicidade dessas limpezas pode evitar a formação de ligações químicas e mecânicas entre o particulado e a superfície ou, através de agentes químicos, quebrar as ligações já formadas. Deve-se tomar cuidado para não danificar a superfície ao realizar a limpeza. Medidas para reduzir o impacto dessas atividades de manutenção no meio ambiente incluem a coleta e o reaproveitamento da água utilizada para outros fins. As ações de prevenção incluem tanto o projeto da planta para evitar que grandes quantidades de poeira sejam depositadas quanto a modificação de superfícies para retardar o estabelecimento de ligações químicas/mecânicas e facilitar a limpeza (Sarver et al., 2013).

Medidas de prevenção como a modificação de superfícies com caráter auto-limpante apresentam grande potencial e, por isso, tem despertado interesse de pesquisadores ao redor do mundo (Liu et al., 2017, Mehmood et al., 2016, Ota et al., 2016, Vuellers et al., 2016). Esses estudos procuram desenvolver revestimentos auto-limpantes, em sua maioria de caráter hidrofóbico, resistentes à temperaturas elevadas, à radiação ultravioleta e infravermelho, resistentes ao atrito, com excelentes propriedades ópticas e boa durabilidade.

## 4. Metodologia

### 4.1 Descrição do estádio

A planta de geração utilizada nesse estudo pertence à “Cemig Geração e Transmissão S.A.” e está situada no teto do Estádio de Futebol Governador Magalhães Pinto, popularmente conhecido como Mineirão, com coordenadas 19°51’57”S, 43°58’15”W. O estádio, inaugurado em 5 de setembro de 1965, foi projetado pelo famoso arquiteto Oscar Niemeyer e faz parte do conjunto arquitetônico e paisagístico da Pampulha, tombado como patrimônio cultural pelo IPHAN desde 1994 (Portal IPHAN, 2015). A partir de 2011, o Mineirão foi reformado para receber a Copa do Mundo FIFA 2014 e algumas partidas de futebol dos Jogos Olímpicos 2016.

A revitalização foi importante para adequar o estádio aos requisitos de segurança e conforto, e garantiu o reconhecimento do estádio pelas iniciativas sustentáveis colocadas em prática durante a reforma. O Mineirão é o único estádio do país a receber o selo Platinum do *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED). Esse selo é concedido pelo *U.S Green Building Council*, órgão internacional responsável por certificar e incentivar a transformação de projetos, obra e operação da edificação de forma sustentável em mais de 140 países. Para conceder o selo são avaliadas oito áreas e cada área tem pré-requisitos e recomendações que garantem pontos à medida que são atendidos. A categoria do selo a ser recebido depende da quantidade de pontos acumulados variando entre 40 e 110 pontos. Os selos podem ser de 4 categorias diferentes: Certificado, *Silver*, *Gold* e *Platinum* e esse sistema de classificação de construção verde é o mais utilizado no mundo com 1,85 milhões de metros quadrados de espaço de construção certificados (GGB, 2014).

O Mineirão alcançou uma pontuação alta em função das muitas medidas tomadas para garantir a sustentabilidade. Entre elas, o sistema de iluminação inteligente para o controle automático de intensidade da luminosidade das lâmpadas que permite uma economia de até 30% da energia consumida. O sistema de armazenamento de água da chuva para seu reaproveitamento em banheiros e na irrigação do gramado e o reaproveitamento de resíduos recicláveis pela parceria com uma associação de catadores de lixo de Belo Horizonte são também iniciativas colocadas em prática pelo estádio. E por fim, a construção da Usina Solar Fotovoltaica em parceria com a CEMIG para produzir parte da energia elétrica consumida pelo estádio colocou o Estádio Mineirão em uma posição de grande destaque em termos de sustentabilidade (Minas Arena, 2016).

## 4.2 Descrição da planta

A usina fotovoltaica Mineirão é composta por 5910 módulos fotovoltaicos de silício policristalino dispostos nos 88 setores do estádio, formando uma elipse como mostrado no Projeto da Usina (Figura 17). Os módulos fotovoltaicos tem 247,49 W de potência de pico cada e uma diferença de potencial elétrico máxima de 29,8 V. São 9500 m<sup>2</sup> cobertos por módulos fotovoltaicos, somando um total de 1,42 MWp em potência nominal e uma produção média de 1600 MWh/ano. Dos 88 setores, 42 deles tem 75 módulos, marcados em azul escuro na Figura 17, enquanto os outros 46 setores tem 60 módulos cada, marcados em azul claro.

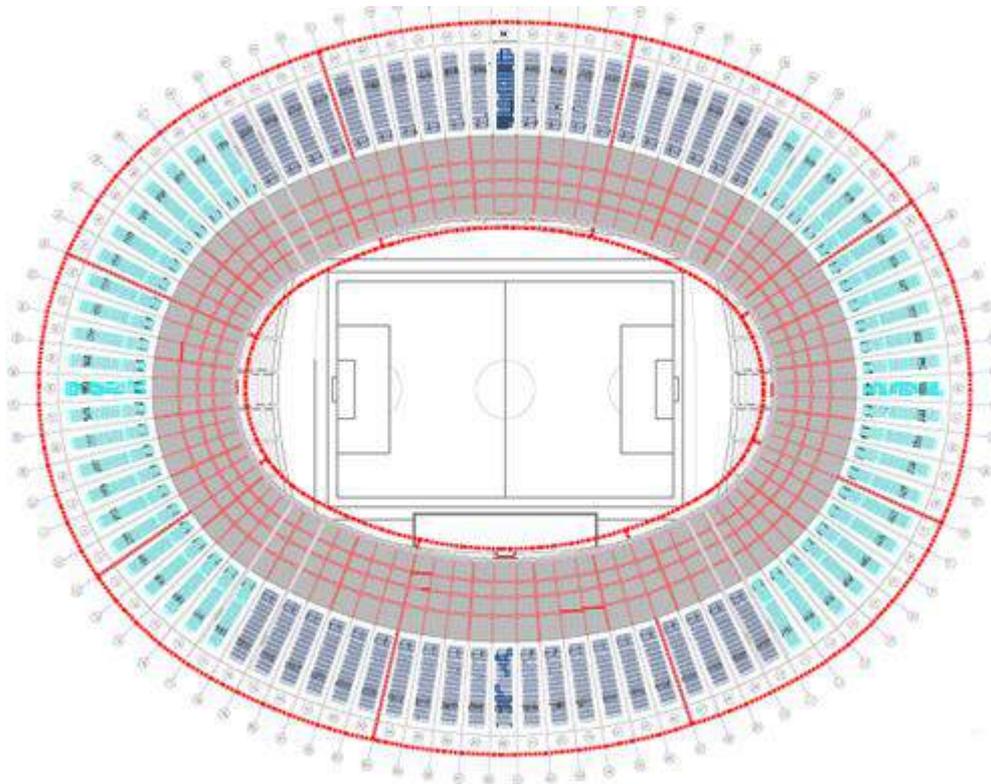


Figura 17: Planta Geral de Implantação da Usina. Fonte: CEMIG (2014).

Os setores maiores são divididos em sete *strings* e os menores em seis *strings*. Um *string* é um grupo de módulos conectados em série. Cada par ou trio de *string* é conectado à um inversor, totalizando três inversores por setor, denominados A, B e C (Figura 18). Devido à arquitetura complexa e a necessidade de manter a fachada inalterada, os módulos fotovoltaicos foram instalados em um ângulo menor que o recomendado, 8° ao invés de 19° 51', e mais próximos ao teto, o que reduz a geração de energia e intensifica o sombreamento pelas construções laterais (Figura 19). Dentre os três inversores, o inversor B, correspondente às *strings* centrais, é o menos afetado pelo sombreamento e por isso foi escolhido para ser acompanhado durante a análise. Assim, para

simplificações, sempre que os dados de um determinado setor for citado, estará implícito que são os dados provenientes do inversor B deste setor.

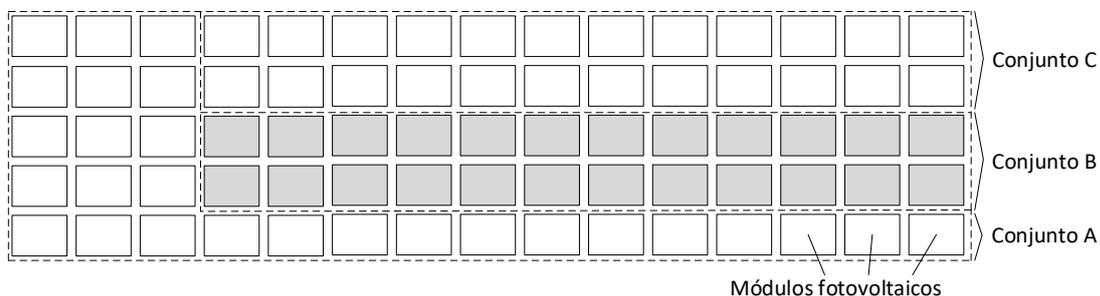


Figura 18: Esquema de strings e inversores com destaque para os módulos referentes ao inversor B.

Fonte: CEMIG (2014).



Figura 19: Módulos Fotovoltaicos da Usina Mineirão com destaque para as áreas sombreadas.

Fonte: Acervo CEMIG (2014).

#### 4.3 Descrição do estudo e coleta de dados

O estudo foi baseado no acompanhamento dos parâmetros de geração de módulos com poeira depositada e de módulos limpos, os últimos considerados como referência. A normalização é a razão entre os parâmetros de geração de módulos sujos sobre os de módulos limpos. Ao considerar a geração dos módulos limpos como a geração máxima nas condições do dia, essa razão fornece a eficiência dos módulos empoeirados e indiretamente o percentual da eficiência perdida em função da poeira depositada. Por se

tratar de um estudo em ambiente externo, não controlado, a normalização dos valores foi utilizada para possibilitar o estudo de um fator isolado, como o impacto da poeira mesmo que os demais fatores não possam ser controlados. Desse modo é possível observar a diferença entre a geração destes e de módulos sujos mesmo ao avaliar um conjunto de dias com características distintas de irradiação e temperatura.

Por 43 dias, dados de potência instantânea e de geração acumulada de energia foram coletados a cada 15 minutos pelos inversores e armazenados no sistema de dados da própria usina.

Dados meteorológicos, mais especificamente de irradiância instantânea, foram coletados a cada 15 minutos por dois piranômetros da estação meteorológica da própria Usina Fotovoltaica Mineirão, localizados próximos aos módulos do estudo.

