

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Bernardo Meyer Hickel

**O IMPACTO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CAUSADO PELO ACÚMULO DE SUJEIRA
SOBRE OS MÓDULOS FV – METODOLOGIA E AVALIAÇÃO
ATRAVÉS DE CURVAS IxV EM CAMPO**

**Florianópolis
2017**

Bernardo Meyer Hickel

O IMPACTO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CAUSADO PELO ACÚMULO DE SUJEIRA
SOBRE OS MÓDULOS FV – METODOLOGIA E AVALIAÇÃO
ATRAVÉS DE CURVAS IxV EM CAMPO

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Civil
Orientador: Prof. Ricardo Rüther,
Ph.D

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hickel, Bernardo Meyer

O impacto no desempenho de sistemas
fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre
os módulos FV - metodologia e avaliação através de
curvas IxV em campo / Bernardo Meyer Hickel ;
orientador, Ricardo Rüther, 2017.

110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Soiling. 3. sujeira em
módulos FV. 4. resposta espectral. 5. metodologia de
avaliação. I. Rüther, Ricardo . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

Bernardo Meyer Hickel

**O IMPACTO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CAUSADO PELO ACÚMULO DE SUJEIRA
SOBRE OS MÓDULOS FV – METODOLOGIA E AVALIAÇÃO
ATRAVÉS DE CURVAS IxV EM CAMPO**

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 3 de abril de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr. – ECV/UFSC
Coordenador do Curso

Prof. Ricardo Rütther, Ph.D – ECV/UFSC
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Adriano Moehlecke, Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Ph.D
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Samuel Luna de Abreu, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado ao grande
professor Rodi Hickel, ou
simplesmente Vô Rodi.

AGRADECIMENTOS

À toda minha família por todo o carinho e pelo incentivo para a realização deste trabalho, em especial a minha mãe Mônica Meyer e meu avô Mario Meyer, por todo o apoio durante toda minha vida e em especial no período em que o estudo foi efetuado.

Ao Prof. Ricardo Rütther, por toda a orientação concedida, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado que foi fundamental para a realização deste trabalho. Por ter me dado a oportunidade de ingressar na sua equipe do Grupo Fotovoltaica/UFSC, e assim dispor de todo o aparato tecnológico e apoio intelectual, e pela oportunidade de participar de grandes e importantes projetos, de grande contribuição para a construção do conhecimento aqui apresentado.

Aos professores Adriano Moehlecke, Fernando Oscar Ruttkay Pereira e Samuel Luna de Abreu, por sua disponibilidade em participar da banca avaliadora e por suas importantes contribuições para este trabalho, em especial ao professor Moehlecke que se deslocou de Porto Alegre para a participação desta banca.

Aos colegas do Grupo Fotovoltaica-UFSC por todo conhecimento compartilhado todos os dias no laboratório, e por sempre terem propiciado um ambiente agradável de trabalho, estudo e principalmente cooperação durante as atividades desenvolvidas.

Agradecimento muito especial aos colegas Lucas Rafael do Nascimento, Eduardo Martins Deschamps e Rafael Antunes Campos, pelas horas de pesquisa e intermináveis discussões sobre as questões que envolveram a análise dos resultados deste trabalho, muitas vezes priorizando esta análise em detrimento a outras atividades.

Agradecimento especial aos colegas Manfred Kratzenberg, Ernesto Moscardini Júnior e Rafael Campos, pelo o auxílio nas atividades de campo deste trabalho. Sem este auxílio seria impossível a realização destas atividades.

Agradecimento especial ao colega Rafael Antunes Campos por seu trabalho na análise, tratamento e interpretação dos dados. Sem seu esforço e dedicação, esse trabalho não seria possível.

Agradecimento especial ao Programa de P&D da ANEEL e as empresas Guascor do Brasil/Siemens e Monel/Statkraft pelos projetos de P&D realizados em conjunto com o grupo Fotovoltaica/UFSC, implementando sistemas fotovoltaicos em diferentes regiões do país que foram utilizados na realização deste trabalho, e também pelo fornecimento de dados utilizados nesta dissertação.

Agradecimento especial ao CNPq por conceder uma bolsa de pesquisa que contriubiu diretamente para a realização deste estudo.

Por fim, gostaria de agradecer a todos meus amigos e amigas, pelo tempo que não foi compartilhado para que se cumprisse esse estudo, e que de alguma forma colaboraram para a realização e para o bom andamento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho busca avaliar a perda de desempenho em sistemas solares fotovoltaicos causada pelo acúmulo de sujeira na superfície dos mesmos utilizando curvas IxV medidas em campo e aprimorar a metodologia empregada para tal avaliação.

As diferentes tecnologias FV sofrem diferentes impactos no que diz respeito ao acúmulo de sujeira e seus efeitos sobre o desempenho dos dispositivos fotovoltaicos. Seja pela sua resposta espectral, ou simplesmente pela característica construtiva elétrica do módulo, acúmulos de sujeira de perfil semelhante sobre a superfície dos módulos FV das diferentes tecnologias disponíveis no mercado apresentam impactos diferentes na atenuação da geração. Poucos estudos são conduzidos no sentido de quantificar as perdas para diferentes tecnologias, e quando realizados, são conduzidos em ambientes laboratoriais, tendo pouca ou nenhuma reprodutibilidade para sistemas instalados em campo.

Neste estudo foi realizada uma avaliação através de uma análise experimental, buscando averiguar que, para diferentes tipos de sujeira o perfil de atenuação, conhecido da literatura, da transmitância de caráter espectro-seletivo causado pela sujeira é o mesmo, onde tecnologias FV com respostas espectrais concentradas nos baixos comprimentos de onda apresentam maiores perdas por sujeira. Para a avaliação e aperfeiçoamento do método, foram realizadas três avaliações de perda de desempenho causada por sujeira em sistemas de diferentes tecnologias, em dois sistemas distintos, buscando medir os diferentes valores do ponto de máxima potência impostos pelo acúmulo de sujeira, e assim comparar estes valores nas diferentes tecnologias FV. Através da análise do resultado das avaliações, foram sugeridas propostas de melhoria do método da avaliação, visando diminuir as incertezas intrínsecas a este método.

Através da análise experimental, foi obtido um perfil semelhante de curva de transmitância, podendo assim concluir que a resposta espectral de cada tecnologia apresenta papel fundamental na análise. Foram encontradas perdas com valores muito discrepantes entre tecnologias, e com valores elevados (da ordem de 16%) através do acúmulo de sujeira, demonstrando a importância de tal avaliação para otimizar o desempenho do sistema FV.

Palavras-chave: *Soiling*, sujeira em módulos FV, resposta espectral, metodologia de avaliação, sistemas FV, tecnologias FV, energia solar FV.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the loss of performance in solar photovoltaic systems caused by the accumulation of dirt on its surface using IxV curves measured in the field and to improve the methodology used for such evaluation.

The different PV technologies suffer different impacts with respect to the accumulation of dirt and its effects on the performance of the photovoltaic devices. Whether due to its spectral response or simply to the electrical topology of the PV module, dirt accumulations of similar form on the surface of the PV modules of the different technologies available in the market present different impacts on generation attenuation. Few studies are conducted to quantify losses for different PV technologies, and when performed, are conducted in laboratory environments, having little or no reproducibility for field-installed systems.

In this study an evaluation was carried out through an experimental analysis, aiming to investigate that for different types of dirt the attenuation profile, known in the literature, of the spectrum-selective transmittance caused by dirt is the same, where PV technologies with spectral responses concentrated in the low wavelengths present greater losses by dirt. In order to evaluate and improve the method, three evaluations performance losses caused by dirt in different technology systems were carried out, in two different systems, in order to measure the different values of the maximum power point imposed by the accumulation of dirt and to compare these values in different FV technologies. Through the analysis of the evaluations results, proposals were suggested in order to improve the evaluation method, and in order to reduce the uncertainties intrinsic to this method.

By means of the experimental analysis, a similar shape of the transmittance curve was obtained, which allows to conclude that the spectral response of each technology plays a fundamental role in the analysis. Losses with very discrepant values between technologies were found, and with high values (of the order of 16%) through the accumulation of dirt, demonstrating the importance of such evaluation to optimize the performance of the PV system.

Key-words: Soiling, dirt in PV modules, spectral response, evaluation methodology, PV systems, PV technologies, PV solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Um exemplo da atenuação por dispersão e absorção da radiação na atmosfera terrestre (Iqbal, 1983).....	30
Figura 2 – Diferentes componentes da radiação solar terrestre.....	31
Figura 3 – Ilustração dos principais ângulos do sol, relativos ao dispositivo de interesse. O ângulo de zênite é descrito por θ_z (ABNT, 2006).....	32
Figura 4 – Ilustração da variação da posição do sol em relação às estações do ano, para o hemisfério norte terrestre (variação em relação ao eixo norte-sul).....	32
Figura 5 – Espectro padrão de referência ASTM G173, amplamente utilizado para análise de sistemas FV (ASTM, 2012).....	33
Figura 6 – Representação da curva característica IxV de um módulo FV, destacando seus principais pontos.....	35
Figura 7 – Exemplo da relação entre valor máximo possível (representado pela área B – quadrado rosa) e valor máximo prático (área A – quadrado roxo) de potência de um gerador FV. A relação entre as áreas resulta no valor do Fator de Forma, conforme representado pela equação.....	36
Figura 8 – Evolução da eficiência das células FV ao passar dos anos, discriminado por gerações de células FV (1ª geração em azul, 2ª geração em verde, 3ª geração em laranja) (NREL, 2016).....	38
Figura 9 – Comparação entre os melhores valores de eficiência obtidos por células em laboratório (barras superiores de cada caso) X melhores módulos (barras inferiores), também obtidos em laboratório, por tecnologia FV (Fraunhofer, 2015).....	39
Figura 10 - Produção anual de módulos FV, discriminados por tecnologia (Fraunhofer, 2015).....	39
Figura 11 – Produção anual de módulos FV de filme fino, discriminados por tecnologia (Fraunhofer, 2015).....	40
Figura 12 – Exemplo de módulo FV de silício cristalino de 60 células.....	41
Figura 13 – Módulo FV de CdTe (imagem superior) e módulo de a-Si (imagem inferior), apresentando as diferenças construtivas relativas às células FV mencionadas.....	41
Figura 14 - Curva IxV para 4 módulos conectados em série sem sombreamento (linha contínua); para 4 módulos em série com sombreamento de 50% em somente uma célula FV de um dos módulos, sem a presença de diodo de desvio (linha tracejada) e com a presença de	

diodo de desvio (curvas com linha contínua e pontos). (Cresesb, 2014).	42
Figura 15 – Exemplos de curvas IxV para a variação de irradiação incidente sobre um mesmo módulo FV (DGS, 2008).	46
Figura 16 – Respostas espectrais normalizadas para diferentes tecnologias FV (Dirnmeyer, 2015).	47
Figura 17 – Respostas espectrais normalizadas para diferentes tecnologias FV (Ishii, 2011).	47
Figura 18 – Não uniformidade de sujeira (Lorenzo <i>et al.</i> , 2013).	50
Figura 19 – Não uniformidade de sujeira em sistema FV na Bahia, gerada pelos fortes ventos provenientes do Leste na região.	50
Figura 20 – Diagrama elétrico do módulo FV (Gostein, 2013).	51
Figura 21 – Curvas IxV do módulo FV sombreado de forma não homogênea, na fileira de 6 células (gráfico de cima) e na fileira de 12 células (gráfico de baixo), com suas respectivas representações da forma de sombreado ao lado, apresentando curvas obtidas através da ausência de filtro (curva contínua), com filtro que simula 11% de concentração de sujeira (curva pontilhada), filtro de 24% de concentração de sujeira (curva tracejada), e obtida através de simulação computacional (curva de bolinhas) (Gostein, 2013).	51
Figura 22 – Transmitância percentual para diferentes comprimentos de onda, em diferentes concentrações de sujeira (diferentes curvas) (Qasem <i>et al.</i> , 2012).	54
Figura 23 – Instrumento (espectroradiômetro) utilizado na avaliação das diferentes concentrações de sujeira.	61
Figura 24 – Traçador de curvas IxV utilizado – PVPM 1000C	63
Figura 25 – Localização dos municípios onde os sistemas FV analisados neste trabalho estão instalados.	66
Figura 26 – Vista geral dos sistemas FV instalados (vista NO).	67
Figura 27 – Vista geral do sistema FV Buritis-RO (Vista E).	68
Figura 28 – Curvas de transmitância do espectro solar por comprimentos de onda, para diferentes concentrações de sujeira.	71
Figura 29 – Detalhe da curva de distribuição espectral de irradiação atmosférica em Florianópolis-SC (curva azul) e medida de referência (com vidro) para o mesmo local (curva vermelha) por comprimento de onda, evidenciando os ruídos de medição do aparelho utilizado em ambas as amostras.	72
Figura 30 – Distribuição de irradiação do espectro padrão G-173 (curva superior em azul escuro), e diferentes distribuições de irradiação atenuadas pelas diferentes concentrações de sujeira analisadas.	73