Os dados de precipitação foram coletados pela Estação Meteorológica Automática da Pampulha A521, próxima ao estádio, disponibilizados no site do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

#### **4.4 Setores estudados**

Devido ao tamanho da Usina Fotovoltaica Mineirão, era inviável que o estudo abrangesse todos os 88 setores. Desse modo, foram escolhidos oito setores, divididos em dois grupos diametralmente opostos: quatro deles orientados a Nordeste (Grupo N – Setores 51, 52, 53 e 54 de coordenadas azimute 92, 95, 98 e 101°, respectivamente) e quatro deles orientados a Sudoeste (Grupo S – Setores 4, 5, 6 e 7 de coordenadas azimute 278, 281, 283 e 286°, respectivamente), como mostrado na Figura 20. A escolha desses setores foi realizada com base no histórico de geração, disponível no sistema de coleta e armazenamento de dados da própria usina. Foram selecionados para o grupo N, os setores vizinhos com maior geração acumulada desde o início da operação, e que portanto, além da melhor localização, eram também aqueles com menor histórico de problemas de funcionamento. Para o grupo S, foram analisados os valores de geração acumulada dos setores orientados na direção oposta ao grupo N, de modo que foram escolhidos nessa região aqueles com maior geração. Os grupos escolhidos são diametralmente opostos de modo a analisar também a influência da orientação na deposição de poeira. Dois setores, 6 (Grupo S) e 53 (Grupo N), foram escolhidos como setores de referência e mantidos limpos durante todo o estudo para a normalização dos valores de potência e energia gerada.

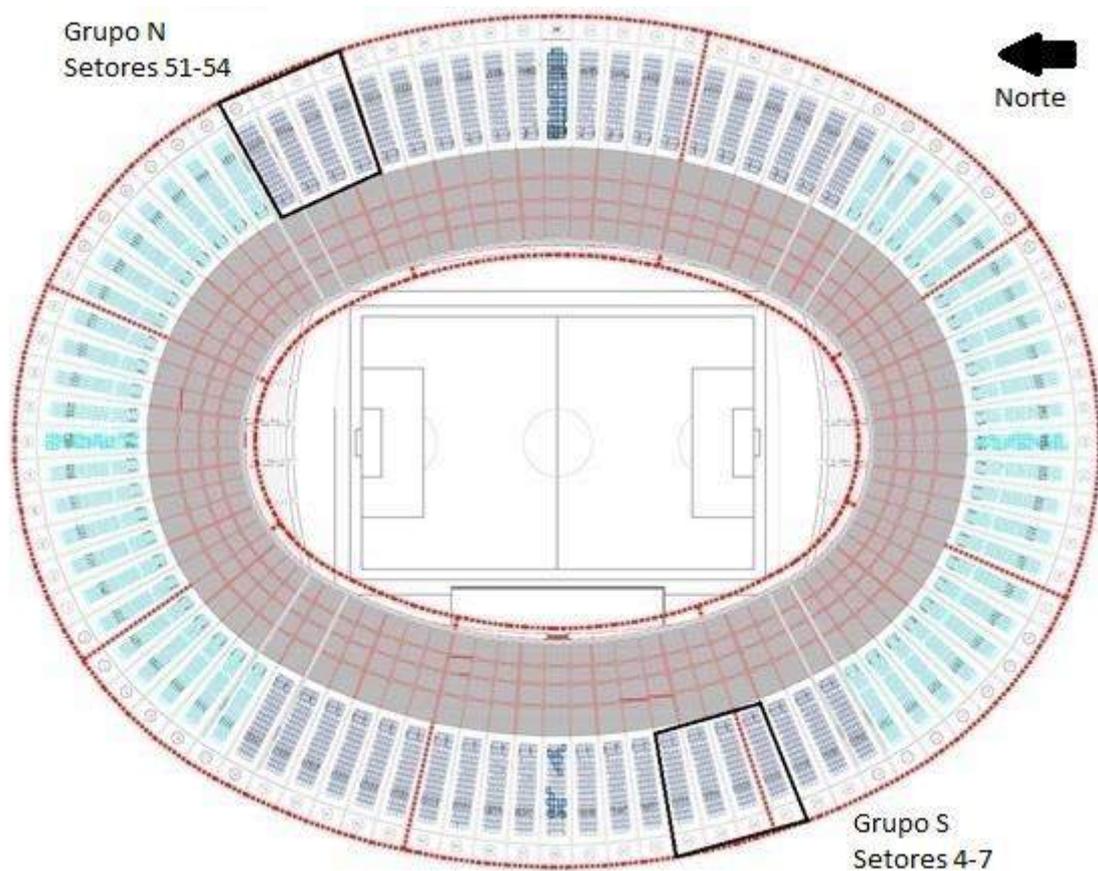


Figura 20: Grupos S e N escolhidos para o estudo. Fonte: Adaptado de CEMIG (2014)

#### 4.5 Normalização de valores

Os valores normalizados de potência de pico e de energia gerada diária foram calculados de acordo com as equações:

$$E_{i,norm} = E_i/E_{i,ref} \quad (1)$$

$$PP_{i,norm} = PP_i/PP_{i,ref} \quad (2)$$

Em que  $PP_{i,norm}$  é a potência de pico normalizada para o setor  $i$ ,  $PP_i$  é a potência de pico absoluta do setor  $i$  e  $PP_{i,ref}$  é a potência de pico absoluta de referência para o grupo ao qual o setor  $i$  pertence. De modo semelhante,  $E_{i,norm}$  é a energia gerada diária normalizada pelo setor  $i$ ,  $E_i$  é a energia gerada diária absoluta pelo setor  $i$  e  $E_{i,ref}$  é a energia gerada diária absoluta de referência para o grupo ao qual o setor  $i$  pertence.

As perdas de potência absoluta e relativa causadas pela poeira para o dia 20 foram calculadas respectivamente através das equações (3) e (4).

$$P_{perdida,abs} = P_{limpo} - P_{sujo} \quad (3)$$

$$P_{perdida,relativa} = \frac{P_{limpo} - P_{sujo}}{P_{limpo}} \quad (4)$$

Em que  $P_{limpo}$  é a potência gerada pelo setores de referência e  $P_{sujo}$  é a potência gerada pelos setores sujos de poeira.

#### 4.6 Coleta do material depositado

Os módulos, instalados em 2013, não haviam sido limpos manualmente até o início desse estudo em agosto de 2016, como evidenciado pela camada de poeira visível na Figura 21. Para análise posterior, parte desse material depositado foi coletado da superfície de alguns módulos com auxílio de uma pá e uma vassoura e armazenados em sacos plásticos.



Figura 21: Comparação visual entre módulos limpos e sujos.

#### 4.7 Análise do material coletado

A composição elementar do material coletado foi obtida por Fluorescência de raios-X, usando-se o equipamento Philips PW-2400. Através da Difração de raios-X, usando-se o equipamento Pananalytical Empyrean, o particulado foi caracterizado em

função dos compostos cristalinos presentes. A distribuição granulométrica foi obtida por análise de difração a laser no equipamento comercial Sympatec Helos. O tamanho e o formato das partículas foram analisados por Microscopia Eletrônica de Varredura, utilizando o equipamento JEOL JSM-6360 LV, acoplado à um equipamento de Espectroscopia Dispersiva em Energia.

#### 4.8 Limpeza dos setores

A limpeza dos módulos foi realizada com água desmineralizada e a superfície foi esfregada com uma vassoura própria de cerdas macias. Após remover as partículas aderidas, mais água desmineralizada foi vertida para garantir a limpeza e o excesso foi retirado com auxílio de um rodo. Essa limpeza foi repetida com frequência até o fim do estudo garantindo que esses setores estivessem sempre limpos, como ilustrado na Figura 21.

Além da limpeza dos setores de referência, os setores 7 e 52 foram limpos duas vezes em um intervalo de uma semana, a partir do dia 30, com os procedimentos descritos anteriormente, e acompanhados até o fim do estudo.

A Tabela 1 esquematiza o cronograma de limpezas realizadas durante o estudo com destaque para o principal evento de precipitação observado.

*Tabela 1: Cronograma de limpezas do trabalho realizado.*

<b>1.</b> Limpeza Set. 6, 53.	<b>12.</b>	<b>23.</b> Chuva.	<b>34.</b>
<b>2.</b>	<b>13.</b>	<b>24.</b>	<b>35.</b>
<b>3.</b> Limpeza Set. 6, 53.	<b>14.</b>	<b>25.</b>	<b>36.</b>
<b>4.</b>	<b>15.</b> Limpeza Set. 6, 53.	<b>26.</b>	<b>37.</b> Limp. Set. 6, 7, 52, 53.
<b>5.</b>	<b>16.</b>	<b>27.</b>	<b>38.</b>
<b>6.</b>	<b>17.</b> Limpeza Set. 6, 53.	<b>28.</b>	<b>39.</b>
<b>7.</b>	<b>18.</b>	<b>29.</b>	<b>40.</b>
<b>8.</b>	<b>19.</b>	<b>30.</b> Limp. Set. 6, 7, 52, 53.	<b>41.</b>
<b>9.</b>	<b>20.</b>	<b>31.</b>	<b>42.</b>
<b>10.</b> Limpeza Set. 6, 53.	<b>21.</b>	<b>32.</b>	<b>43.</b>
<b>11.</b>	<b>22.</b> Limpeza Set. 6, 53.	<b>33.</b>	

#### **4.9 Eventos de precipitação**

O estudo começou no final do inverno e continuou até as primeiras semanas da primavera. Desse modo, foi possível estudar tanto o período mais crítico, que é o mais seco, como o efeito das primeiras chuvas.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1 Dados de irradiância solar

Irradiância solar, também conhecida como intensidade solar, é definida como o fluxo de energia que atravessa uma superfície por unidade de área ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Os dados de irradiância solar coletados pelos dois piranômetros próximos aos setores utilizados no estudo foram analisados e as observações são listadas a seguir.

O perfil diário de irradiância instantânea segue um mesmo padrão para dias com pouca ou nenhuma nebulosidade como o dia 17 retratado na Figura 22a. Os níveis de irradiância solar na superfície partem do zero antes do amanhecer (entre 6:00 e 6:30) e aumentam no decorrer do dia, alcançando valores máximos próximo ao meio dia. Ao entardecer, os níveis de irradiância são reduzidos até atingir o zero novamente (entre 17:30 e 18:30). Para dias nublados, como o dia 13, cujo perfil diário de irradiância é retratado na Figura 22b, a irradiância fica inconstante em virtude da passagem de nuvens entre o piranômetros e o sol. A Figura 22 retrata também a similaridade entre o perfil de irradiância dos dois grupos. O deslocamento da curva do Grupo S para a direita, esperado em função do movimento do sol durante o inverno, é bem pequeno. Essa similaridade entre os grupos pode ser explicado pelo formato semi-esférico do piranômetro.

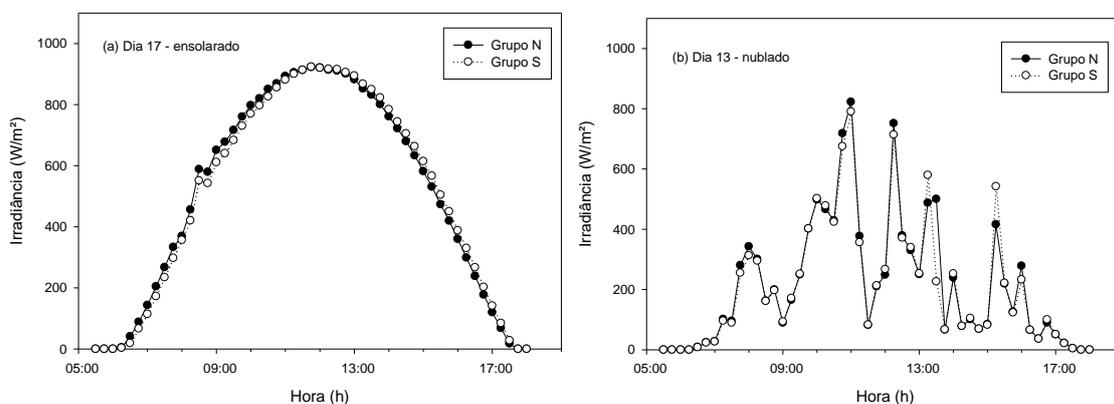


Figura 22: Perfil diário de irradiância para o dia 17 (ensolarado) (a) e o dia 13 (nublado) (b).

As irradiâncias de pico diárias, isto é, os valores máximos de irradiância observada por dia, são apresentadas na Figura 23. O valor médio para a irradiância de pico foi de  $900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , não apresentando uma diferença significativa entre os dois grupos. Como o estudo foi realizado no final do inverno e início da primavera, já era esperado que a irradiância de pico diária apresentasse uma tendência crescente com a aproximação do verão.

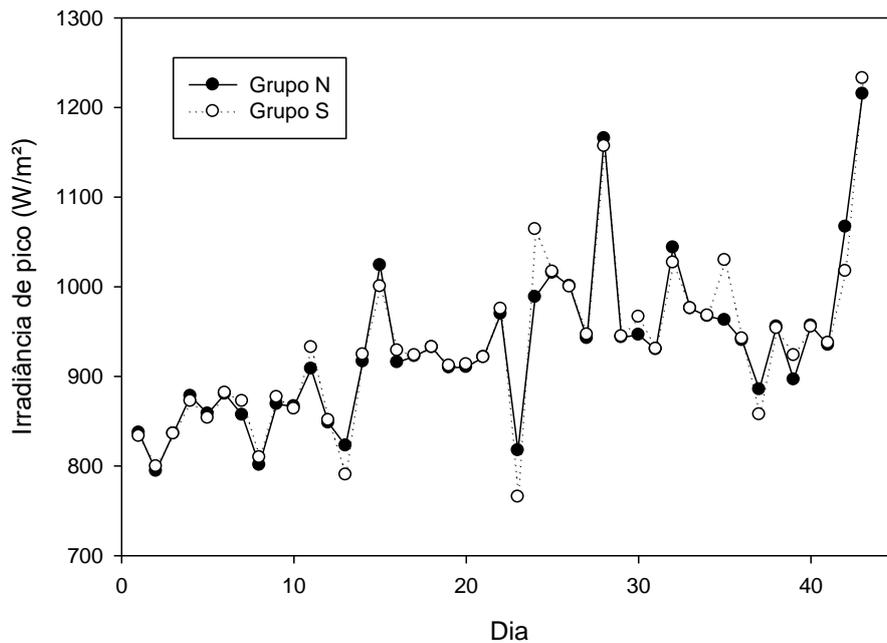


Figura 23: Irradiâncias de pico durante os 43 dias do estudo para os dois grupos.

A radiação solar total diária foi obtida através da integração numérica da irradiância instantânea pelo método 1/3 de Simpson. Os valores obtidos para os dois grupos N e S estão plotados no gráfico na Figura 24. A radiação solar total diária está diretamente relacionada aos níveis de precipitação e nebulosidade. Os dias com menores valores de radiação diária foram dias com céu nublado e com precipitação, como por exemplo no dia 8 e 23, que apresentaram valores bem mais baixos quando comparados aos demais. O valor médio observado de radiação solar total diária para o Grupo N foi de  $5,66 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  e para o Grupo S de  $5,69 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ . Esses valores são próximos ao citado no Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais volume II (Reis e Tiba, 2016). De acordo com o atlas, para os meses de agosto e setembro de 2016, a média de radiação solar total diária para a região de Belo Horizonte foi de 5,3 e  $5,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}/\text{dia}$ , respectivamente.

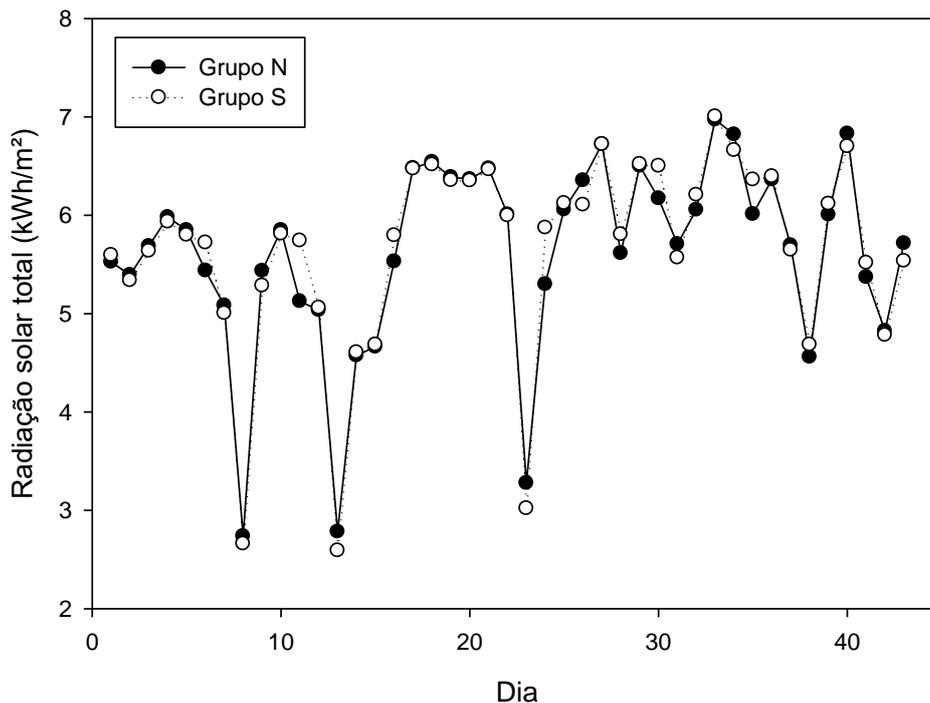


Figura 24: Radiação solar total diária durante os 43 dias do estudo para os dois grupos.

Para contabilização do período diário de incidência solar nos módulos, isto é, a insolação diária, considerou-se o início e o fim deste como a primeira e a última medida de irradiância solar maior ou igual a  $1 \text{ W.m}^{-2}$ , respectivamente. O valor médio da insolação diária nos 43 dias para o Grupo N foi de 11 h e 24 min e para o Grupo S foi de 11 h e 20 min. No início do estudo, a insolação era de 11 h enquanto ao final do estudo o número de horas com brilho solar cresceu para 11 h e 45 min. Essa tendência crescente, também observada na irradiância de pico e na radiação solar total, ocorre devido ao movimento de translação da Terra. O período de luminosidade solar diária fica maior com a aproximação do verão no hemisfério sul. No entanto, essa variação não é tão drástica quando comparada àquela ocorrida em países próximos aos polos geográficos.

## 5.2 Dados de precipitação

Dados de precipitação durante o período da pesquisa foram obtidos através do site do INMET – Instituto Nacional Meteorológico e estão plotados na Figura 25. O evento chuvoso mais significativo ocorreu no dia 23 do estudo, sendo uma precipitação de aproximadamente 7 mm de água. Desse modo, a influência da poeira depositada no desempenho dos módulos fotovoltaicos foi separada em antes e após essa precipitação.

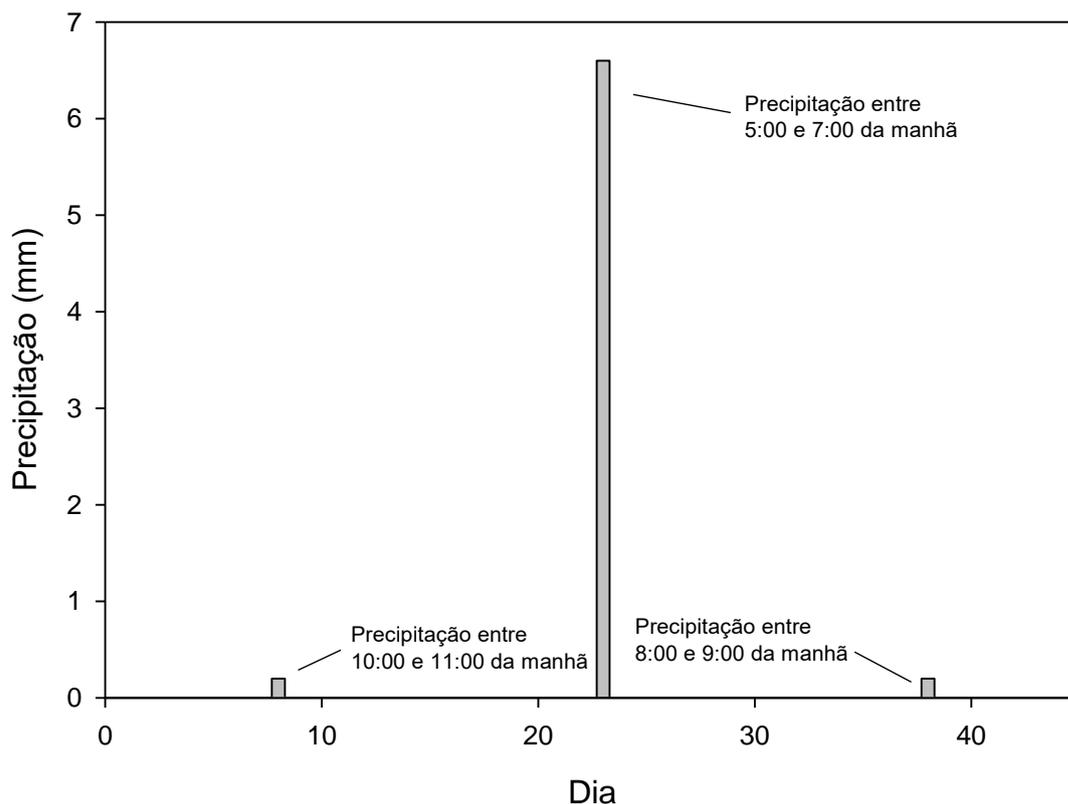


Figura 25: Dados de precipitação coletados da Estação Meteorológica Pampulha – INMET.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia.

### 5.3 Acompanhamento do desempenho dos módulos

O principal evento de precipitação separou os dados de potência instantânea e energia gerada acumulada dos setores 4, 5, 51 e 52, que não foram limpos manualmente, em dois períodos bem distintos: antes e após a chuva. Enquanto os dados dos setores 7 e 53 foram divididos em três períodos: antes da chuva, após a chuva e após a limpeza. Já os setores 6 e 53 não sofreram influência da chuva já que eram setores de referência, e portanto foram mantidos constantemente limpos.