Figura 31 – Perfil do acúmulo de sujeira sobre módulo de cada tecnologia FV, visita de outubro 2014 (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ μ c-Si, a-Si, multi-Si, mono-Si).	75
Figura 32 – Subsistemas CIGS (esquerda e a barlavento), apresentando maior concentração de sujeira, frente ao subsistema m-Si (direita e a sotavento).	76
Figura 33 – Comparação entre módulos FV sujos e limpos dos sistemas	76
Figura 34 - Ponto de máxima potência para todos os sistemas, antes (curva laranja) e após (curva azul) a limpeza para a primeira campanha de limpeza manual realizada em outubro 2014, e suas respectivas diferenças relativas (barras cinzas).	77
Figura 35 – Curvas IxV do subsistema p-Si sujo (verde) e limpo (vermelho), e as respectivas curvas PxV sujo (roxo) e limpo (azul).	78
Figura 36 - Perfil do acúmulo de sujeira sobre módulo de cada tecnologia FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ μ c-Si, a-Si, p-Si, m-Si).	78
Figura 37 – Perfil de acúmulo de sujeira dos subsistemas CIGS (esquerda) e a-Si (direita).	79
Figura 38 - Comparação entre módulos FV sujos e limpos do sistema p-Si. A pequena concentração de sujeira neste subsistema é percebida pela semelhança visual dos módulos FV limpos e sujos.	79
Figura 39 - Exemplo de não-homogeneidade entre módulos FV de um mesmo subsistema (a-Si).	80
Figura 40 - Ponto de máxima potência para todos os subsistemas antes (curva laranja) e após (curva azul) a limpeza para a segunda campanha de limpeza manual realizada em novembro 2015, e suas respectivas diferenças relativas (barras cinzas).	81
Figura 41 – Curvas IxV (verde) e PxV (roxo) do subsistema p-Si sujo.	82
Figura 42 – Subsistemas a-Si (esquerda) e a-Si/ μ c-Si (direita), exemplificando as mesas com configuração de quatro fileiras de módulos FV horizontais.	83
Figura 43 - Subsistemas p-Si (esquerda) e a-Si sem moldura (direita).	83
Figura 44 – Subsistemas a-Si (esquerda) e a-Si/ μ c-Si (direita), mostrando o perfil de sujeira aderida.	84
Figura 45 - Subsistemas p-Si (esquerda) e a-Si sem moldura (direita), mostrando o perfil de sujeira aderida. Nota-se a menor concentração de sujeira aderida naquele, e a inexistência neste.	84
Figura 46 – Detalhe do perfil de sujeira aderida ao subsistema p-Si. A sujeira aderida não representa sombreamento ao módulo FV.	85

Figura 47 - Curvas IxV (verde) e PxV (roxo) sujas do subsistema p-Si.	87
Figura 48 – Sistemas FV da tecnologia m-Si (esquerda) e p-Si (direita).	89
Figura 49 – Módulos idênticos da tecnologia p-Si de uma mesma mesa do subsistema p-Si fotografados e medidos na mesma data. Módulo FV com maior concentração de sujeira (esquerda) e módulo com menor concentração de sujeira (direita), com suas respectivas curvas IxV limpa (azul), suja (laranja), e curvas PxV limpa (cinza) e suja (amarela).....	90
Figura 50 – Comparação do perfil do acúmulo de sujeira (Out. 2014 na fileira de cima, Nov. 2015 na fileira de baixo) sobre módulo de cada tecnologia FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ μ c-Si, a-Si, p-Si, m-Si).	91
Figura 51 - Comparação entre o sistema sujo (superior) e limpo (inferior).....	92
Figura 52 – Perfil de sujeira para cada tecnologia (da esquerda para direita, a-Si/ μ c-Si, a-Si com moldura, a-Si sem moldura e p-Si).....	93
Figura 53 – Sujeira represada sobre módulo FV pela presença de moldura, após intensa aplicação de água sobre o mesmo.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de temperatura de potência para diferentes tecnologias FV (Adaptado de Kaldellis, 2014).....	45
Tabela 2 – Distribuição de grãos da amostra de sujeira e tipos de sedimento (Adaptado de Qasem <i>et al.</i> ,2012).....	53
Tabela 3 – Diferença percentual de corrente entre módulo limpo/sujo para diferentes concentrações de sujeira (Adaptado de Qasem <i>et al.</i> ,2012)	54
Tabela 4 - Características elétricas dos subsistemas FV instalados – Brotas de Macaúbas/BA.....	67
Tabela 5- Características elétricas dos subsistemas FV instalados – Buritis/RO	69
Tabela 6 – Distribuição de tamanho de grãos da amostra e classificação	72
Tabela 7 – Valores de potência máxima de operação (1 ano) para todas as tecnologias, obtidas antes e depois da limpeza e os valores de perda por sujeira (valores em W).	77
Tabela 8 – Valores de potência máxima de operação (1 ano aproximadamente) para todas as tecnologias, obtidas antes e depois da limpeza e os valores de perda por sujeira (valores em W).	80
Tabela 9 - Valores médios de potência máxima de operação (2 anos) para todas as tecnologias, medidas por <i>string</i> , obtidas antes e depois da limpeza e os valores de perda por sujeira (valores em W).	86
Tabela 10 - Valores médios de potência máxima de operação (2 anos) das tecnologias descritas, medidas para cada subsistema total, obtidas antes e depois da limpeza, e os valores de perda por sujeira(valores em W).....	86
Tabela 11 – Número de medidas realizadas para cada estágio da avaliação, e suas respectivas incertezas-padrão (desvio padrão da amostra).....	87
Tabela 12 –Valores de perda por sujeira para os subsistemas (análise por <i>string</i>) e suas respectivas incertezas.....	88
Tabela 13 - Distribuição de tamanho de grãos da amostra e classificação – Buritis/RO	94
Tabela 14 – Perdas por sujeira para as tecnologias FV.	95

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
AM – Massa de ar (Air Mass)
ASTM – Do inglês, American Society of Testing and Materials
By-pass - Desvio
CIGS – Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
DSSC – Inglês para Células Solares Sensibilizadas por Corante, ou dye sensitized solar cell
EVA - Espuma vinílica acetinada
FF – Fator de Forma
FV – Fotovoltaica
IEC – Comissão Internacional de Eletrotécnica (International Electrotechnical Commission)
Mismatch – Termo do inglês usado para descasamento elétrico de grandezas
MPP – Ponto de Máxima Potência (Maximum Power Point)
OPV – Inglês para Células Orgncias Fotovoltaicas
PR – Taxa de Desempenho (Performance Ratio)
RTD – Termo-resistor (Resistance Temperature Detector)
Soiling – Termo do inglês usado para o acúmulo de sujeira, ou em tradução livre, sujeidade
STC – Condições-padrão de Teste (Standard Test Conditions)
String – Uma série de módulos fotovoltaicos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	OBJETIVO PRINCIPAL	26
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	RECURSO SOLAR	29
2.1.1	RADIAÇÃO SOLAR	29
2.1.2	MASSA DE AR - AM.....	31
2.1.3	ESPECTRO SOLAR	33
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	34
2.2.1	MÓDULO FV.....	35
2.2.2	TECNOLOGIAS FV	36
2.3	DESEMPENHO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	43
2.3.1	TEMPERATURA.....	44
2.3.2	IRRADIAÇÃO SOLAR.....	45
2.3.3	RESPOSTA ESPECTRAL	46
2.3.4	PERDAS POR DESCASAMENTO (MISMATCH).....	48
2.3.5	ACÚMULO DE SUJEIRA (SOILING).....	48
2.4	INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NO DESEMPENHO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	49
2.4.1	MISMATCH POR NÃO-HOMOGENEIDADE DE SUJEIRA	49
2.4.2	SELETIVIDADE ESPECTRAL	52
2.5	PARÂMETROS DE DESEMPENHO PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA FV.....	55
2.5.1	PRODUTIVIDADE - YIELD	55
2.5.2	TAXA DE DESEMPENHO - PR	56
2.6	FIGURAS DE MÉRITO PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA SUJEIRA SOBRE DESEMPENHO DE SISTEMAS FV	56
3	METODOLOGIA.....	59
3.1	PARTE EXPERIMENTAL – SELETIVIDADE ESPECTRAL DE AMOSTRA DE SUJEIRA	59
3.2	OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE CURVAS I x V.....	61
3.2.1	EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE CURVAS I x V ...	63
3.2.2	LIMPEZA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	64
3.2.3	FÍGURA DE MÉRITO UTILIZADA	65

3.3	SISTEMAS FV AVALIADOS.....	65
3.3.1	SISTEMA FV BROTAS DE MACAÚBA - BA.....	66
3.3.2	SISTEMA FV BURITIS – RO	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1	EXPERIMENTO – SELETIVIDADE ESPECTRAL.....	71
4.2	ANÁLISE DE PERDA DE DESEMPENHO POR SUJEIRA ATRAVÉS DE CURVAS I x V.....	74
4.2.1	BROTAS DE MACAÚBA-BA – OUTUBRO 2014.....	74
4.2.2	BROTAS DE MACAÚBA-BA – NOVEMBRO/15.....	78
4.2.3	BURITIS – RO.....	82
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE SUBSISTEMAS FV	88
4.3.1	BROTAS DE MACAÚBA - BA – OUTUBRO 2014	88
4.3.2	BROTAS DE MACAÚBA - BA – NOVEMBRO 2015	91
4.3.3	BURITIS – RO.....	92
4.4	INCERTEZAS DA ANÁLISE – CONCENTRAÇÃO DE SUJEIRA E INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	96
4.4.1	CONCENTRAÇÃO DE SUJEIRA.....	96
4.4.2	INCERTEZAS INERENTES AO PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	97
4.5	PROPOSTA DE APERFEIÇOAMENTO DO MÉTODO.....	99
5	CONCLUSÕES.....	101
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	104
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

A geração fotovoltaica (FV) é uma forma de conversão de energia elétrica renovável com grande potencial, que converte diretamente a radiação solar – uma fonte de energia com recursos praticamente infinitos, silenciosa e não-poluente – em energia elétrica. Esta tecnologia apresenta grandes vantagens frente às demais fontes de energia, destacando a capacidade de modularidade e de geração distribuída, o que significa que a geração de eletricidade pode ser realizada no local onde esta energia será consumida, evitando assim custos e perdas gerados pelos sistemas de transmissão e distribuição utilizados por sistemas elétricos de fontes convencionais, como por exemplo usinas hidro ou termoelétricas.

A energia solar fotovoltaica começou a ganhar escala nacional no Brasil recentemente. Com a aprovação da resolução normativa nº 482 da ANEEL, de 17 de abril de 2012, ficaram estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, a partir de fontes renováveis (que posteriormente foram atualizadas pela resolução nº 687, de 2015). Isto associado ao programa de leilões específicos para a geração solar fotovoltaica de grande escala, acabou por causar um aumento significativo de empreendimentos na área fotovoltaica, tanto para a escala residencial como para grandes usinas espalhadas pelo país.

O Brasil possui enorme potencial em termos de recurso solar, pois dispõe de vasta extensão territorial com altos níveis de irradiância incidente. Todavia, é importante a realização de estudos analisando aspectos locais, pois a influência do clima e das características ambientais locais pode acarretar em diferentes impactos, específicos da região, na geração fotovoltaica. Segundo Gostein et al., 2014 e Dunn et al., 2013, o acúmulo de sujeira (*soiling*) é o terceiro principal fator ambiental que tem influência direta sobre os valores de geração do sistema FV (no sentido da atenuação da irradiância incidente sobre o módulo FV), após irradiância (no sentido da atuação direta de geração de energia elétrica) e temperatura. Sinha et al., 2014, definem *soiling* (ou sujidade, em tradução livre), como “*A redução da radiação solar que incidiria sobre o material FV devido à absorção, reflexão e dispersão dada através de contaminantes na superfície do módulo FV*”. Diversos estudos apontam valores significativos de perda de energia (ou potência) gerada por *soiling*, da ordem de 3-6% em médias anuais (Kimber et al., 2006), podendo chegar a valores de 20% ao mês

(Townsend e Hutchinson, 2000) e 30% em períodos menores (base diária) (Zorrilla-Casanova et al, 2011).

Contudo, diferentes concentrações de sujeira sobre o módulo FV, ou até mesmo uma distribuição desigual de concentração de sujeira sobre o módulo FV (de maneira análoga uma desigualdade de sujeira entre módulos de um mesmo sistema) apresentam impactos diferentes no desempenho do sistema.

Entre diferentes tecnologias FV, os impactos da mesma concentração de sujeira também se dão de forma diferente (Qasem, 2013). Visando reduzir este impacto de perda de desempenho no sistema FV, estudos na literatura apresentando formas de mitigar a concentração de sujeira sobre módulos FV são cada vez mais comuns (Mani, 2010). Portanto, conhecer o impacto que determinada sujeira apresenta sobre determinada tecnologia FV é de interesse tanto econômico como técnico e científico.

O estudo apresentado neste trabalho busca definir e aprimorar um método eficaz de avaliação em campo, buscando quantificar o impacto na geração fotovoltaica proveniente do acúmulo de sujeira sobre os módulos FV. Para isto, buscou-se definir uma figura de mérito que represente o verdadeiro impacto na geração de energia elétrica. Neste estudo foram avaliadas algumas das tecnologias fotovoltaicas encontradas no mercado mundial (silício mono e multicristalino, CIGS e silício amorfo e micro amorfo). Como estas tecnologias apresentam diferentes aspectos na atenuação da geração fotovoltaica, inclusive quando expostas ao mesmo tipo de sujeira, este estudo buscou definir os principais fatores que resultam nestas discrepâncias, podendo assim realizar uma comparação correta entre diferentes tecnologias FV.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

Avaliação da redução na geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos de diferentes tecnologias, causada pela deposição de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aprimoramento do método de avaliação in loco de sistemas FV através de curvas $I \times V$, utilizado para mensurar a redução na

geração de energia elétrica imposta pela sujeira em sistemas fotovoltaicos;

- Verificação e avaliação das principais características impostas pela sujeira depositada sobre módulos FV, que resultam em diferentes impactos para diferentes tecnologias FV;
- Corroborar o perfil semelhante na curva de transmitância espectral de diferentes amostras de sujeira, através da comparação do perfil de curva de transmitância espectral conhecido da literatura com o resultado obtido da medição de uma curva de transmitância, através de uma análise experimental para uma amostra de sujeira típica do Brasil;
- Verificar o impacto da não-homogeneidade de sujeira nas diferentes tecnologias FV;
- Reduzir o erro aleatório introduzido pelas condições ambiente nas medições, através de aumento da amostra;
- Levantamento das incertezas do processo de medição de curva IxV em campo, para medidas relativas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECURSO SOLAR

O Sol é uma fonte de energia limpa e praticamente inesgotável, com um potencial extremamente vasto para sua exploração na geração de energia, tanto térmica como elétrica. A geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico apresenta características específicas, que são percorridas nas seções subseqüentes.