Como a orientação dos módulos influencia significativamente a potência produzida, os grupos N e S foram analisados separadamente e os resultados foram comparados posteriormente.

Como os testes foram conduzidos em uma planta real em funcionamento, nem os módulos de teste nem os módulos de referência estão em um ambiente controlado e todos os módulos estão sujeitos aos efeitos de degradação como degradação induzida por potencial e o rompimento das células, bem como estão sujeitos ao sombreamento. Esses

efeitos poderiam levar à uma distorção dos valores normalizados se os módulos de teste apresentassem degradações maiores que os módulos de referência, ou o contrário.

Em um ambiente totalmente controlado, módulos após a limpeza deveriam apresentar valores normalizados iguais a 1, tanto para a potência de pico quanto para a energia gerada. Nesse trabalho, como será mostrado a seguir, potências de pico normalizadas para módulos limpos estão entre 0,98 e 1,02, enquanto valores normalizados de energia gerada estão entre 0,95 e 1,05. Esses resultados sugerem que os módulos de teste e os módulos de referência não apresentaram efeitos de degradação significativamente diferentes e corroboram a ideia de que o método de valores normalizados é razoável para a avaliação do efeito da poeira no desempenho dos módulos fotovoltaicos nesse trabalho.

### **5.3.1 Análise da potência de saída**

#### **5.3.1.1 Potência instantânea**

A Figura 26 apresenta o perfil diário de potência instantânea em um dia ensolarado (dia 17) para dois setores de cada um dos grupos (Grupo N – Figura 26a e Grupo S – Figura 26b), sendo os setores de referência 6 e 53 e setores cobertos de poeira 7 e 52. A Figura 26 também apresenta o perfil de irradiância instantânea para esse dia. Fica claro o impacto direto da irradiância na potência de saída dos módulos. Além disso, percebe-se claramente a diferença de quase 1 kW na potência de saída entre módulos sujos, que tem sempre valores menores de potência, e módulos limpos. Ao comparar o comportamento dos dois grupos para esse dia percebe-se que o grupo N alcançou potências ligeiramente maiores tanto para os setores limpos quanto para os setores sujos.

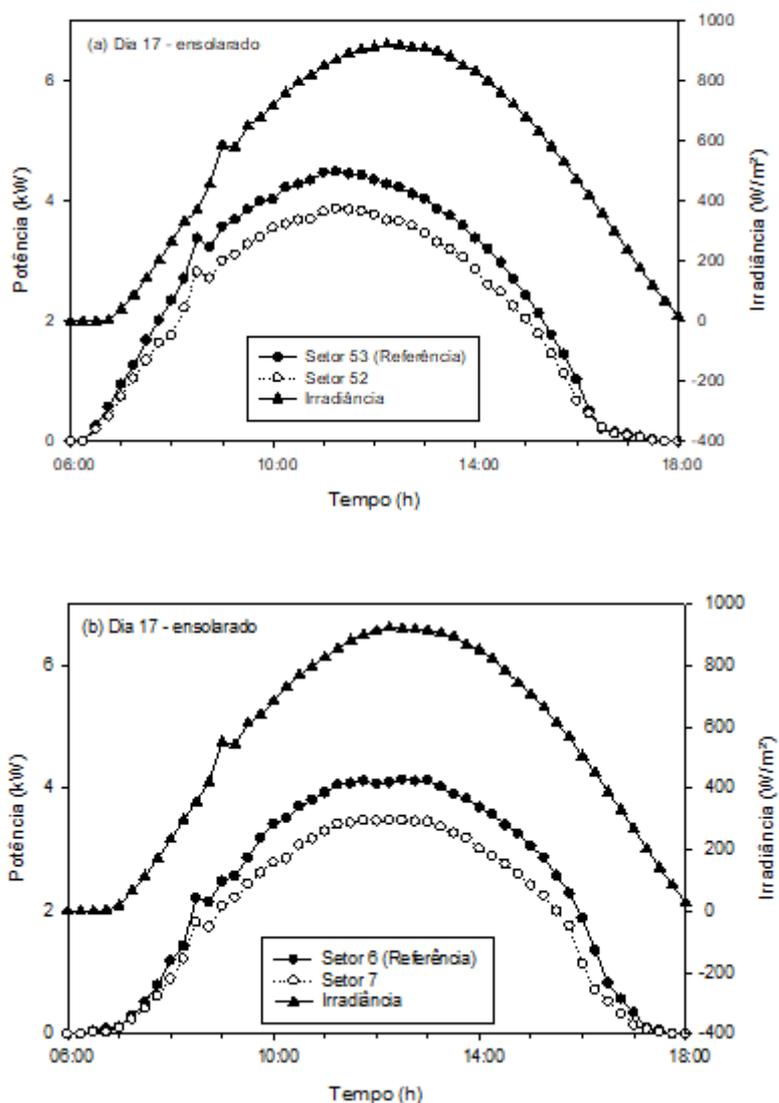


Figura 26: Perfil diário de potência para o dia 17 (ensolarado) – Grupo N (a), Grupo S (b)

A Figura 27 apresenta o perfil diário de potência instantânea dos mesmos setores apresentados na Figura 26, mas em um dia nublado. Percebe-se que a cobertura de nuvens no céu muda completamente o perfil de potência. Além disso, a redução na potência em função da poeira depositada (diferença entre os módulos limpos e módulos sujos) em dias nublados é menor que a redução em dias ensolarados. Esse resultado sugere que a quantidade de energia perdida é maior para irradiâncias maiores, tais como aquelas observadas em dias ensolarados.

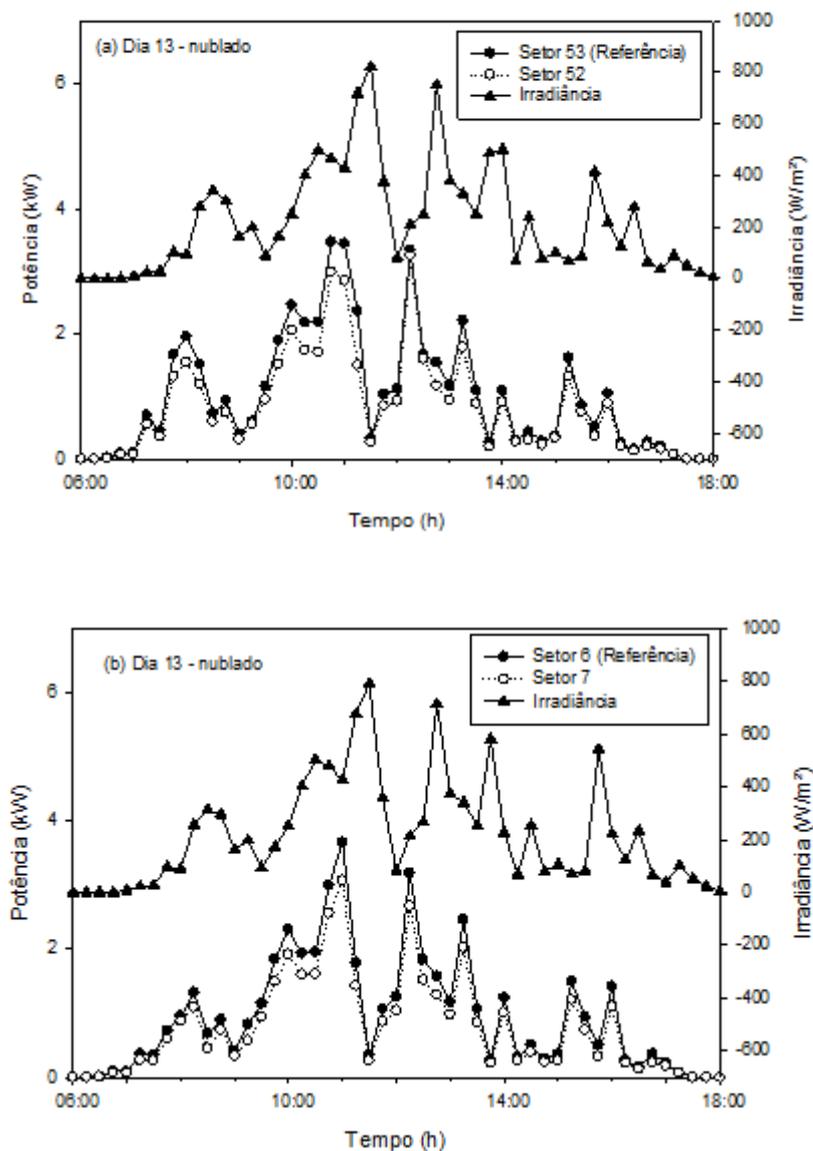


Figura 27: Perfil diário de potência para o dia 13 (nublado) – Grupo N (a), Grupo S (b)

A Figura 28 mostra a perda de potência absoluta e relativa em função do tempo do setor 7 no dia 20. Pode-se observar que a maior perda de potência absoluta ocorre entre 10:00 e 16:00 h, período de maior geração de energia. Confirmando assim, a suspeita levantada anteriormente de que a perda de potência em função da poeira é maior para potências maiores e indiretamente em dias ensolarados. Nessas seis horas, a média de perda de potência foi de aproximadamente 650 W, valor expressivo ao considerar que a potência de saída dos setor limpo ficou entre 3000 e 5000 W.

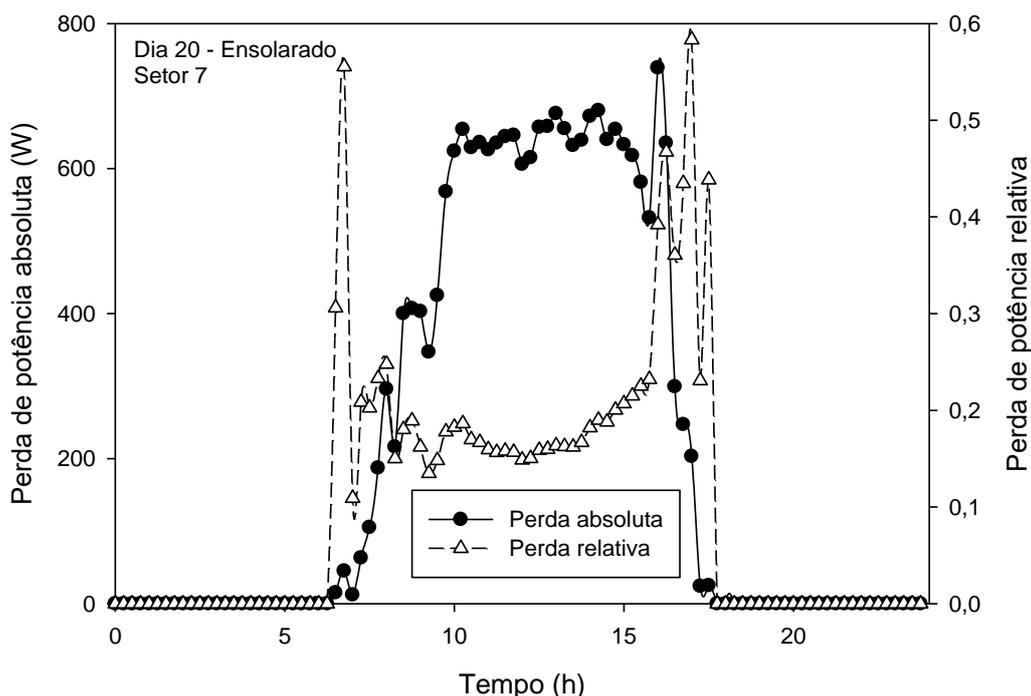


Figura 28: Perda de potência absoluta e relativa para o setor 7 (Grupo S) no dia 20 (ensolarado)

Já a curva da perda de potência relativa de 10:00 às 16:00 htem um formato parabólico com a perda mínima (15%) ocorrendo aproximadamente ao meio dia. Esse resultado está de acordo com os resultados reportados Mailuha et al (1994) e Wilson e Ross (1983) que verificaram que o efeito da poeira na perda relativa de potência é maior para irradiâncias solares menores. Em suma, como a potência de saída é maior para irradiâncias maiores, as perdas absolutas também são maiores. No entanto, nesse caso, o percentual de perda em função da potência de saída ideal (dos módulos limpos) é menor.