2.1.1 RADIAÇÃO SOLAR

O constante processo de fusão nuclear, que ocorre através dos gases do Sol, é responsável pela emissão da radiação solar. Após atravessar toda o percurso entre a estrela e a Terra, a radiação solar chega ao topo da atmosfera terrestre com um valor chamado de constante solar extraterrestre (G_{sc}). Este valor é uma média da energia solar contida em todos os comprimentos de onda incidentes em uma unidade de área (Iqbal, 1983). Diversas medidas foram realizadas, através dos mais diferentes tipos de estações de medição (no nível do mar, em altas altitudes, em balões atmosféricos), e após diversos autores (Iqbal, 1983; Li *et al*, 2011) examinarem os valores medidos, o valor da constante solar extraterrestre ficou definido como:

$$G_{SC} = 1.367 \text{ W/m}^2$$

Assim que a radiação adentra a atmosfera terrestre, ela sofre atenuação através de dois fenômenos principais: dispersão através de moléculas de água e sujeira, suspensas no ar atmosférico; e absorção por moléculas de ozônio (O_3), gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) (Duffie, 1991). A Figura 1 mostra a distribuição espectral por comprimento de onda da radiação solar extraterrestre, e da radiação solar de um local com massa de ar $AM = 1$, céu limpo ($\beta = 0$, portanto influência de sujeira nula) e precipitação na atmosfera = 2 cm. A influência do efeito de dispersão é visto através da diferença da radiação extraterrestre e a radiação incidente em solo terrestre, e a influência do efeito de absorção é visto através das áreas pretas presentes na curva de radiação em solo terrestre.

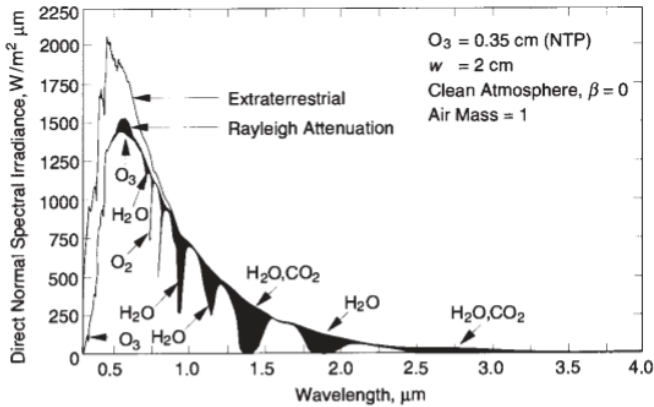


Figura 1 – Um exemplo da atenuação por dispersão e absorção da radiação na atmosfera terrestre (Iqbal, 1983).

Como o valor da radiação incidente sobre um plano qualquer na superfície da Terra depende de questões como a quantidade de atmosfera que a radiação extraterrestre atravessa (Massa de ar), assim como a hora do dia em que ela é medida, o valor padronizado de radiação solar para as condições padrão de teste (STC) é de:

$$G = 1.000 \text{ W/m}^2$$

As condições ambientes para que se atinja este valor são obtidas em um dia de céu aberto (sem nuvens), numa região próxima à Linha do Equador, no horário de meio-dia.

Devido aos fatores presentes na atmosfera, a radiação que chega ao solo pode ser dividida em dois componentes, radiação direta, que chega à superfície de interesse sem sofrer dispersão, e radiação difusa, que é a radiação que incide na superfície de interesse oriunda do processo de dispersão na atmosfera, ou até mesmo pela reflexão de outro corpo presente no solo terrestre (o que é chamado de albedo). A soma da radiação solar direta e difusa é denominada de radiação solar global. A Figura 2 apresenta os diferentes componentes da radiação solar terrestre.

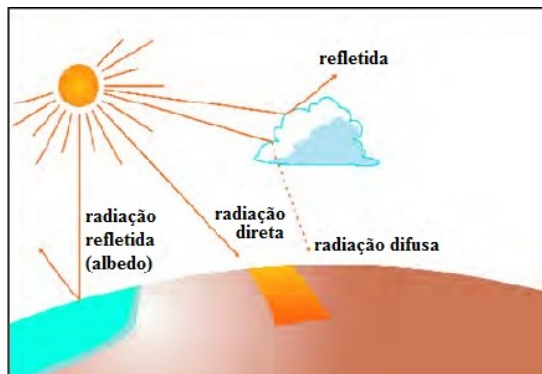


Figura 2 – Diferentes componentes da radiação solar terrestre.

2.1.2 MASSA DE AR - AM

A massa de ar da atmosfera terrestre, embora não seja um recurso solar propriamente dito, tem influência direta sobre o mesmo. A atenuação da radiação solar através da atmosfera não é a mesma para diferentes comprimentos de onda; portanto, a radiação solar que adentra a atmosfera terrestre não sofre somente alteração na sua intensidade, mas também na sua distribuição espectral (como já pôde ter sido visualizado na Figura 1).

O conceito de massa de ar é definido através da razão entre a distância de atmosfera terrestre que o raio solar deve atravessar até encontrar a superfície da terra e a menor distância possível percorrida por este mesmo raio solar (Duffie, 1991). Para esta situação, o valor da massa de ar (*AM - Air Mass*, do inglês) é igual a 1 (um). Um exemplo desta situação ocorre quando, no nível do mar, na linha do Equador, o Sol se encontra exatamente acima da superfície em questão (ângulo de zênite (θ_z) = 0°), o que acontece por volta do meio-dia no equinócio solar (DGS, 2008). A Figura 3 mostra, dentre outras grandezas, a definição de ângulo de zênite.

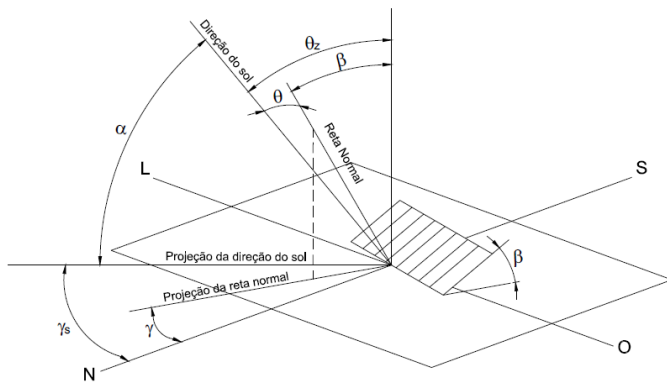


Figura 3 – Ilustração dos principais ângulos do sol, relativos ao dispositivo de interesse. O ângulo de zênite é descrito por θ_z (ABNT, 2006).

Conforme visto, o valor de massa de ar não dependerá somente do local no solo terrestre onde a superfície se encontra (variando entre latitude, longitude e altitude), mas também da hora do dia (variação da posição do sol em relação ao eixo leste-oeste) e da época (estação) do ano (variação da posição do sol em relação ao eixo norte-sul). A Figura 4 ilustra a variação da posição do sol em relação às estações do ano, para o hemisfério Norte. A variação do trajeto solar para o hemisfério Sul é feito de forma análoga.

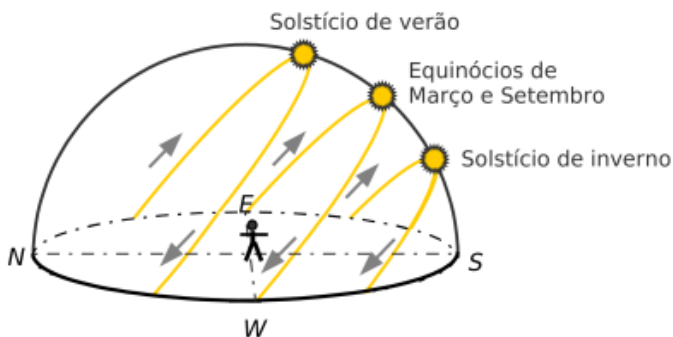


Figura 4 – Ilustração da variação da posição do sol em relação às estações do ano, para o hemisfério norte terrestre (variação em relação ao eixo norte-sul).

O valor de massa de ar padrão (condição STC) é de 1,5, que é uma média anual dos valores de massa de ar para regiões em médias latitudes, valor corroborado através de posteriores estudos (Bird, 1983; Ross, 1980; Gueymard, 2002).

2.1.3 ESPECTRO SOLAR

Conforme discutido, a radiação solar chega à atmosfera terrestre com um valor de $G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$. Após sofrer dispersão e absorção pelos elementos presentes na atmosfera (O_2 , partículas de água, CO_2 e particulados suspensos), este valor se altera, o que vem a resultar numa atenuação dos valores de radiação em todos os comprimentos de onda presentes no espectro solar. A Figura 5 mostra o espectro solar ASTM G173, que é o espectro padrão para avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos. A curva em vermelho mostra o espectro solar extraterrestre (AM 0) e a curva em azul representa o espectro solar padrão para a região do Colorado nos Estados Unidos, usando uma série de critérios específicos para esta região, como massa de ar e condições atmosféricas que incluem: espessura de coluna de água; espessura de coluna de ozônio; quantidade de particulados suspensos na atmosfera, entre outros.

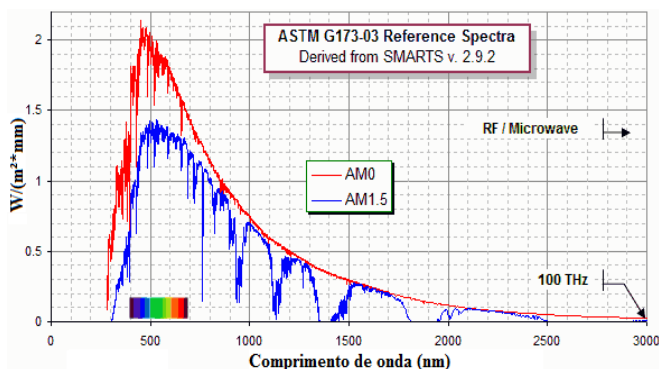


Figura 5 – Espectro padrão de referência ASTM G173, amplamente utilizado para análise de sistemas FV (ASTM, 2012).

O processo de dispersão dos raios solares, quando estes incidem numa partícula muito menor que o comprimento de onda de seus fótons, é explicado pela dispersão Rayleigh, presente nos menores comprimentos de onda. Geralmente ocorre pela incidência em moléculas

de ar e é bem observado nos comprimentos de onda entre 250 e 750nm. A absorção por gases presentes na atmosfera é o fenômeno responsável pela depleção dos valores de irradiância nos mais variados comprimentos de onda: Ozônio nos comprimentos de 250 e 500nm; Oxigênio em 750nm; partículas de água por volta de 800, 950, 1150, 1350 e 1750nm; e gás carbônico em 1350 e 1750nm (Iqbal, 1983). O efeito de absorção das duas últimas (H_2O e CO_2) depende da quantidade destes presentes na atmosfera.

Contudo, conforme foi mencionado, estes valores de espectro, que são adotados como padrão para o mundo todo, dependem fortemente da condição atmosférica local. A variação de valores como partículas de água suspensas no ar, partículas de sujeira e aerossóis, virá a influenciar nos valores de irradiância presente em cada comprimento de onda, o que cria uma forte dependência local em relação à variação espectral. Como a alteração destes elementos na atmosfera é dinâmica, a alteração de valores medidos de distribuição espectral pode ser significativa em medições realizadas com curto espaço de tempo entre si.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Energia Solar Fotovoltaica é a energia resultante do processo de conversão da energia proveniente do sol em energia elétrica. Este tipo de geração de energia apresenta peculiaridades interessantes e desejadas, por ser obtida de forma silenciosa, não-poluente e por utilizar uma fonte de energia renovável e praticamente inesgotável. Além disso, apresenta uma característica modular, podendo ser dimensionada numa ampla faixa de potência instalada e por ser um sistema estático, possui uma baixa taxa de manutenção, juntamente com um alto grau de confiabilidade do sistema (Rüther, 2004).

A conversão fotovoltaica acontece no dispositivo denominado célula solar fotovoltaica, quando um fóton da luz incidente excita um elétron do semicondutor a saltar a banda de valência para a banda de condução. Para que este elétron excitado possa resultar em uma corrente elétrica ele deve ser coletado nos terminais do dispositivo antes que ocorra o efeito da recombinação, situação na qual a energia do fóton que fora cedida ao elétron, é perdida sob a forma de calor. O material semicondutor mais utilizado na indústria é o silício (Si). Além do silício, também são utilizados semicondutores compostos como o telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, gálio e índio (CIGS), além de outros semicondutores compostos (Parida *et al.*, 2011).

2.2.1 MÓDULO FV

Os módulos FV são os principais componentes de um sistema fotovoltaico. São usualmente representados por uma fonte de corrente, gerando sempre corrente contínua.

O principal método de avaliação das características elétricas do gerador FV é através da curva característica ($I \times V$). Um exemplo desta curva é apresentado na Figura 6. Os principais parâmetros de uma curva $I \times V$ são: Corrente de curto-circuito (I_{sc}), que seria o valor máximo possível fornecido de corrente pelo módulo FV; Tensão de circuito aberto (V_{oc}), que, de forma análoga, representa o valor máximo possível de tensão fornecido pelo mesmo módulo; e ponto de máxima potência (MPP).

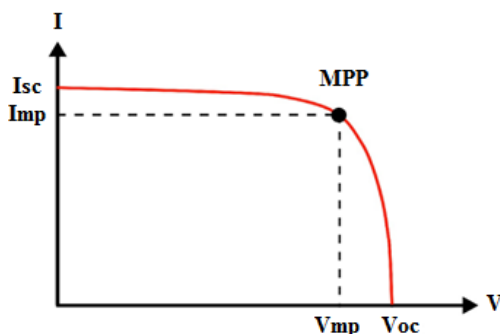


Figura 6 – Representação da curva característica $I \times V$ de um módulo FV, destacando seus principais pontos.

A curva característica ($I \times V$) permite uma completa visão dos parâmetros elétricos do módulo FV, sendo que o ponto de máxima potência (MPP) permite avaliar o estado de funcionamento do módulo, confrontando com o valor de potência de pico fornecido pelo fabricante.

O ponto de máxima potência nunca coincidirá com o produto dos extremos da curva (V_{oc} e I_{sc}). Isto ocorre principalmente por causa das não idealidades dos materiais do módulo. Resistências parasitas, tanto em série como em paralelo, são as principais responsáveis por estas perdas (Green, 1981). Quanto maior estas resistências, maior a perda e conseqüentemente menor o valor máximo de potência. A figura de mérito que avalia esta relação entre valor máximo prático e valor máximo possível é chamado de Fator de Forma (do inglês *Fill Factor*,

ou FF). A Figura 7 mostra esta relação. A curva azul presente na Figura 7 representa a curva PxV e é obtida substituindo os valores de corrente por potência no eixo vertical. Esta curva auxilia na visualização da localização do ponto de máxima potência na curva IxV, pois os valores no eixo horizontal são exatamente os mesmos (valores de tensão).