Os períodos de sol nascente ou poente, isto é, com baixíssimas irradiâncias, apresentam picos de perda de potência relativa (Figura 28). Como a perda relativa é uma razão entre dois termos muito pequenos nesses momentos, esses valores tem um nível de incerteza muito grande e efeitos paralelos como erros de sensores e sombreamentos podem mascarar a perda real causada pela poeira.

### 5.3.1.2 Potência de pico (PP)

A potência de pico de um módulo fotovoltaico é o valor máximo de potência alcançada no dia. Comparando a potência de pico do módulo sujo com a potência de pico do módulo limpo naquele mesmo instante é possível mensurar o impacto da poeira

depositada. A Figura 29 mostra a potência de pico diária dos setores 6, limpo, e 7, sujo, durante todo o estudo. Através desse gráfico, percebe-se claramente a diferença na geração em função da poeira. Entre o dia 1 e o dia 23, a redução média da potência de pico causada pela poeira depositada foi de 600 W. A chuva no início do dia 23 reduziu a perda de potência para aproximadamente 300 W, evidenciada pela proximidade das curvas no intervalo do dia 24 até o dia 29. No dia 30, a limpeza realizada no setor 7 praticamente eliminou a diferença entre as curvas.

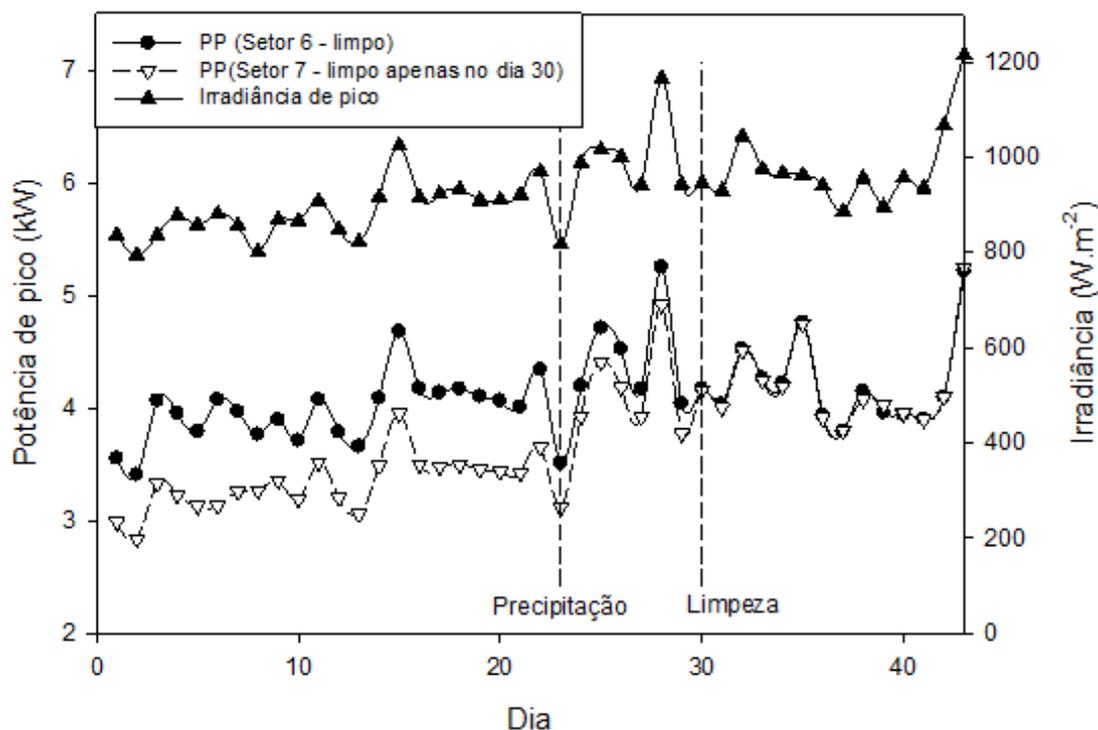


Figura 29: Potência de pico durante todo o estudo para os setores 6 e 7 (Grupo S) e irradiância solar.

Considerando que o setor limpo e o setor sujo diferem apenas na poeira depositada, os valores normalizados (Equação 2) representam a fração ou porcentagem da potência não alcançada em função da “sujidade”. A Figura 30 mostra a potência de pico normalizada para os setores 5 e 7 em função da irradiância solar de pico. A potência de pico normalizada média aumentou de 0,85 para 0,93, devido ao impacto da chuva do dia 23 para os dois setores mostrados.

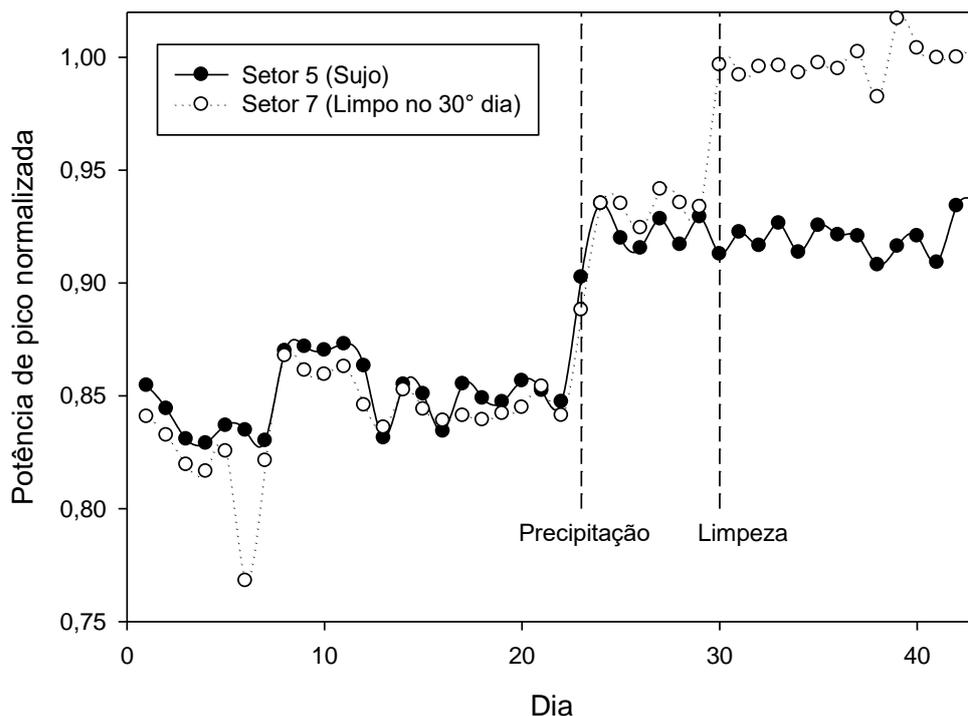


Figura 30: Potência de pico normalizada durante todo o estudo para os setores 5 e 7 (Grupo S)

Como a chuva não foi suficiente para restaurar completamente o desempenho do módulo, pode se inferir que parte do material depositado só é removido pela limpeza manual. Essa fixação de material pode estar relacionada com a intensificação das forças de adesão devido aos ciclos de umidificação e evaporação ou a possibilidade da formação da camada de sal não removida pela chuva, fenômeno descrito por Elminir et al. (2006).

Os valores normalizados de potência de pico apresentaram um leve aumento com o aumento da intensidade solar. Esse resultado está mais uma vez de acordo com Mailutha et al. (1994) e Wilson e Ross (1983), que concluíram que um aumento na irradiância sobre o módulo reduz o impacto do material depositado. No entanto, para irradiâncias maiores que  $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , esse efeito é pequeno.

A Tabela 2 mostra os valores médios para a potência de pico normalizada para os setores 4, 5, 51 e 52 antes e após a chuva e para os setores 7 e 54 antes e depois da chuva e depois da limpeza. A perda da potência de pico em função da poeira depositada foi aproximadamente de 12-16% antes da chuva. Após a chuva, essa perda foi reduzida para 5-8%. Após a limpeza dos módulos, a perda de potência devido ao material depositado caiu para aproximadamente zero, como esperado.

Tabela 2: Valores médios para a potência de pico normalizada durante os três diferentes períodos

Setores	Grupo S (Sudoeste)			Group N (Nordeste)			Média
	4	5	7	51	52	54	
Antes da chuva	0.86	0.85	0.84	0.88	0.88	0.87	0.863
Depois da chuva	0.93	0.92	0.94	0.94	0.95	0.93	0.935
Após a limpeza	-	-	1.01	-	-	0.99	1.00

### 5.3.2 Análise da geração de energia

#### 5.3.2.1 Energia gerada diária

A Tabela A2 mostra a energia gerada pelos oito setores durante os 43 dias do estudo. A Figura 31 apresenta a radiação solar diária e os valores de energia gerada diária para os setores 5, 6 e 7 durante os 43 dias da análise. Percebe-se que assim como a potência é diretamente relacionada com a irradiância, a energia gerada está relacionada com a radiação solar diária.