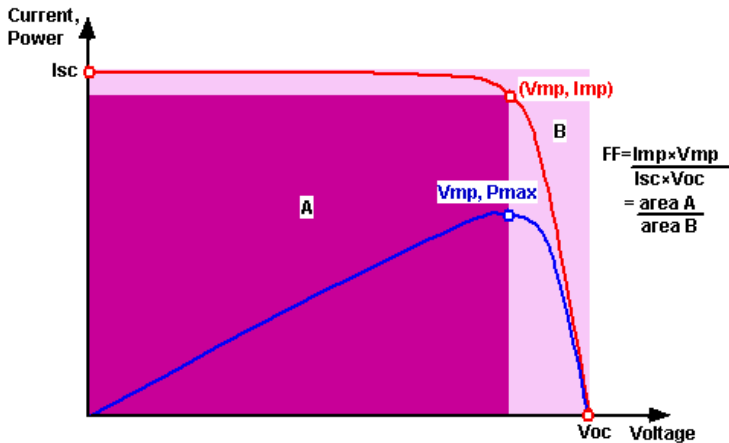


Figura 7 – Exemplo da relação entre valor máximo possível (representado pela área B – quadrado rosa) e valor máximo prático (área A – quadrado roxo) de potência de um gerador FV. A relação entre as áreas resulta no valor do Fator de Forma, conforme representado pela equação.

O ponto de operação de um módulo FV, ou uma associação de módulos, oscila sobre a curva IxV característica correspondente. Os dispositivos responsáveis pela interface de um arranjo fotovoltaico com a rede elétrica e também pela conversão da corrente contínua em alternada, os inversores, possuem componentes específicos, com algoritmos pré-estabelecidos, para buscar sempre o ponto de máxima potência do sistema FV.

Para a obtenção destas curvas IxV, equipamentos específicos, utilizando cargas resistivas e/ou capacitivas, adquirem uma sequência de pontos, para posterior obtenção da curva. Estes equipamentos são chamados de traçadores de curva IxV.

2.2.2 TECNOLOGIAS FV

As tecnologias FV podem ser divididas em três gerações de módulos FV. A primeira geração utiliza o silício (Si) como matéria-

prima, podendo ser utilizado com por seus diferentes tipos de cristais, mono (m-Si) ou multicristalino (p-Si). Apresentam células com elevada espessura (180-250 μm), e muito embora sejam a primeira geração, representam praticamente 90% da produção mundial de módulos FV (Fraunhofer, 2015). Isto acontece pelo constante empenho e avanços desta indústria, que tem conseguido aumentar sua eficiência de módulo FV e sua capacidade de produção.

A segunda geração surgiu com o intuito da redução de custos, através da redução da quantidade de material semicondutor utilizado e de custos de produção. Por apresentarem finas camadas de material semicondutor (da ordem de alguns μm a alguns nm), a geração é chamada de Filmes Finos. São três os principais componentes: o CdTe, líder na produção mundial de filmes finos; Disseleneto de cobre, gálio e índio (CIGS), que vem ganhando mercado através de suas melhorias tecnológicas; e o Silício, mas na forma amorfa (a-Si), que por sua vez vem diminuindo sua produção mundial ao passar dos anos por não conseguir demonstrar os ganhos em eficiência e redução de custos esperados.

Algumas outras novas tecnologias tentam ganhar escala mundial, prometendo custos consideravelmente menores que ambas as gerações anteriores. Uma tecnologia promissora é a das células solares sensibilizadas por corantes, mais conhecida como *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC), ou somente *Dye-cell*. Neste tipo de tecnologia, compostos orgânicos atuam juntamente com cristais de Óxido de Titânio (TiO_2). Muito embora os módulos apresentem baixo custo de produção, as eficiências são ainda baixas (em torno de 6%) e problemas com o encapsulamento dos módulos impedem a comercialização. Módulos FV feitos de compostos orgânicos e mistos (perovskitas e OPV, do inglês, *organic photovoltaics*), apresentam potencial de atingir a combinação de baixo custo e boa eficiência, mas também têm problemas práticos para escala comercial. (Parida, 2011; Chaar, 2011; Morgera, 2015; Razykov, 2011; Krebs, 2009).

A eficiência de uma célula ou módulo FV é um bom indicador de taxa de ocupação física de um sistema fotovoltaico. Um módulo com 20% de eficiência resulta em que o mesmo, nas condições padrão (STC), produziria 200 W por metro quadrado (m^2) ocupado. Seu valor é calculado pela razão entre a potência máxima fornecida pela célula (ou módulo) FV e o produto entre a área da célula, ou módulo FV e a radiação incidente sobre esta área.

A Figura 8 mostra o crescimento da eficiência das células FV ao longo dos anos, discriminado por gerações: a primeira geração, das células de silício cristalino em azul; a segunda geração, dos filmes finos, em verde; e a terceira geração, das novas tecnologias, em laranja. As curvas roxas são relacionadas a células de multijunção ou de Arsenieto de Gálio (GaAs), que são células de alta eficiência, porém de elevado custo e não se encontram em produção de escala comercial, apenas para aplicações espaciais.

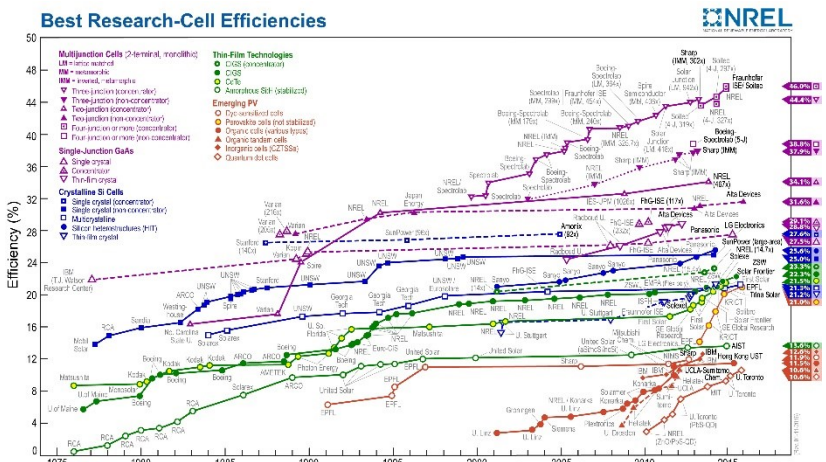


Figura 8 – Evolução da eficiência das células FV ao passar dos anos, discriminado por gerações de células FV (1ª geração em azul, 2ª geração em verde, 3ª geração em laranja) (NREL, 2016).

Eficiência de células FV são valores obtidos em laboratórios. Quando se tratando de eficiência de módulos FV, os valores de eficiência decaem, principalmente pela diminuição da transmitância imposta pelo vidro e material encapsulante (EVA) e por perdas de *mismatch* de corrente, devido à associação em série das células FV. A Figura 9 apresenta uma relação entre os melhores valores de eficiências obtidas em laboratório de células e módulos FV da mesma tecnologia. Cabe ressaltar que os valores comercialmente disponíveis de eficiências de módulos FV são ainda menores que os obtidos em laboratório.

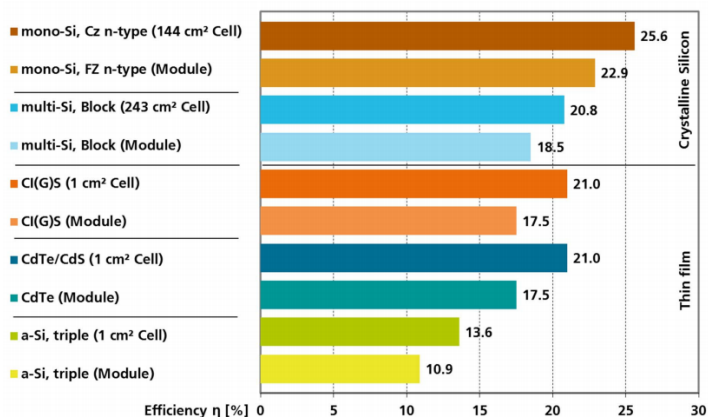


Figura 9 – Comparação entre os melhores valores de eficiência obtidos por células em laboratório (barras superiores de cada caso) X melhores módulos (barras inferiores), também obtidos em laboratório, por tecnologia FV (Fraunhofer, 2015).

A Figura 10 mostra a evolução da produção mundial de módulos FV nos últimos 25 anos, onde pode-se perceber o domínio do mercado mundial pela tecnologia de silício cristalino (em torno de 90%). A Figura 11 por sua vez apresenta a produção mundial somente de filmes finos, onde pode-se observar a diminuição na produção de silício amorfo, assim como o crescimento das tecnologias de CdTe e CIGS.

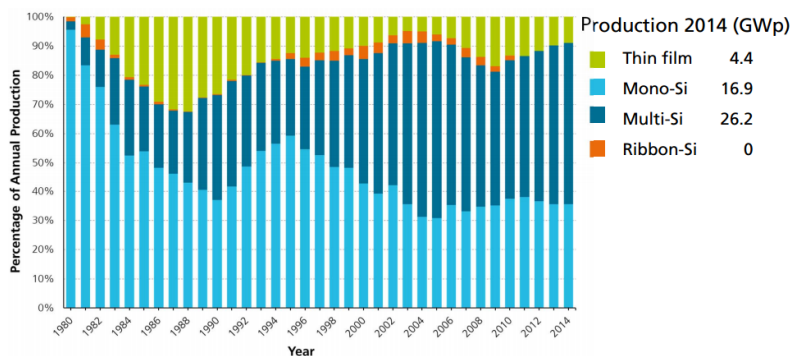


Figura 10 - Produção anual de módulos FV, discriminados por tecnologia (Fraunhofer, 2015).

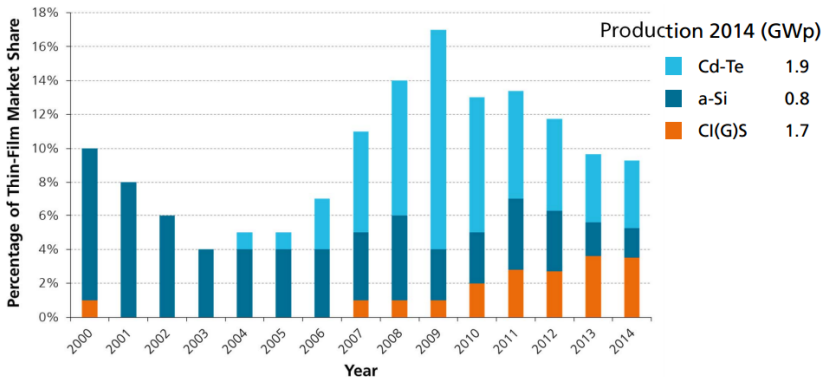


Figura 11 – Produção anual de módulos FV de filme fino, discriminados por tecnologia (Fraunhofer, 2015).

Os módulos FV apresentam aspectos construtivos diferentes. Módulos de silício cristalino são formados por células FV quadradas, com arestas em torno de 15 cm. Um módulo de silício cristalino geralmente é constituído de 60 ou 72 células, todas conectadas em série entre si.

Já os módulos de filme fino apresentam centenas de células de formato longilíneo. Suas células são de poucos milímetros de espessura, por um comprimento correspondente à altura ou largura do módulo, dependendo do fabricante e da tensão selecionada para o módulo FV.

Uma diferença construtiva entre módulos de filme fino é a disposição das células no módulo FV. Enquanto as células FV nos módulos de CdTe possuem a maior dimensão (maior aresta) de cada célula equivalente ao menor lado do módulo FV, as células dos módulos das tecnologias a-Si e de CIGS têm sua maior dimensão, ou aresta, da célula FV equivalente ao maior lado do módulo. As Figura 12 e Figura 13 exemplificam a disposição das células dos módulos de silício cristalino e de filme fino, respectivamente.

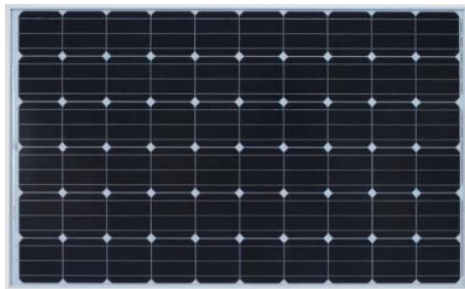


Figura 12 – Exemplo de módulo FV de silício cristalino de 60 células.



Figura 13 – Módulo FV de CdTe (imagem superior) e módulo de a-Si (imagem inferior), apresentando as diferenças construtivas relativas às células FV mencionadas.

Outro aspecto da diferença construtiva entre módulos de silício cristalino e filmes finos é a utilização de diodos de desvio (*by-pass*). Os

módulos de silício cristalino normalmente vêm equipados com 3 diodos de desvio, dividindo assim o módulo FV em 3 “submódulos” (de 20 células FV cada, para módulos FV de 60 células, ou de 24 células cada, para módulos de 72 células), de modo que, caso alguma célula FV seja sombreada (reduzindo assim a quantidade de corrente produzida pela célula), esta não venha a comprometer a potência total fornecida pelo módulo FV. A Figura 14 mostra o efeito do sombreadamento sobre apenas uma célula FV de um módulo integrante de uma série fotovoltaica (*string*) de 4 módulos em série. Cobrindo 50% desta célula FV, se o módulo FV não apresentar diodo de desvio, a corrente desta célula irá impor o valor de corrente por toda a série fotovoltaica. Já com a presença do diodo de desvio, somente uma parte deste módulo FV terá o valor da corrente comprometida.

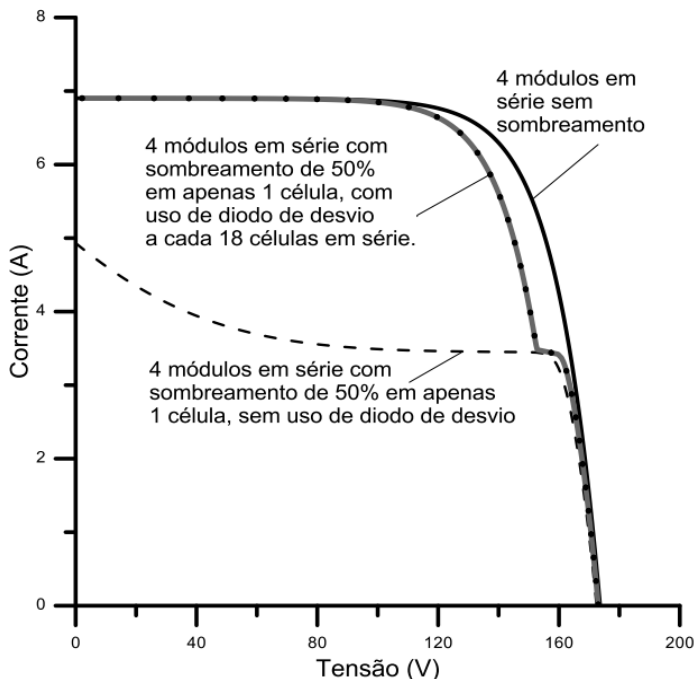


Figura 14 - Curva IxV para 4 módulos conectados em série sem sombreadamento (linha contínua); para 4 módulos em série com sombreadamento de 50% em somente uma célula FV de um dos módulos, sem a presença de diodo de desvio (linha tracejada) e com a presença de diodo de desvio (curvas com linha contínua e pontos). (Cresesb, 2014).

Os módulos de filme fino não apresentam diodo de desvio. O efeito de descasamento (*mismatch*) de corrente, presente nos módulos de silício cristalino pelo sombreamento de uma de suas células FV, não é percebido de mesma forma nos filmes finos, por causa do formato das células desta tecnologia (Gostein, 2014).

2.3 DESEMPENHO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Algumas figuras de mérito são mais utilizadas para a avaliação de desempenho de um sistema FV, destacando-se potência, energia, produtividade (*yield*) e taxa de desempenho (*Performance Ratio* - PR). As figuras de mérito usadas para avaliação de desempenho serão discutidas na seção 2.5.

A irradiância afeta de forma direta o desempenho de um sistema FV. Contudo, conforme previamente discutido, espessura da massa de ar atmosférica e também temperatura influenciam diretamente o desempenho de um gerador FV.

Como a maioria destas grandezas varia ao longo de um dia em um mesmo local, e principalmente de região para região, uma padronização faz-se necessária, para que se possa comparar sistemas FV. A padronização destes valores é chamada de STC (do inglês *standard test conditions*) ou condições-padrão de referência para ensaio. São definidos valores padrão para irradiância, massa de ar e temperatura na junção da célula solar fotovoltaica, sendo estas:

$$\begin{aligned} G &= 1.000 \text{ W/m}^2 \\ AM &= 1,5 \text{ (adimensional)} \\ T &= 25 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Estes valores foram definidos pela IEC (do inglês *International Electrotechnical Commission*, ou Comissão Internacional de Eletrotécnica), através de publicações normativas (IEC61853-1, 2011; IEC 60904-3, 2008).

As três condições-padrão não coexistem na natureza (Huld, 2013). Um módulo FV possui temperatura de operação de 25 °C somente no começo da manhã; uma irradiação de 1000 W/m² é medida, no plano do módulo FV, somente próximo ao meio dia solar; e massa de ar com valor de 1,5 dependerá da região geográfica onde se encontra o sistema FV, mas para regiões de latitude intermediária (onde estão

presentes os grandes centros populacionais), estes valores ocorrem no meio do período da manhã e da tarde.

Para efeitos de medição em campo, tanto os valores de temperatura, como os valores de irradiação podem ser corrigidos para os valores padrão através de relações lineares, o que permite que duas ou mais medições distintas sejam comparadas com a menor disparidade possível entre elas (IEC 60891, 2009).

2.3.1 Temperatura

A relação entre irradiação incidente sobre um módulo FV e energia produzida por este mesmo módulo é diretamente proporcional. Contudo, nem toda irradiação absorvida pelo módulo é convertida em energia. Esta irradiação não convertida resulta em aquecimento do módulo FV.

A relação entre a energia gerada e a temperatura do mesmo módulo FV é inversamente proporcional (Dubey, 2013). Os principais fatores que influenciam no valor da temperatura do módulo FV além da irradiância são a temperatura ambiente, padrão de nuvens e velocidade do vento, enquanto a variação da temperatura no módulo FV dependerá do material fotovoltaico constituinte e a posição (ou existência) de moldura (Kaldellis, 2014)

A temperatura influi nos valores de potência de saída, alterando os valores de tensão e corrente entregues pelo módulo FV. O aumento de temperatura resulta num leve aumento do valor de corrente, o que para efeitos de análise de desempenho do módulo FV chega a ser desprezível, e numa diminuição no valor de tensão. Fabricantes de módulos FV fornecem em seus catálogos técnicos os valores dos coeficientes de temperatura para estas grandezas elétricas. A Tabela 1 apresenta valores médios de coeficiente de temperatura de potência para as diversas tecnologias FV disponíveis no mercado, valores que podem variar de fabricante para fabricante.

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de temperatura de potência para diferentes tecnologias FV (Adaptado de Kaldellis, 2014).

Tecnologia	Coeficiente de temperatura (-%/ K)
Silício Multicristalino (p-Si)	0,45
Silício Monocristalino (m-Si)	0,40
a-Si	0,20
a-Si/ μ c-Si	0,26
CIGS	0,36
CdTe	0,25

Através destes valores de coeficiente de temperatura fornecidos pelo fabricante, pode-se estimar os valores reais de operação de tensão, corrente e potência de um módulo, ou sistema FV. Para isso, faz-se necessário a utilização de um sensor de temperatura para aferição dos valores de temperatura do módulo FV (geralmente utiliza-se um termopar, ou RTD - do inglês *resistance temperature detector* - acoplado ao módulo FV pela sua parte posterior (IEC 61853-1, 2011)).

2.3.2 Irradiação solar

A irradiação solar tem influência direta na potência de um módulo ou sistema FV. A relação entre o nível de irradiação recebido pelo módulo FV (irradiância) e sua corrente de operação é diretamente proporcional. Como os valores de irradiância variam mais que os valores de temperatura, e numa escala muito mais pronunciada durante o dia, a variação nos valores de corrente de operação é mais evidenciada. Isso resulta numa alteração considerável nos formatos da curva IxV de um módulo ou sistema FV muito mais observável pelo eixo da corrente, conforme a Figura 15 demonstra.

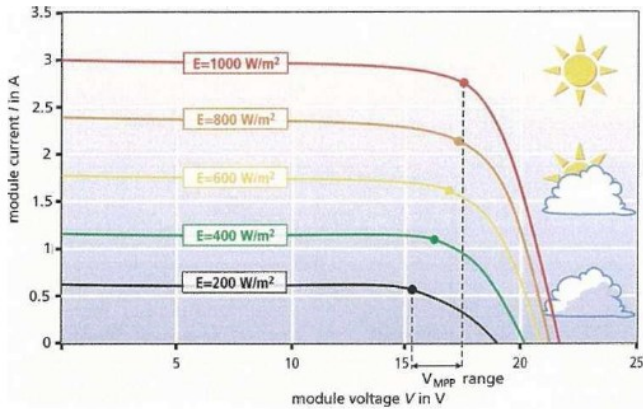


Figura 15 – Exemplos de curvas IxV para a variação de irradiação incidente sobre um mesmo módulo FV (DGS, 2008).

2.3.3 Resposta Espectral

A resposta espectral de determinada tecnologia FV é essencial para a compreensão da geração de corrente elétrica (Emery, 1998). O módulo FV, que é uma fonte de corrente, possui relação direta entre sua corrente gerada e a porção de irradiação que recebe. Uma maneira de calcular o valor de corrente de curto-circuito (I_{sc}) de determinado módulo FV é feita através da seguinte equação:

$$I_{sc} = A[SR_a(\lambda)]_{max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) SR(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Onde A (m^2) é a área útil do módulo FV, λ_1 e λ_2 (nm) são os limites (inferior e superior, respectivamente) de resposta espectral de determinada tecnologia FV, ou seja, a janela de comprimento de onda onde cada tecnologia FV aproveita a energia contida no espectro solar para efetuar o efeito fotovoltaico, $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$) é o espectro solar incidente no módulo FV, $SR(\lambda)$ (A/W) é o valor normalizado de resposta espectral, e $SR_a(\lambda)_{max}$ (A/W) é o valor de pico (amplitude) de resposta espectral de determinada tecnologia FV. (Alonso-Abella *et al*, 2014).

Esta equação demonstra a importância da resposta espectral no valor da corrente, e por sua vez da potência gerada por determinado módulo FV, uma vez que a resposta espectral irá apresentar diferentes valores para diferentes tecnologias FV. A Figura 16 e Figura 17

apresentam a resposta espectral relativa para as tecnologias fotovoltaicas consolidadas no mercado mundial.

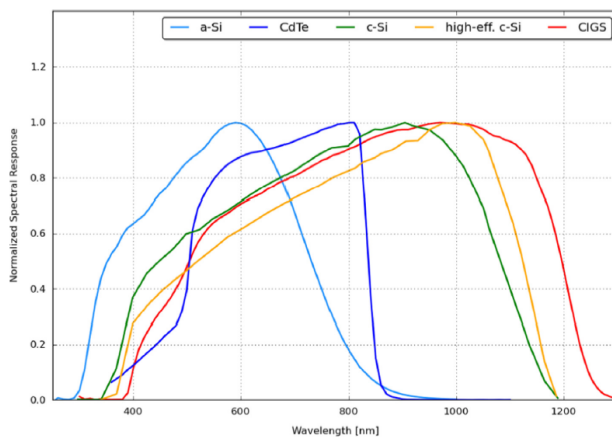


Figura 16 – Respostas espectrais normalizadas para diferentes tecnologias FV (Dimmeyer, 2015).

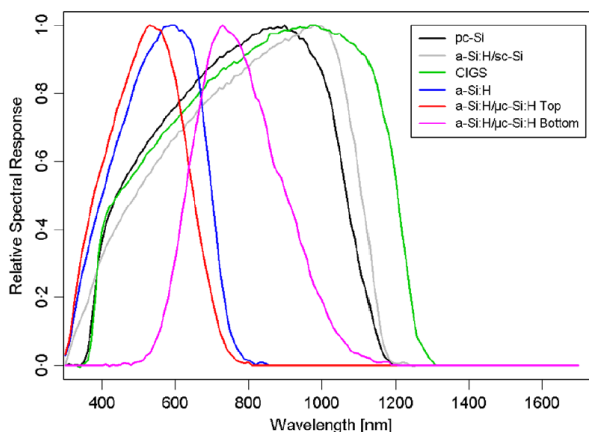


Figura 17 – Respostas espectrais normalizadas para diferentes tecnologias FV (Ishii, 2011).

Através da Figura 16 e Figura 17, pode-se perceber que determinadas tecnologias FV apresentam respostas espectrais mais estreitas (a-Si e CdTe), o que as tornam mais sensíveis às variações na distribuição do espectro solar (Nofuentes *et al*, 2014). Além disso, a-Si e

CdTe apresentam suas curvas de resposta espectral deslocadas para a esquerda, na região dos baixos comprimentos de onda (“resposta espectral mais azul”), onde elas apresentam melhor desempenho frente às demais tecnologias FV no verão, e em dias nublados (ambas condições possuem característica de “espectro solar azul”) (Alonso-Abella *et al*, 2014).

Já as tecnologias de silício cristalino e CIGS, por apresentarem resposta espectral mais ampla, são menos sensíveis às variações do espectro solar, e por sua vez não apresentam muita variação no desempenho no que diz respeito a variações climáticas ou sazonais (Dirnmeyer, 2015).

2.3.4 Perdas por descasamento (mismatch)

As perdas por descasamento elétrico, ou do inglês *mismatch*, sejam elas por corrente ou tensão, possuem as mais variadas origens, podendo ser tanto por causas permanentes, como causas temporárias. Olhando para a questão da queda de desempenho, as perdas podem ser calculadas pela diferença entre a potência nominal de um módulo, ou uma *string* de módulos FV e a potência real gerada pelo mesmo módulo ou *string* (Lorente *et al*, 2014).

As causas permanentes de perda por mismatch surgem das dispersões das características elétricas dos módulos. Módulos FV idênticos não apresentam exatamente os mesmos valores de tensão e corrente, devido a características intrínsecas ao processo de fabricação. Além disso, a degradação dos componentes do módulo FV com o tempo altera de forma diferente suas características elétricas, o que também resulta em descasamentos elétricos. Valores de degradação de 0,5% a 1% ao ano são observados na literatura (NREL, 2012)

Das causas temporárias, podem-se destacar a queda nos valores de corrente de operação, devido ao sombreamento de uma célula, ou parte de um módulo FV, conforme previamente discutido. Este sombreamento pode-se originar por um obstáculo no percurso da irradiação entre o sol e o módulo FV, ou pela deposição de sujeira sobre o módulo FV.

2.3.5 Acúmulo de sujeira (soiling)

Uma definição de *soiling* é a redução da irradiação solar efetiva devido à absorção, dispersão e reflexão por contaminantes presentes na superfície do módulo FV (Sinha, 2014).

A presença de particulados na atmosfera terrestre dá-se das mais diferentes formas, como por exemplo através de poluição, poeira, grãos de areia suspensos em tempestades e materiais orgânicos. A deposição destes materiais sobre os módulos FV representa um obstáculo para que a irradiação solar realize o efeito fotovoltaico. O acúmulo deste material na superfície de um módulo FV é tratado na literatura como *soiling*, ou na tradução livre do inglês, sujeira.

Após irradiação e temperatura, *soiling* pode ser o terceiro fator ambiental mais importante no impacto do valor da potência produzida por um sistema FV. Valores medidos de perdas anuais por *soiling* em um sistema FV são da ordem de 3-6%. Contudo, estudos apresentaram valores de perdas por *soiling* de 14%, anualmente, e chegando a 20%, quando medidos em bases mensais (Dunn, 2013).