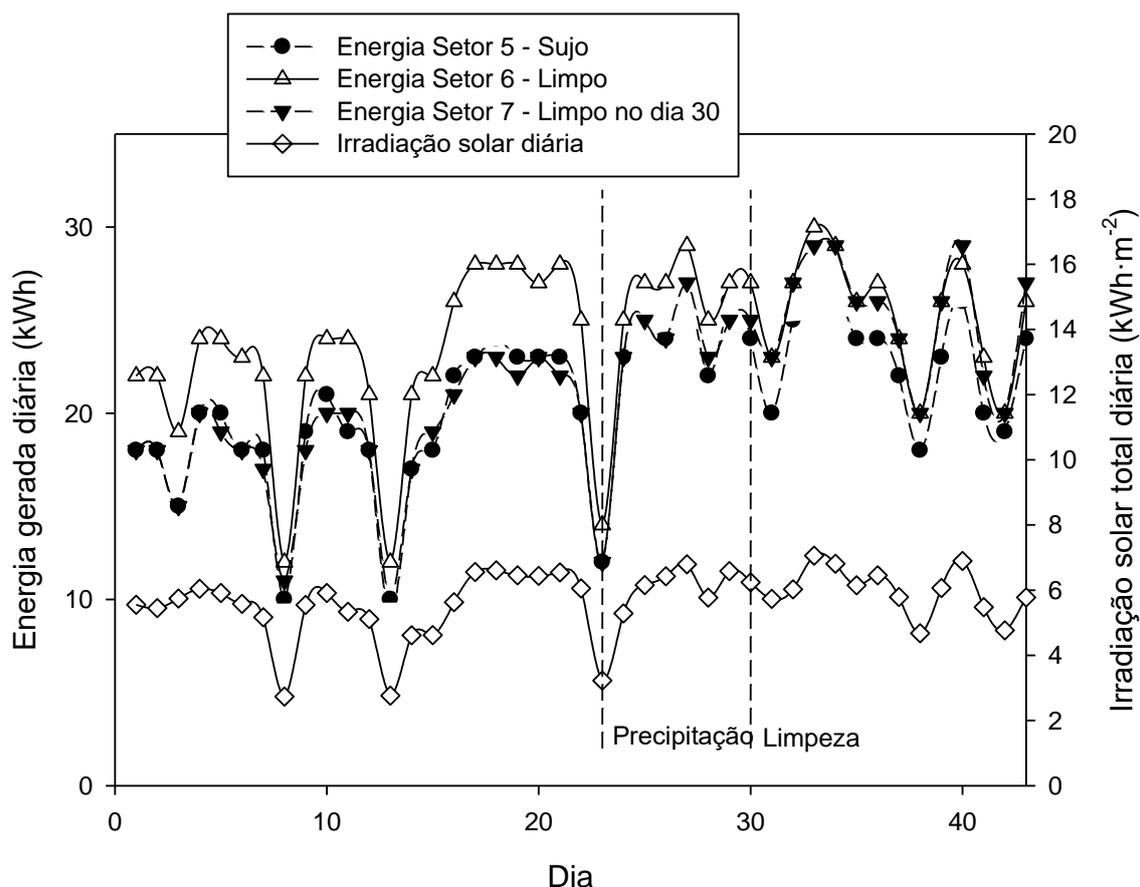


Figura 31: Energia gerada pelos setores 5 e 7 (Grupo S) e a radiação solar total diária.

A Figura 32 mostra a energia gerada normalizada para os setores 52 e 54 (Grupo N). Através desse gráfico, é possível ter uma ideia clara do percentual de energia que não

foi produzida, isto é, a redução na energia gerada em função da poeira depositada. Percebe-se que os valores normalizados de ambos os setores se aproximam de um após a chuva, mostrando o efeito da precipitação de 7 mm na restituição do desempenho dos módulos. Com a limpeza ocorrida no dia 30, os valores normalizados do setor 54 foram praticamente 1, o que evidencia a importância da limpeza para a restituição completa.

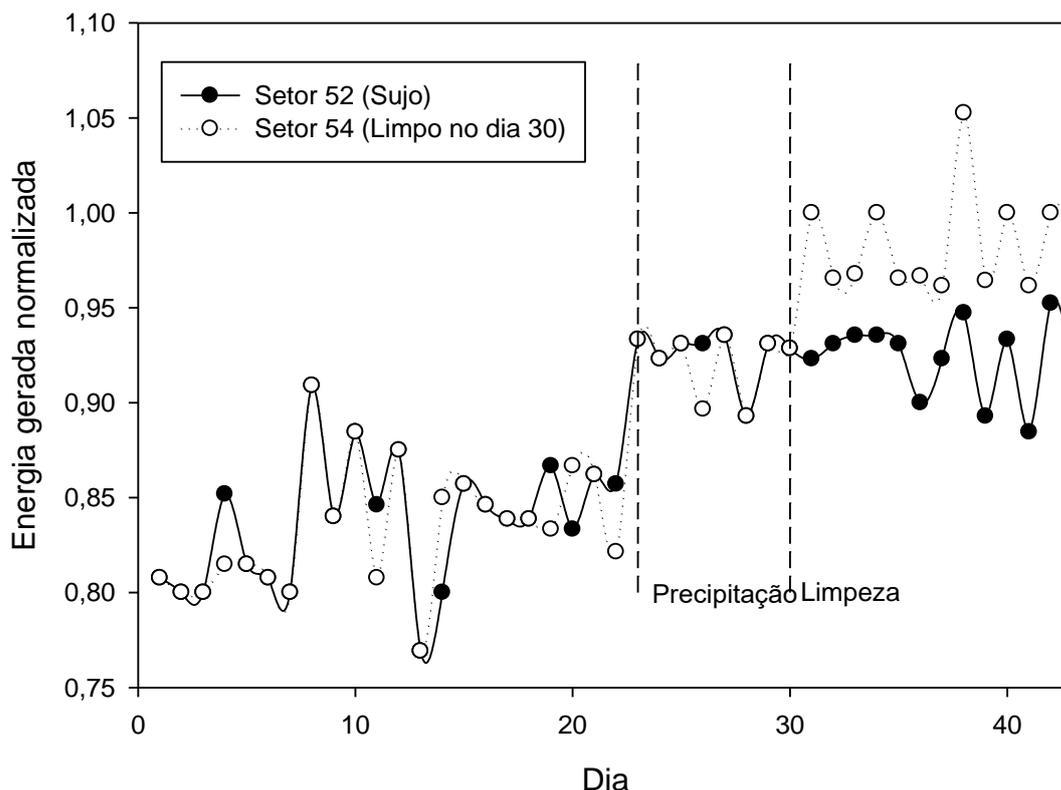


Figura 32: Energia gerada normalizada gerada para os setores 52 e 54 durante todo o estudo.

Como mostrado tanto nos resultados de potência de pico quanto de energia gerada, a chuva limpou os módulos e reduziu significativamente, mas não completamente, as perdas de potência e de energia. De fato, parte do material depositado estava fortemente aderido à superfície de forma que a limpeza foi essencial.

A Tabela 3 mostra os valores normalizados de energia gerada para os grupos N e S. Os dois grupos apresentaram praticamente a mesma perda de energia gerada o que revela que embora o grupo N tenha apresentado maiores valores de geração de energia, a perda devido à poeira depositada é proporcional à geração.

Tabela 3: Valores médios para a energia gerada normalizada durante os três diferentes períodos.

Setores	Grupo S (Sudoeste)			Grupo N (Nordeste)			Média
	4	5	7	51	52	54	
Antes da chuva	0.85	0.83	0.82	0.84	0.84	0.83	0.835
Depois da chuva	0.92	0.91	0.92	0.93	0.92	0.92	0.920
Após a limpeza	-	-	1.00	-	-	0.99	0.995

### 5.3.2.2 Efeito da orientação dos módulos

O efeito da orientação dos módulos na energia gerada foi analisada nos módulos estudados. O Grupo N, por gerar mais energia, foi considerado referência para o cálculo do impacto da orientação, como mostrado na Equação 5.

$$ES_{perda} = \frac{E_N - E_S \cdot 100}{E_N} \quad (5)$$

onde  $E_S$  e  $E_N$  são os valores diários de energia gerada pelos grupos S e N, respectivamente, e  $ES_{perda}$  é a perda direcional média. A perda direcional média de energia produzida, mostrada na Figura 33, foi de 8%, mas chegou à 16% em alguns dias. Outro ponto é que através da linha de tendência traçada no gráfico percebe-se que a diferença entre a produção de energia dos grupos com orientações opostas vai diminuindo com o passar dos dias, explicado pela inclinação do sol a medida em que o verão vai se aproximando.

## 5.4 Caracterização do material coletado

O material coletado da superfície dos módulos foi analisado por Difração de raios-X. Os espectros obtidos para os Grupos S e N são mostrados na Figura 34 e Figura 35, respectivamente. Os principais componentes identificados foram quartzo ( $SiO_2$ ), hematita ( $Fe_2O_3$ ), caulinita  $(Al_2Si_2O_5)(OH)_4$ , calcita ( $Mg_{0,03}Ca_{0,97}CO_3$ ), e moscovita  $(KAl_3Si_3O_{10})(OH)_2$ . A presença de hematita é explicada pela composição do solo da região, rico em compostos ferrosos e pela presença de várias mineradoras próximas que exploram o minério de ferro. A presença de caulinita é explicada pela proximidade às companhias cimenteiras na região e à construções civis ao redor do estádio. Caulinita também foi encontrada por Elminir et al. (2006) em Cairo, Egito. A poeira coletada de ambos os grupos apresentou quartzo como componente principal, hematita e calcita em

concentrações medianas, e moscovita e caulinita em menores concentrações. A poeira do grupo S apresentou maiores porcentagens de hematita, calcita, caulinita e moscovita quando comparados à concentração de quartzo em relação ao grupo N.

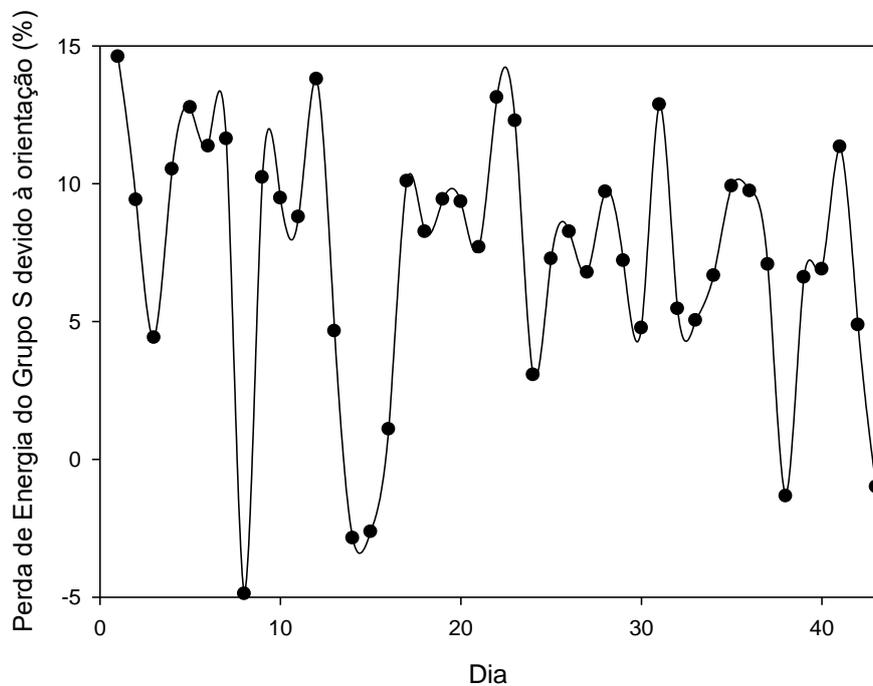


Figura 33: Perda direcional média do Grupo S nos 43 dias do estudo.