Ainda que módulos FV sejam instalados com uma inclinação igual ou próxima a sua latitude local, para o aproveitamento máximo da irradiação solar ao longo de um ano (Dos Santos, 2012), algumas vezes esta inclinação não é suficiente para que os módulos sejam limpos sem uma ação externa (somente com chuva), ou por se encontrarem em clima árido, onde o regime de chuvas não é suficiente para a limpeza (podendo até mesmo permanecer por meses sem a ocorrência de chuvas), ou por se encontrarem em regiões de baixa latitude, onde a inclinação de instalação do módulo FV não é suficiente para um bom escoamento da sujeira somente através de chuvas (Qasem *et al*, 2012).

Embora o principal efeito do acúmulo de sujeira sobre o módulo FV seja a atenuação da irradiação incidente, esta não é a única causa que a sujeira implicará na redução de potência produzida pelo sistema FV. A sujeira depositada sobre os módulos também apresenta outros impactos na produção de energia, discutidos na seção a seguir.

2.4 INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NO DESEMPENHO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

2.4.1 Mismatch por não-homogeneidade de sujeira

Módulos FV de silício cristalino apresentam geralmente 60 ou 72 células, já os de filme fino possuem na casa de centenas de células FV muito finas e longas. Conforme discutido, pelo aspecto construtivo, módulos de silício cristalino utilizam diodos de desvio, para que uma célula FV que esteja sombreada não comprometa a corrente gerada pelas demais células que não apresentam sombreamento.

Este raciocínio se aplica para a distribuição não uniforme de sujeira sobre o módulo FV. As Figura 18 e Figura 19 mostram padrões de sujeira não-homogêneos observados. As variáveis climáticas também possuem grande influência nessa formação deste padrão de sujeira, através de ventos que acabam por concentrar a sujeira em uma porção do módulo FV.

Módulos FV com grande concentração de sujeira podem apresentar padrão não uniforme, mesmo sem a presença de fortes ventos, após uma chuva fraca que não venha a lavar os módulos por inteiro, podendo ocorrer até mesmo em módulos sem moldura (Qasem, 2013).



Figura 18 – Não uniformidade de sujeira (Lorenzo *et al.*, 2013)

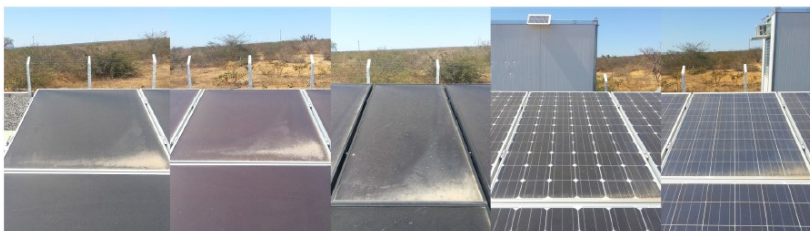


Figura 19 – Não uniformidade de sujeira em sistema FV na Bahia, gerada pelos fortes ventos provenientes do Leste na região.

Uma análise foi realizada utilizando um módulo de silício cristalino de 72 células (Gostein, 2013), com três subséries, divididas entre si por três diodos de desvio, onde cada subsérie apresenta 24 células. A Figura 20 demonstra o diagrama elétrico do módulo.

Para a análise, dois filtros foram utilizados para simulação de sombreamento, e estes filtros foram colocados de forma a sombrear somente uma fileira de células FV: ou uma fileira de 6 células, comprometendo as 3 subséries de células; ou uma fileira de 12 células, comprometendo somente 1 subsérie. Os resultados são apresentados na Figura 21.

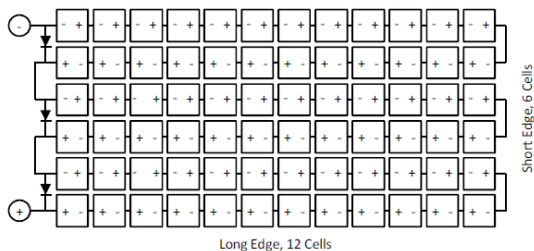


Figura 20 – Diagrama elétrico do módulo FV (Gostein, 2013).

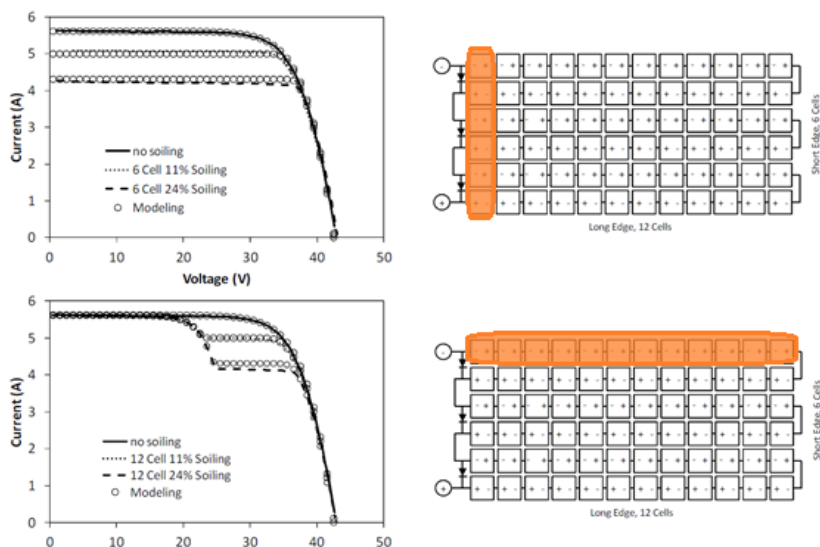


Figura 21 – Curvas IxV do módulo FV sombreado de forma não homogênea, na fileira de 6 células (gráfico de cima) e na fileira de 12 células (gráfico de baixo), com suas respectivas representações da forma de sombreamento ao lado, apresentando curvas obtidas através da ausência de filtro (curva contínua), com filtro que simula 11% de concentração de sujeira (curva pontilhada), filtro de 24% de concentração de sujeira (curva tracejada), e obtida através de simulação computacional (curva de bolinhas) (Gostein, 2013).

Este efeito é explicado pela dissipação de corrente na célula sombreada, imposta pelas células não sombreadas (Qasem, 2013). Como estão associadas em série, a célula sombreada irá dissipar a corrente gerada pelas células adjacentes não-sombreadas, resultando em perda térmica e aquecendo a célula. Conforme previamente apresentado, o aumento de temperatura diminui o valor de tensão da célula.

Este raciocínio, de forma análoga, pode ser utilizado para o caso de módulos de filme fino. Conforme discutido, módulos de filme fino não apresentam diodos de desvio; portanto no caso de sombreamento não-homogêneo de um módulo FV, ou até mesmo entre módulos FV de uma mesma *string*, o valor de tensão do arranjo será reduzido.

Ainda que as figuras de mérito utilizadas não sejam o objetivo da análise neste momento, é importante perceber que a não homogeneidade da sujeira comprometeria a análise de perda de desempenho causada pela mesma, caso esta viesse a ser realizada através dos valores de corrente de curto-circuito, uma vez que esta análise não estaria considerando as perdas associadas aos valores de tensão. O mesmo não se aplicaria para a análise por valores de ponto de máxima potência. As figuras de mérito para avaliação de sujeira são discutidas em seção mais adiante.

2.4.2 Seletividade Espectral

Um aspecto importante e imprescindível quando se deseja comparar o impacto da sujeira no desempenho de sistemas FV de diferentes tecnologias é a questão de como a sujeira influencia na transmissão da irradiação solar incidente.

Este efeito é explicado pela dispersão de Mie, que se aplica quando a partícula responsável pela dispersão da luz (neste caso a partícula de sujeira) apresenta diâmetro da mesma ordem de grandeza, ou maior que o comprimento de onda da luz incidente (Cox, 2002; Saito, 2011).

Partículas de sujeira, que na sua maioria são constituídas de lodo, argila e grãos de areia, têm seu diâmetro na ordem de micrômetros (μm). Os comprimentos de onda perceptíveis pelas tecnologias FV começam na casa de 200 nanômetros (nm), que caracterizam o “espectro azul”, chegando até 1,2 micrômetro (μm), responsável pelo “espectro vermelho”.

O experimento de Qasem *et al.* (2012) define que o impacto da dispersão de Mie pela sujeira depositada sobre módulos FV é acentuada

nos menores comprimentos de onda (Qasem *et al.*, 2012), o que faz com que a sujeira tenha uma característica de transmitância espectro-seletiva.

Para o experimento realizado por Qasem *et al.* (2012), uma amostra de sujeira foi colhida, levada a laboratório para análise de sua constituição e concentração. O resultado é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição de grãos da amostra de sujeira e tipos de sedimento (Adaptado de Qasem *et al.*, 2012).

Diâmetro (µm)	% da amostra	Tipo de grão
1000-500	0,00	Areia grossa
500-250	0,00	Areia média
250-125	0,82	Areia fina
125-63	4,78	Areia muito fina
63-31	8,16	Silte grosso
31-16	16,47	Silte médio
16-8	23,82	Silte fino
8-4	20,19	Silte muito fino
< 4	25,75	Argila

Posteriormente, a amostra de sujeira foi analisada em um espectrômetro com intervalo de medição de 300 a 1200nm. A Figura 22 apresenta o gráfico da transmitância percentual relativa para diferentes comprimentos de onda em amostras com diferentes concentrações de sujeira. Este percentual é calculado em relação ao vidro limpo, visando analisar somente o valor de transmitância da sujeira.

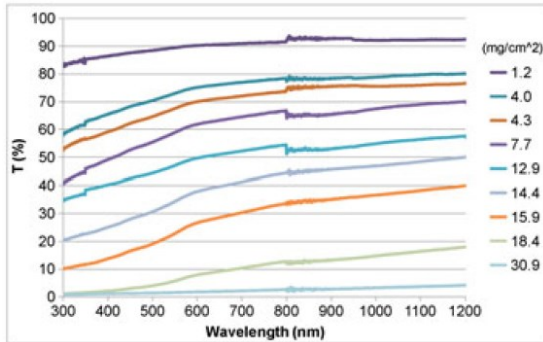


Figura 22 – Transmitância percentual para diferentes comprimentos de onda, em diferentes concentrações de sujeira (diferentes curvas) (Qasem *et al.*,2012).

Por fim, foi simulado o impacto da seletividade espectral da sujeira para cada tecnologia FV. As respostas espectrais de cada tecnologia foram corrigidas pela transmitância obtida para diferentes concentrações de sujeira e a curva obtida foi integrada com o espectro padrão. Os valores de queda no valor de corrente na relação módulo FV limpo/sujo, para diferentes concentrações de sujeira são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Diferença percentual de corrente entre módulo limpo/sujo para diferentes concentrações de sujeira (Adaptado de Qasem *et al.*,2012)

Densidade (mg/cm ²)	a-Si (%)	CIGS (%)	CdTe (%)	c-Si (%)
1,2	-10,8	-9,1	-9,7	-9,1
4,25	-33,0	-28,5	-30,1	-28,6
14	-66,0	-59,6	-61,9	-59,6
19	-77,4	-70,6	-73,1	-70,6
30	-98,4	-97,8	-98,1	-97,8

Como pode ser visto, tecnologias FV com largura de resposta espectral concentrada em baixos comprimentos de onda (a-Si e CdTe) apresentam maiores perdas em relação a tecnologias com respostas espectrais mais amplas (CIGS e c-Si).

2.5 PARÂMETROS DE DESEMPENHO PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA FV

Para que seja possível comparar sistemas FV de diferentes tecnologias, que apresentem diferentes configurações, ou até mesmo que estejam em localidades diferentes, parâmetros de desempenho foram estipulados para que esta comparação possa ser realizada sem que as características acima citadas influenciem no resultado (Marion, 2005).

Os principais parâmetros de avaliação de desempenho para sistemas FV são: Produtividade (ou *Yield*, em inglês); e Taxa de Desempenho (PR, do inglês *Performance Ratio*).

2.5.1 PRODUTIVIDADE - YIELD

A produtividade de um sistema FV é o resultado da razão entre a energia de saída, ou seja, entregue pelo sistema FV para a rede elétrica, e a potência total de módulos FV instalados no sistema (potência nominal instalada).

Através desta relação, sistemas FV de diferentes tamanhos e até de diferentes tecnologias FV podem ser comparados quanto à sua produção de energia. A fórmula para cálculo de *Yield* é apresentada a seguir:

$$Yield_t = \frac{E_t}{P_o} \quad (2)$$

Onde $Yield_t$ representa a produtividade de energia para a base temporal t , E_t é a energia produzida pelo sistema fotovoltaico para o mesmo período, dada em kWh, e P_o é a potência nominal do sistema fotovoltaico, dada em kW_p. Portanto, a unidade de *Yield* é dada por kWh/kW_p.

Contudo, a comparação de sistemas FV por *Yield* não apresentará uma aproximação válida para sistemas com diferentes arranjos e para sistemas sob diferentes condições ambientais. Para estas ocasiões, a comparação realizada através de Taxa de Desempenho (PR) apresenta melhor aproximação.

2.5.2 TAXA DE DESEMPENHO - PR

A Taxa de Desempenho (ou Performance Ratio - PR) é a normalização dos valores de produtividade para valores de irradiância medidas no plano do módulo FV. A análise de um sistema através de valores de PR representa os valores de perda deste sistema produzidas por: perdas no inversor, perdas por descasamento elétrico (*mismatch*), perdas por temperatura, perdas de irradiação por sombreamento ou sujeira, desligamentos ou falhas (Marion, 2005). A fórmula de PR é calculada através de:

$$PR_t = \frac{E_t}{P_o} \times \frac{G}{H_t} \quad 3)$$

Onde PR_t representa a taxa de desempenho para o período t , E_t é a energia gerada pelo sistema fotovoltaico para o período t , em kWh, P_o representa a potência nominal do sistema FV, dada em kWp, G é o valor de irradiância de referência (1000 W/m^2), e H_t é a irradiação incidente sobre o plano dos módulos FV para o período t , dada por kWh/m².

A PR é um parâmetro muito utilizado, pois possibilita a comparação de sistemas entre locais, e com configurações diferentes. A Taxa de Desempenho (PR) pode ser calculada somente para o lado de corrente contínua, assim desconsiderando perdas de eficiência do inversor, já que para este estudo não serão relevantes. A Taxa de Desempenho para corrente contínua é denominada PR_{CC} .

2.6 FIGURAS DE MÉRITO PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA SUJEIRA SOBRE DESEMPENHO DE SISTEMAS FV

Diversas figuras de mérito são utilizadas na literatura para a avaliação dos efeitos da sujeira no desempenho de um gerador solar fotovoltaico. Mesmo que todas as interpretações sejam realizadas de forma correta, algumas figuras de mérito apontam para questões diferentes de outras no que diz respeito ao impacto no desempenho do sistema.

As figuras de mérito mais utilizadas na literatura são calculadas através de corrente de curto-circuito (I_{sc}) ou potência no ponto de máxima potência (P_{mpp}). Avaliações através de I_{sc} são mais facilmente

executadas e utilizam equipamentos de menor complexidade; entretanto só apresentam boa aproximação do valor real do impacto da sujeira no desempenho quando esta apresenta padrão uniforme (Gostein, 2013).

A escolha pouco adequada de uma figura de mérito para a avaliação de desempenho de um sistema FV pode gerar uma interpretação equivocada no impacto do desempenho causado pela sujeira. Um exemplo disso é a utilização da grandeza de corrente de curto-circuito (I_{sc}) para avaliação de sistemas com mais de um módulo FV, ou até mesmo para avaliar um módulo FV, onde ambos apresentem padrão de sujeira não-homogênea, conforme já discutido na seção 2.4.2.

Segundo *Gostein et al.*, se o objetivo é calcular a influência da sujeira como um fator de atenuação da irradiância vista pelo módulo ou sistema FV, então deve-se usar a análise através de I_{sc} . Se o objetivo é verificar o impacto de *soiling* como atenuante da potência de saída do arranjo FV, então o método utilizando P_{mpp} é o correto. Entretanto, conforme previamente apresentado, isto não é necessariamente verdade. Os argumentos para tal afirmação serão apresentados em seções a seguir.

Diferentes autores (Zorrilla-Casanova et al., 2013; Qasem et al., 2012; Gostein et al., 2014; Caron, 2013) utilizam I_{sc} como figura de mérito para suas avaliações. Além de representar somente boa aproximação para o caso de sujeira uniforme, a maioria das análises são realizadas em ambiente controlado (laboratórios com simuladores solares e controle de temperatura ambiente), tornando a aferição de temperatura do módulo FV mais apropriada. Contudo, tal situação não acontece de mesma maneira quando a análise é realizada em campo.

Outros autores (Massi Pavan et al., 2013; Guo, 2015) utilizam P_{mpp} como uma das figuras de mérito para a análise, para um posterior cálculo de PR. Contudo, diferentes dispositivos, com diferentes padrões de incerteza, são utilizados para as medições das grandezas elétricas e ambientais. Para o cálculo de PR realizado, o número de dados (variando em resolução temporal e tempo de amostragem) utilizados torna o cálculo complexo, necessitando assim de equipamentos dedicados somente para registro e cálculo dos resultados.

Schill (2015) utiliza P_{mpp} para o cálculo de percentual de perda por sujeira, obtido através de curvas $I \times V$ traçadas em resolução temporal de 10 minutos, num monitoramento constante de um mesmo módulo FV. Embora não utilize a mesma metodologia do presente estudo, esta é uma avaliação de perda de desempenho através de curvas $I \times V$.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, duas frentes foram realizadas: uma através da avaliação experimental de uma amostra de sujeira coletada que, utilizando os resultados obtidos da análise, e contrastando com os resultados conhecidos da literatura, teve como objetivo confirmar o mesmo perfil da curva de transmitância espectral para ambas avaliações; e outra frente que consistiu em três visitas distintas a sistemas FV, visando avaliar o procedimento de medição de parâmetros elétricos dos sistemas FV, e através destes valores obtidos, poder comparar o impacto que o mesmo tipo de sujeira apresenta sobre as diferentes tecnologias FV. A avaliação do procedimento de medição consistiu no levantamento de possíveis melhorias ao final de cada visita, e em cada nova visita, as melhorias sugeridas para o processo de medição anterior foram implementadas.

Os materiais utilizados para cada frente deste estudo, assim como a explanação detalhada de cada procedimento efetuado para cada etapa do método implementado são descritas nas subseções a seguir.

3.1 PARTE EXPERIMENTAL – SELETIVIDADE ESPECTRAL DE AMOSTRA DE SUJEIRA

O experimento realizado por Qasem et al (2012), onde foram obtidas curvas de transmitância espectral em relação a diferentes comprimentos de ondas, para diferentes concentrações de sujeira, são válidas para aquela amostra de sujeira em específico.

O perfil de sujeira varia, principalmente, em constituição, densidade e tamanho de partícula, no que diz respeito à mudança do local em que se encontra o sistema FV (Darwish, 2015).

Dependendo da composição do solo e da cobertura vegetal presente no local onde opera o gerador solar FV; de aspectos climáticos do local, como regime de chuvas e ventos; assim como dos aspectos construtivos do módulo FV presente no sistema (textura do vidro e presença ou não de modura), a densidade de sujeira sobre o módulo FV também sofre variação, conforme previamente apresentado (não-homogeneidade de sujeira).

Um experimento semelhante ao de Qasem *et al.* (2012) foi realizado, visando corroborar que a curva de transmitância espectral obtida por ele apresenta o mesmo perfil para diferentes tipos e concentrações de sujeira. Buscou-se verificar o mesmo comportamento

descrito, onde a sujeira apresenta uma maior atenuação do níveis de irradiância para menores comprimentos de onda, em relação aos maiores comprimentos de onda, comportamento este replicado para diferentes concentrações de sujeira.

Para isso, foi utilizada uma amostra de sujeira das imediações do sistema FV do laboratório Fotovoltaica/UFSC, localizado no norte da ilha de Florianópolis-SC. Esta amostra de sujeira foi submetida a método semelhante ao de Qasem *et al.* (2012), para a avaliação. O método consistiu nos seguintes procedimentos:

- Coleta de amostras;
- Análise de distribuição de tamanho de partículas (granulometria) das amostras;
- Deposição de amostra sobre placas de vidro, em diferentes concentrações (mg/cm²);
- Medição da seletividade espectral das diferentes concentrações.

Uma amostra de material particulado foi coletada no entorno do sistema FV instalado em solo. Por ser uma região de grande incidência de chuvas, não foi possível coletar diretamente da superfície do módulo FV. Por este motivo, o material coletado foi posteriormente peneirado em uma peneira metálica de 350µm, simulando assim condições de amostra de sujeira encontradas por diferentes autores em módulos FV (Qasem *et al.*, 2012; Saito, 2011; Darwish, 2015).

A análise de granulometria foi realizada por um analisador de tamanho de partículas através de dispersão a laser (MasterSizer 3000, da fabricante Malvern), no laboratório de materiais vitrocerâmicos Vitrocer-UFSC.

Após análise de granulometria, o material foi depositado sobre placas de vidro de tamanho 10cm x 10cm, com espessura de 2mm. Para a pesagem do material, foi utilizada uma balança de precisão de 0,01mg.

Para garantir que o material não se dispersasse no transporte e durante a realização do experimento, um anel de contenção foi utilizado. Foi também utilizada uma segunda placa de vidro para a contenção do material particulado no transporte e armazenamento das placas de vidro. A segunda placa de vidro foi retirada no dia da análise, reproduzindo assim condições semelhantes às de um módulo FV.

Por fim, a transmitância espectral de cada amostra foi medida a céu aberto sob luz solar real, utilizando o espectroradiômetro MS-720, da Eko Instruments, instrumento que mede a distribuição espectral de

irradiância na faixa de 350 a 1050nm, com resolução de 1nm. A Figura 23 mostra o instrumento utilizado.

Foram realizadas três medidas para cada amostra, garantindo assim a repetibilidade da medida. Todas as amostras foram normalizadas para suas respectivas medidas de referência (medida realizada de uma placa de vidro idêntica mas limpa, sempre em momento instantaneamente anterior à medição de uma placa de vidro com sujeira), garantindo assim que a variação do espectro solar não afetasse as medidas e também que a transmissão espectral do vidro não impactasse nos valores das medidas.



Figura 23 – Instrumento (espectroradiômetro) utilizado na avaliação das diferentes concentrações de sujeira.

3.2 OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE CURVAS I X V

O método definido para avaliar a perda de desempenho por acúmulo de sujeira é a obtenção de valores de ponto de máxima potência (Pmpp), obtidos através da aquisição de curvas IxV características de cada gerador FV. Diversos são os autores que utilizaram deste método (Schill, 2015; Haerberlin, 1998; Lorenzo, 2013; Brooks, 2013; Gostein, 2013; Alonso-García, 2006).

Para a avaliação do impacto no desempenho do sistema pela sujeira presente nos módulos FV, a medição IxV em campo é o processo mais adequado, pois é o método que, além de não necessitar de intervenções na instalação do sistema FV, como retirada de módulos para análise, por exemplo, consegue realizar a medição de potência

instantânea de um único módulo, uma *string* de módulos, ou dependendo das restrições do equipamento utilizado, do sistema FV completo em uma única medida.

O processo de aquisição de curvas IxV, obtidas através do equipamento específico denominado traçador de curvas IxV, apresenta incertezas inerentes à aquisição e correção dos dados que formam a curva. Contudo, no caso desta análise, foram sempre realizadas duas aquisições distintas (duas curvas IxV, uma com o módulo, ou sistema FV, sujo, e outra com o sistema limpo) que serão relacionadas entre si, através de uma razão. Por se tratar de medidas relativas (sujo x limpo), as incertezas inerentes ao instrumento de medição (porém não todas as incertezas inerentes ao processo de medição) acabam por reduzir-se consideravelmente.

O método consiste nos seguintes passos:

- 1) Aquisição de curva IxV realizada no sistema fotovoltaico em questão, realizada sem nenhuma intervenção no que diz respeito à sujeira depositada sobre os módulos FV (“medida suja”);
- 2) Limpeza dos módulos FV do sistema, ou porção do sistema, analisado;
- 3) Aquisição de curva IxV, realizada na mesma configuração elétrica efetuada no passo 1 (“medida limpa”);
- 4) Cálculo do índice de perda de desempenho do sistema fotovoltaico originado pela sujeira, através da relação entre os valores de Pmpp obtidos nos passos 1 e 3;

As aquisições das curvas IxV dos passos 1 e 3 foram realizadas adquirindo valores de irradiância e temperatura dos módulos nos mesmos instantes das caracterizações da curva IxV, visando controlar as variáveis ambientais e para permitir posterior correção dos valores para as condições padrão STC.

Os valores de irradiância foram adquiridos pela célula de referência do próprio equipamento e as medições de temperatura do módulo FV foram efetuadas por instrumentos independentes, apropriados para a aquisição daquelas grandezas.

Uma vez caracterizada a curva IxV, o valor de Pmpp de cada curva foi obtido, como previamente apresentado, e através do cálculo

descrito no passo 4, foi possível obter o valor de perda de desempenho devido ao acúmulo de sujeira no gerador FV.

O equipamento para aquisição de curvas IxV, o procedimento de limpeza dos módulos FV, e a figura de mérito utilizada para a análise são discutidos nas subseções a seguir.

3.2.1 EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE CURVAS I x V

As aquisições de curvas IxV, para os sistemas sujos e limpos, foram realizadas utilizando um traçador de curvas IxV, modelo PVPM1000C. A Figura 24 mostra o equipamento utilizado.

O equipamento realiza a medição da curva IxV através do método de quatro cabos, onde valores de tensão e corrente são medidos independentemente. Diversos valores instantâneos de tensão e corrente são adquiridos através da variação de uma carga capacitiva, e então a curva característica do gerador fotovoltaico é traçada. O traçador também dispõe de uma célula de referência, responsável por adquirir os valores instantâneos de irradiância no instante exato da aquisição da curva IxV.



Figura 24 – Traçador de curvas IxV utilizado – PVPM 1000C

O equipamento apresenta incertezas associadas aos processos de medição das variáveis ambientais e incertezas do processo de correção para os valores de STC. Os valores de incertezas para a aquisição dos valores elétricos do módulo e posterior correção para STC dos pontos que constituem a curva IxV são inferiores a 1%; a célula de irradiância apresenta uma incerteza de 3-4% para aquisição dos valores e as incertezas totais, que englobam todas as incertezas do processo para aquisição dos valores absolutos de potência, já corrigidos para as

condições STC, são de 5% (Wagner, 2000). Cabe ressaltar que o próprio traçador IxV já efetua as correções dos valores de temperatura e irradiância, utilizando os métodos da norma IEC 60891 (2009) previamente discutidos.

As medições foram realizadas respeitando a norma internacional IEC 60904-1 (2006), que define os procedimentos para medições de curvas IxV, como valores mínimos de irradiância, calibração e posicionamento dos sensores e como efetuar a medição. O próprio manual do equipamento refere-se a esta norma como procedimento padrão de medição.

Deve-se ressaltar que as medidas dos sistemas sujos e limpos foram feitas com o mesmo equipamento, nas mesmas condições e sofreram as mesmas correções das medições dos sistemas FV limpos. Por este motivo, as incertezas no resultado da avaliação de sujeira, proveniente dos resultados individuais de cada curva IxV medida (exatidão da medida), por terem sido relativizadas entre si, foram consideradas as mínimas possíveis para este trabalho e foram desconsideradas.

As incertezas consideradas para esta análise são referentes aos valores de reprodutibilidade do instrumento, que é a incerteza relacionada à precisão do resultado de medidas consecutivas realizadas para o mesmo gerador FV, variando as condições ambientais.

Esta incerteza é fruto principalmente da alteração das condições ambientes do ensaio: variação da temperatura dentro de um mesmo módulo FV, ou entre módulos FV de um mesmo sistema; e variações na distribuição espectral incidente.

A incerteza de reprodutibilidade do instrumento, segundo o fabricante, é de $\pm 2\%$. Esta portanto, é a incerteza total, considerada neste estudo, do valor de perda por desempenho do sistema FV imposto pela sujeira.