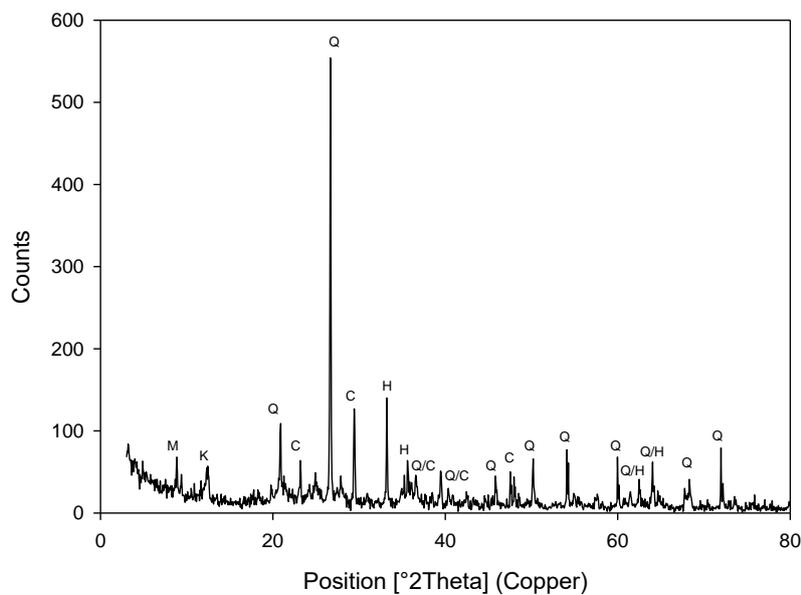


Figura 34: Espectro de difração de raios-X para a poeira coletada no Grupo S. Componentes: C – calcita, H – hematita, K – caulinita, M – moscovita, Q – quartzo.





grande diversidade de tamanhos. No Grupo S, aproximadamente 70 % das partículas tem diâmetro entre 18 e 51,5  $\mu\text{m}$ , e, para o Grupo N, entre 10,5 e 43,5  $\mu\text{m}$ . As partículas do Grupo A tem um diâmetro médio de 35,3  $\mu\text{m}$ , valor 23% maior que o diâmetro médio do Grupo N que foi de 28,7  $\mu\text{m}$ . Essa diferença revela que módulos com menos de 300 m de distância do outro podem apresentar distribuições granulométricas de partículas depositadas um pouco diferentes.

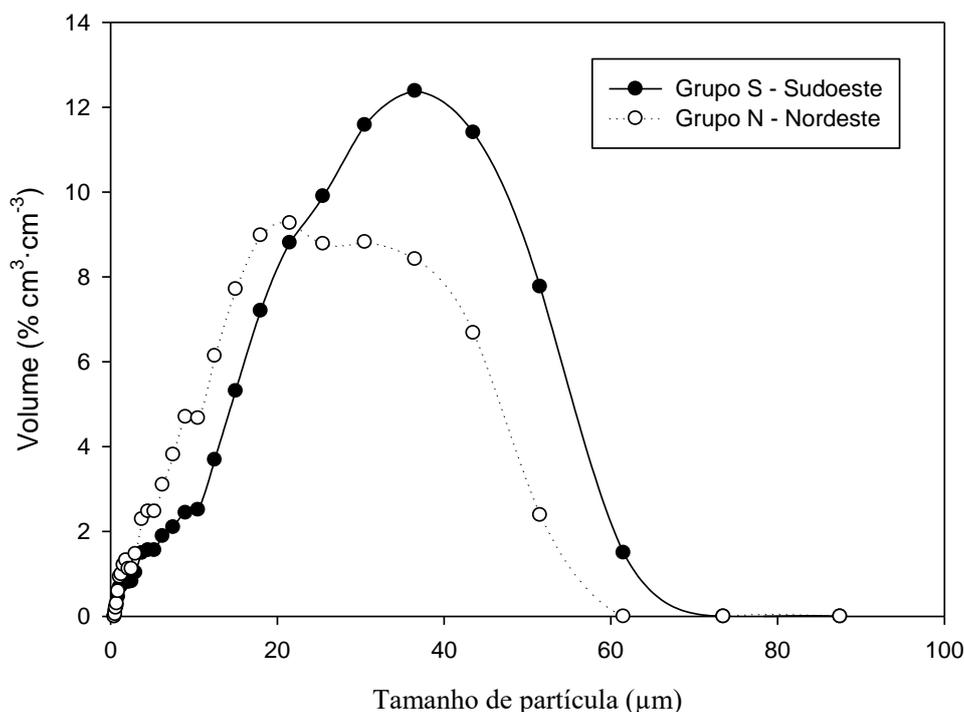


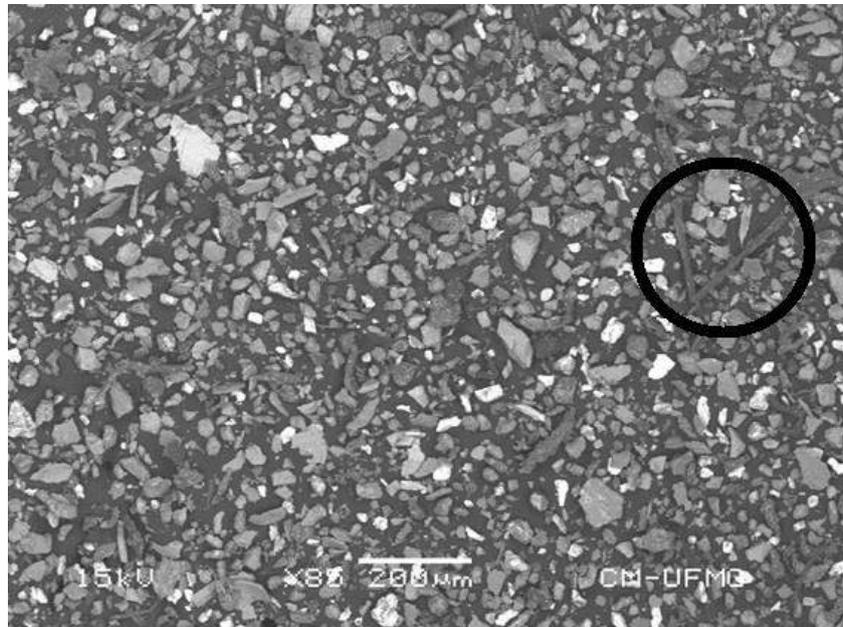
Figura 38: Distribuição granulométrica do material coletado nos Grupos N e S.

A partir desse resultado, era esperado que os módulos do Grupo N apresentassem valores menores de potência de pico normalizada e energia gerada normalizada diária quando comparados com o Grupo S, já que partículas menores tendem a cobrir mais os módulos provocando maiores impactos no desempenho destes (El-Shobokshy and Hussein, 1993). Entretanto, as Tabelas 2 e 3 mostram que a diferença entre os valores normalizados dos dois grupos não é significativa.

Sendo assim, ou a diferença no tamanho da partícula não foi suficiente para impactar a redução no desempenho, ou outros efeitos mascararam a diferença, como a degradação induzida por potencial e o rompimento de circuitos da placa (*cell breakage*).

A morfologia das partículas foi analisada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (Figura 39), constatando mais uma vez a heterogeneidade da amostra. Formas poligonais, com arestas e outras de bastonetes foram observadas. Segundo Otsuka et al

(1988), o formato das partículas influencia diretamente na sua adesão na superfície. Partículas menos esféricas tendem a apresentar forças de adesão menos intensas.



*Figura 39: Microscopia eletrônica de varredura da poeira coletada.*

A análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva foi realizada na região circunscrita na Figura 39 e mais uma vez foram detectados ferro e silício. Além disso, através da técnica, pode-se observar também a presença de material carbonoso, possivelmente fuligem de vegetação queimada. Na época do inverno, na região em questão, é comum a ocorrência de queimadas que explicariam esse tipo de cinzas. A presença de material orgânico fixa a poeira na superfície, reduzindo o efeito da chuva, como foi observado, e aumentando a necessidade de limpeza com esforços mecânicos.

## 6 Conclusão

A análise do efeito da poeira depositada e da orientação dos módulos durante 43 dias foi realizada na segunda metade do inverno. A poeira depositada nos módulos fotovoltaicos reduziu a potência de pico em aproximadamente 13,7% no período seco e em 6,5% após uma precipitação significativa. A poeira também reduziu a energia gerada em aproximadamente 16,5% no período seco e em 8% após a precipitação. A chuva, mesmo que em quantidade não muito expressiva (7 mm) foi capaz de limpar parcialmente a superfície dos módulos e reduzir as perdas de energia em função da poeira depositada. Entretanto, o desempenho dos módulos fotovoltaicos só foi completamente restaurado após a limpeza manual.

O efeito da orientação no desempenho dos módulos também foi analisado. A geração diária do Grupo S (orientado à sudoeste com coordenadas azimute de 92 à 101°) foi aproximadamente 8% menor que a geração apresentada pelo Grupo N (orientado à nordeste com coordenadas azimute de 278 à 286°). A distribuição granulométrica das partículas do Grupo S e N foi de 35,3 e 28,7  $\mu\text{m}$ , respectivamente. No entanto, essa diferença não foi suficiente para afetar o desempenho dos módulos. O formato das partículas encontradas era heterogêneo, com vários tipos de bastonetes. A poeira dos dois grupos apresentou quartzo como componente principal, hematita e calcita como componentes secundários e moscovita e caulinita em baixas concentrações. A poeira do Grupo S, mais próximo à uma área urbana, mostrou maiores frações de hematita, calcita, caulinita e moscovita em relação à fração de quartzo quando comparados aos valores apresentados pelo Grupo N, mais próximo à uma área de preservação ambiental, de maior pureza.

As observações desse trabalho reforçam a importância de incorporar as limpezas de módulos entre os custos de manutenção de usinas fotovoltaicas, bem como a importância de encontrar uma frequência ótima para a limpeza dos módulos, pois a perda de performance dos módulos fotovoltaicos devido à deposição de poeira é significativa.

## Referências

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018. Empreendimentos em operação. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/dados/geracao>.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. Resolução normativa nº687, Novembro, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>

Appels, R., Lefevre, B., Herteleer, B., Goverde, H., Beerten, A., Paesen, R., De Medts, K., Driesen, J., Poortmans, J., 2013. Effect of soiling on photovoltaic modules. *Solar Energy* 96, 283-291. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.017>

Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., Zabihi, M. 2001. The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. *Renew Energy* 24, 459-468. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00029-5)

Bechberger, M., Reiche, D. 2004. Renewable energy policy in Germany: pioneering and exemplary regulations. *Energy for Sustainable Development* 1 (8), 47-57. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60390-7](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60390-7)

Cabanillas, R. E., Munguía, H., 2011. Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 3 (4), 114-121. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3622609>

Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L. 1954. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics* 25 (5), 676. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1721711>

Costa, S. C. S., Diniz, A. S. A. C., Kazmerski, L. L. 2016. Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63, 33-61. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.059>

Cuddihy, EF. 1983. Surface soiling: theoretical mechanisms and evaluation of low soiling coatings. In: *Proceedings of the flat-plate solar array project research forum on quantifying degradation*. p. 379–96.

El-Nashar, A. M., 2003. Effect of dust deposition on the performance of a solar desalination plant operating in an arid desert area. *Solar Energy* 75, 421-431. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.032>

El-Shobokshy, M. S., Hussein, F. M., 1993. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy* 51 (6), 505-511. Available at: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90135-B](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90135-B)

Elminir, H. K., Ghitas, A. E., Hamid, R. H., El-Hussainy, F., Beheary, M. M., Abdel-Moneim, K. M., 2006. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management* 47, 3192-3203. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>

Ferrada, P., Araya, F., Marzo, A., Fuentealba, E., 2015. Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of Chile. *Solar Energy* 114, 356-363. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.009>

Garg, HP. 1974. Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors. *Solar Energy* 15, 299-302. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(74\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(74)90019-X)

GBB – Green Building Council Brasil, 2014. Certificação LEED. Disponível em: <http://www.gbcbrazil.org.br/sobre-certificado.php>

Ghazi, S., Sayigh, A., Ip, K. 2014. Dust effect on flat surfaces – a review paper. *Renew Sustainable Energy Reviews* 33, 742-751. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.016>

Google Maps. 2018a. Visão aérea do Estádio Mineirão. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Mineir%C3%A3o/@-19.8658615,-43.9810708,2795m/data=!3m2!1e3!5s0xa690f74c891431:0x1e3146978ad2501b!4m5!3m4!1s0xa690f71348ff6d:0x35b9453242d27588!8m2!3d-19.865867!4d-43.9711315>

Google Maps. 2018b. Mapa de Belo Horizonte e cidades vizinhas. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Mineir%C3%A3o/@-19.865867,-44.2512829,10z/data=!3m1!5s0xa690f74c891431:0x1e3146978ad2501b!4m5!3m4!1s0xa690f71348ff6d:0x35b9453242d27588!8m2!3d-19.865867!4d-43.9711315>

Goossens, D., Offer, Zy., Zangvill, A. 1993. Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors. *Solar Energy* 50, 75-84. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90009-D](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90009-D)

Goossens, D., Van Kerschaever, E. 1999. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy* 66, 277-289. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00028-6)

Kazem, H. A., Chaichan, M. T. 2016. Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman. *Solar Energy* 139, 68-80. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.019>

Kazmerski, L. L., Diniz, A. S. A. C., Maia, C. B., Viana, M. M., Costa, S. C., Brito, P. P., Campos, C. D., Machado Neto, L. V., Hanriot, S. M., Cruz, L. R. O. 2016. Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: chemical and physical relationships at the microscale. *Journal of Photovoltaics* 6 (3), 719-729. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2528409>

Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., Wenger, H., 2006. The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest Region of the United States. In: *IEEE 4th World Conference; 2006*.

- Liu, H., Huang, J., Chen, Z., Chen, G., Zhang, K. Q., Al-Deyab, S. S., Lai, Y., 2017. Robust translucent superhydrophobic PDMS/PMMA film by facile one-step spray for self-cleaning and efficient emulsion separation. *Chemical Engineering Journal* 330, 26-35. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.114>
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, A. M., Rezadad, M. I., Hajighorbani, S. 2016. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, 1307-1316. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>
- Mailutha, J.T., Murase, H., Inoti, I. K., 1994. Knowledge engineering-based studies on solar energy utilization in Kenya. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America*. 25:13-6.
- Mastropietro, P., Batlle, C., Barroso, L. A., Rodilla, P., 2014. Electricity auctions in South America: Towards convergence of system adequacy and RES-E support. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 375-385. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.074>
- Mehmood, U., Al-Sulaiman, Fahad. A., Yilbas, B. S., Salhi, B., Ahmed, S. H. A., Hossain, K. M., 2016. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: A critical review. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 157, 604-623. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.038>
- Mejia, F. A., Kleissl, J., 2013. Soiling losses for solar photovoltaic systems in California. *Solar Energy* 95, 357-363. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.028>
- MME - Ministério de Minas e Energia, 2016. Energia solar no Brasil e no Mundo 2016. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?\\_20\\_folderId=3580498&\\_20\\_displayStyle=descriptive&\\_20\\_viewEntries=1&\\_20\\_viewFolders=1&\\_20\\_struts\\_action=%2Fdocument\\_library%2Fview&\\_20\\_action=browseFolder&\\_20\\_entryEnd=20&\\_20\\_folderEnd=50&\\_20\\_expandFolder=0&\\_20\\_entryStart=0&\\_20\\_folderStart=0&p\\_p\\_id=20&p\\_p\\_lifecycle=0](http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/boletins-de-energia?_20_folderId=3580498&_20_displayStyle=descriptive&_20_viewEntries=1&_20_viewFolders=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview&_20_action=browseFolder&_20_entryEnd=20&_20_folderEnd=50&_20_expandFolder=0&_20_entryStart=0&_20_folderStart=0&p_p_id=20&p_p_lifecycle=0)
- Minas Arena, 2016. Sustentabilidade. Disponível em: <http://estadiomineirao.com.br/omineirao/sustentabilidade/>
- Nahar, N.M., Gupta J.P. 1990. Effect of dust on transmittance of glazing materials for solar collectors under arid zone conditions of India. *Solar & Wind Technology* 7, 237-243. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(90\)90092-G](https://doi.org/10.1016/0741-983X(90)90092-G)
- NEED – National Education Energy Development, 2015. Solar At a Glance. Disponível em: <http://www.need.org/studentenergyresources>
- Ota, Y., Ahmad, N., Nishioka, K., 2016. A 3.2% output increase in an existing photovoltaic system using an antireflection and anti-soiling silica-based coat. *Solar Energy* 136, 547-552. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.038>

Otsuka, A., Iida, K., Danjo, K., Sunada, H., 1988. Measurement of the adhesive force between particles of powdered materials and a glass substrate by means of the impact separation method. III. Effect of particle shape and surface asperity. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin* 36 (2), 741-749. Disponível em: <http://doi.org/10.1248/cpb.36.741>

Portal IPHAN – Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2015. Lista de Bens Tombados e Processos de Tombamento em Andamento. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Lista%20Bens%20Tombados%20Dez%202015.pdf>

Quaschnig, V. 2005. *Understanding Renewable Energy Systems*. Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M. 2007. *Introdução à termodinâmica da engenharia química*. Earthscan, Londres, 272p.

Reis, R. J., Tiba, C. 2016. *Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – volume ii*. Futura Express. ISBN: 978-85-8239-043-6.

Said, S. A. M., Walwil, H. M., 2014. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. *Solar Energy* 107, 328-337. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.048>

Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., Kazmerski, L. L., 2013. 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* 22, 698-733. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>

Schill, C., Brachmann, S., Koehl, M., 2015. Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules. *Solar Energy* 112, 259-262. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.003>

Solar Power Europe, 2017. *Global Market Outlook for Solar Power 2017-2021*. Disponível em: <http://solarpowereurope.org/reports/global-market-outlook-2017/>

Solargis – 2016. *Global Horizontal Irradiation, 2016*. Disponível em: <https://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>

Vuellers, F., Gomard, G., Preinfalk, J. B., Klampaftis, E., Worgull, M., Richards, B., Hoelscher, H., Kavalenka, M. N., 2016. Bioinspired Superhydrophobic Highly Transmissive Films for Optical Applications. *Journal Small* 12 (44), 6144-6152. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.201601443/abstract>

Wilson, A., Ross, R. G. Jr., 1983. Angle of incidence effects on module power performance and energy. Progress report 21. In: *Proceedings of the 21<sup>st</sup> project integration meeting*. JPL, Pasadena, CA; p 423-6.

Yahya, HN., Sambo, AS. 1991 The effect of dust on the performance of PV modules in Sokoto, Nigeria. *Renewable Energy* 15, 36–42.

## Anexos

## Anexo A – Geração diária de energia e insolação dos setores de módulos em estudo.

Tabela A.1: Geração diária de energia e insolação dos setores de módulos em estudo.

Dia	Grupo N				Insol. N (kWh / m <sup>2</sup> )	Grupo S				Insol. S (kWh / m <sup>2</sup> )
	Setor 51 (kWh)	Setor 52 (kWh)	Setor 53 (kWh)	Setor 54 (kWh)		Setor 4 (kWh)	Setor 5 (kWh)	Setor 6 (kWh)	Setor 7 (kWh)	
1	21	21	26	21	5,5	18	18	22	18	5,6
2	20	20	25	20	5,4	19	18	22	18	5,3
3	16	16	20	16	5,7	16	15	19	15	5,6
4	23	23	27	22	6,0	21	20	24	20	5,9
5	23	22	27	22	5,9	19	20	24	19	5,8
6	20	21	26	21	5,4	19	18	23	18	5,7
7	21	20	25	20	5,1	19	18	22	17	5,0
8	10	10	11	10	2,7	10	10	12	11	2,7
9	21	21	25	21	5,4	20	19	22	18	5,3
10	23	23	26	23	5,9	21	21	24	20	5,8
11	22	22	26	21	5,1	20	19	24	20	5,7
12	21	21	24	21	5,0	18	18	21	18	5,1
13	10	10	13	10	2,8	10	10	12	9	2,6
14	17	16	20	17	4,6	17	17	21	17	4,6
15	19	18	21	18	4,7	19	18	22	19	4,7
16	22	22	26	22	5,5	22	22	26	21	5,8
17	26	26	31	26	6,5	24	23	28	23	6,5
18	26	26	31	26	6,5	25	24	28	23	6,5
19	25	26	30	25	6,4	23	23	28	22	6,4
20	26	25	30	26	6,4	24	23	27	23	6,4
21	25	25	29	25	6,5	23	23	28	22	6,5
22	24	24	28	23	6,0	21	20	25	20	6,0
23	15	14	15	14	3,3	12	12	14	12	3,0
24	24	24	26	24	5,3	24	23	25	23	5,9
25	27	27	29	27	6,1	25	25	27	25	6,1
26	27	27	29	26	6,4	25	24	27	24	6,1
27	29	29	31	29	6,7	27	27	29	27	6,7
28	25	25	28	25	5,6	23	22	25	23	5,8
29	28	27	29	27	6,5	25	26	27	25	6,5
30	25	26	28	26	6,2	24	24	27	25	6,5
31	25	24	26	26	5,7	22	20	23	23	5,6
32	26	27	29	28	6,1	25	25	27	27	6,2
33	29	29	31	30	7,0	27	27	30	29	7,0
34	29	29	31	31	6,8	27	27	29	29	6,7
35	27	27	29	28	6,0	24	24	26	26	6,4
36	27	27	30	29	6,4	25	24	27	26	6,4
37	24	24	26	25	5,7	22	22	24	24	5,7
38	18	18	19	20	4,6	18	18	20	20	4,7
39	26	25	28	27	6,0	24	23	26	26	6,1
40	28	28	30	30	6,8	25	26	28	29	6,7
41	23	23	26	25	5,4	21	20	23	22	5,5
42	21	21	21	21	4,8	19	19	20	20	4,8
43	24	24	26	26	5,7	24	24	26	27	5,5