3.2.2 LIMPEZA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Alguns documentos de fabricantes evidenciam métodos diferentes para a realização da limpeza dos módulos (First Solar, 2013), basicamente sendo divididos em dois subgrupos, limpeza com água e limpeza a seco.

Ambos métodos foram testados e a limpeza com água apresentou melhores resultados, sendo este o método utilizado. A limpeza foi sempre realizada sem a utilização de detergentes ou outras substâncias abrasivas e com utensílios com materiais de silicone ou

borracha leve, para facilitar a remoção da camada de sujeira e visando não comprometer a integridade dos módulos FV. O método de limpeza, previamente testado e que foi utilizado nesta análise, consiste nos seguintes passos:

- Aplicação de água no módulo FV;
- Utilização de um rodo de borracha leve, ou silicone, para a remoção da camada grossa de sujeira;
- Utilização de um pano de algodão macio molhado, para a remoção da camada impregnada de sujeira;
- Utilização de um pano de algodão macio seco, para o acabamento.

3.2.3 FÍGURA DE MÉRITO UTILIZADA

A figura de mérito proposta para este estudo e utilizada para quantificar a perda de desempenho do sistema FV pela sujeira foi o índice calculado utilizando valores medidos de potência de operação (P_{mpp}), pelos fatores previamente discutidos.

O cálculo da figura de mérito foi efetuado através da seguinte equação:

$$GP(\%) = \frac{P_{Limpo} - P_{Sujo}}{P_{Limpo}} \quad (4)$$

Onde GP representa o ganho de potência percentual, P_{Limpo} é o valor de potência no ponto de máxima potência de operação do sistema FV limpo, e de forma análoga, P_{Sujo} representa o mesmo valor do sistema sujo.

3.3 SISTEMAS FV AVALIADOS

As análises de perda de desempenho por sujeira foram realizadas em dois sistemas FV diferentes, localizados nas cidades de Brotas de Macaúbas, no estado da Bahia, e Buritis, no estado de Rondônia. A Figura 25 apresenta a localização de cada sistema no mapa. As descrições detalhadas de cada município, assim como de cada sistema FV avaliado estão apresentadas nas subseções a seguir.



Figura 25 – Localização dos municípios onde os sistemas FV analisados neste trabalho estão instalados.

3.3.1 SISTEMA FV BROTAS DE MACAÚBA - BA

Um dos sistemas analisados neste estudo é o sistema FV localizado no centro geográfico da Bahia, em Brotas de Macaúba, e faz parte do P&D Solar Statkraft/UFSC. As informações do município são:

- Posição geográfica: 11° 59' S, 42° 37' O;
- Altitude: 900 m;
- Clima: Semiárido e seco a sub-úmido, ou Aw;

Trata-se de um sistema fotovoltaico instalado no interior da Bahia, próximo ao município de Seabra, que teve sua operação iniciada em dezembro de 2013. O sistema FV encontra-se instalado no terreno de uma usina eólica, portanto uma região com regime intenso de ventos. O entorno do sistema FV não possui construções, somente vegetação rasteira típica da região. Lá são encontrados cinco subsistemas de aproximadamente 2kW_p, contendo as tecnologias FV em silício monocristalino (m-Si) e multicristalino (p-Si), bem como as tecnologias de filmes finos de CIGS, silício amorfo (a-Si) e silício microamorfo (a-Si/ μ c-Si). A Figura 26 apresenta uma vista geral do sistema e a Tabela 4 fornece um resumo das características elétricas de todos os subsistemas instalados.



Figura 26 – Vista geral dos sistemas FV instalados (vista NO).

Tabela 4 - Características elétricas dos subsistemas FV instalados – Brotas de Macaúbas/BA

Tecnologia	Potência Nominal [kWp]	Série x Paralelo	Eficiência do Módulo (%)
a-Si/μ-Si	2,272	2x8	9,1
a-Si	2,100	3x7	6,4
CIGS	2,160	6x3	11,0
p-Si	2,065	7x1	15,2
m-Si	2,115	9x1	14,4

Os subsistemas originalmente não possuíam medição de temperatura de operação dos módulos. Para que fosse possível obter a temperatura do módulo no momento da aquisição da curva, foi utilizado um sensor de temperatura (termopar Tipo J, precisão: $\pm [0.20\% + 0.3^{\circ}\text{C}]$) fixado nas costas de um módulo de cada sistema medido. Posteriormente, este valor de temperatura do módulo foi inserido no software de operação do traçador IxV.

Neste sistema FV foram realizadas duas campanhas de limpeza e aquisição de dados para avaliar a perda de desempenho por sujeira: uma em outubro de 2014; e outra em novembro de 2015.

3.3.2 SISTEMA FV BURITIS – RO

O sistema FV do P&D Solar Guascor/UFSC, visto na Figura 27, situado no município de Buritis-RO, teve início de sua operação em 1 de agosto de 2014. A Tabela 5 apresenta as características elétricas do

sistema, que apresenta 28,4kWp de potência instalada e utiliza três tecnologias fotovoltaicas: filmes finos de silício amorfo (a-Si) , silício microcristalino (a-Si/ μ c-Si) e silício multicristalino (p-Si).

As informações do município são apresentados a seguir:

- Posição geográfica: 10° 12' S, 63° 49' O;
- Altitude: 156 m;
- Clima: Equatorial, ou Am;

O sistema FV está instalado no terreno de uma usina termoeétrica a Diesel. O entorno do sistema FV, por ser uma usina afastada da cidade, é constituído por vegetação característica do clima da região, e por fazendas de criação de gado. Neste sistema FV foram utilizados módulos FV de filmes finos de silício amorfo com e sem moldura de alumínio. Para este estudo, foram considerados dois subsistemas diferentes (silício amorfo com e sem moldura), mesmo que em operação eles representem o mesmo subsistema FV, ligados ao mesmo inversor.



Figura 27 – Vista geral do sistema FV Buritis-RO (Vista E).

Tabela 5- Características elétricas dos subsistemas FV instalados – Buritis/RO

Tecnologia	Potência Nominal [kWp]	Série x Paralelo	Eficiência do Módulo (%)
a-Si/μc-Si	7,952	4x14	9,1
a-Si sem moldura	2,800	7x4	6,4
a-Si com moldura	4,900	7x7	6,4
p-Si	7,840	16x2	15,0

Os subsistemas, assim como o sistema da Bahia, não apresentavam medição de temperatura de operação dos módulos. O mesmo procedimento para aquisição dos valores de temperatura dos módulos FV foi utilizado (sensor de temperatura – termopar - fixado nas costas de um módulo de cada sistema medido, com valor de temperatura posteriormente inserido no software do traçador IxV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTO – SELETIVIDADE ESPECTRAL

A curva de transmitância espectral relativa para diferentes concentrações de sujeira da amostra coletada é apresentada na Figura 28.

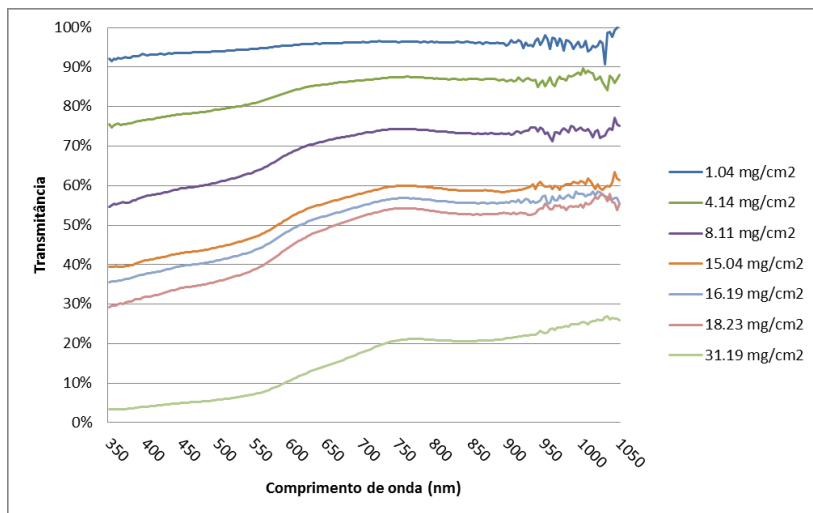


Figura 28 – Curvas de transmitância do espectro solar por comprimentos de onda, para diferentes concentrações de sujeira.

Pode-se perceber o mesmo perfil de atenuação de irradiância de Qasem et al (2012), apresentado anteriormente na Figura 22, onde a transmitância é reduzida de forma acentuada nos baixos comprimentos de onda (entre 350 e 650 nm), em relação aos altos comprimentos de onda.

Os ruídos encontrados nos elevados comprimentos de onda são provenientes do instrumento de medição, conforme pode ser visualizado na Figura 29. Nela, um gráfico de distribuição de irradiância por comprimento de onda é apresentado para comprimentos de onda entre 930 e 1050 nm.

A distribuição de irradiância solar (curva traçada sem o vidro de referência) já apresentava ruídos para comprimentos de onda entre 950 e 1050 nm, padrão que foi mantido para as medidas do experimento.

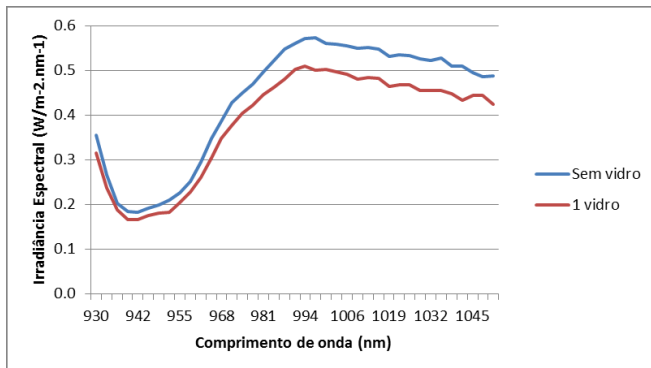


Figura 29 – Detalhe da curva de distribuição espectral de irradiância atmosférica em Florianópolis-SC (curva azul) e medida de referência (com vidro) para o mesmo local (curva vermelha) por comprimento de onda, evidenciando os ruídos de medição do aparelho utilizado em ambas as amostras.

Foi constatado também que, conforme afirmado por Qasem (2013), a atenuação se torna menos acentuada nos baixos comprimentos de onda na medida em que a distribuição de tamanho das partículas da amostra aumenta. A Tabela 6 mostra a granulometria da amostra utilizada nesta análise. O tamanho representativo das partículas que compõem a amostra varia entre 6,5 e 207 μm .

Tabela 6 – Distribuição de tamanho de grãos da amostra e classificação

Diâmetro (μm)	% da amostra	Tipo de grão
1000-500	0,00	Areia grossa
500-250	1,59	Areia média
250-125	18,94	Areia fina
125-63	17,46	Areia muito fina
63-31	23,63	Silte grosso
31-16	14,57	Silte médio
16-8	10,84	Silte fino
8-4	5,91	Silte muito fino
<4	7,07	Argila

Em comparação com a Tabela 2, pode-se perceber que a amostra utilizada para esta análise possui perfil mais grosso e por isso

apresentou uma menor atenuação dos baixos comprimentos de onda em relação ao estudo apresentado por Qasem (2013).

Embora os valores de transmitância não sejam os mesmos para determinados comprimentos de onda, foi constatado que o perfil de atenuação da transmitância é o mesmo (maior atenuação nos baixos comprimentos de onda), independente de diferentes distribuições de tamanho de partícula.

A dispersão de uma onda eletromagnética imposta por uma determinada partícula é definida basicamente pelo índice de refração e tamanho desta partícula (Mishchenko, 2002). Portanto, uma amostra, mesmo formada com partículas de composição diferente a esta da análise (valor de índice de refração diferente), terá perfil de seletividade espectral semelhante ao obtido nesta avaliação.

Através da Figura 30, que apresenta o espectro padrão G-173, e os respectivos espectros resultantes das atenuações impostas pelas diferentes concentrações de sujeira avaliadas, pode-se verificar uma maior redução nos valores de irradiância nos menores comprimentos de onda de cada espectro, em relação aos maiores comprimentos de onda. Esse comportamento é evidenciado principalmente nas amostras de concentração intermediária (entre 8 e 18mg/cm²).

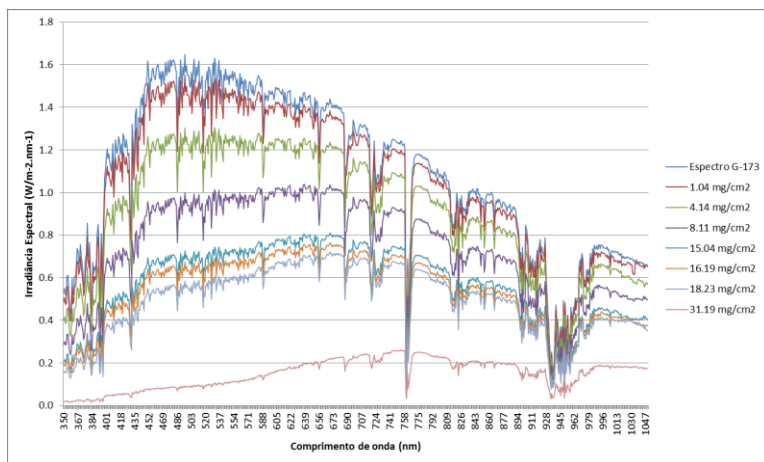


Figura 30 – Distribuição de irradiância do espectro padrão G-173 (curva superior em azul escuro), e diferentes distribuições de irradiância atenuadas pelas diferentes concentrações de sujeira analisadas.

Portanto, através desta análise, pôde-se inferir que:

- Sistemas que apresentem tecnologia FV com resposta espectral (relacionado aos limites em valores de comprimento de onda da resposta espectral) compreendida nos menores comprimentos de onda do espectro solar apresentarão uma maior perda por sujeira, em relação às tecnologias FV com intervalo de resposta espectral nos maiores comprimentos de onda;
- Sistemas FV com janela de resposta espectral semelhante, por exemplo CdTe e a-Si, porém com picos de amplitude diferentes dentro do mesmo intervalo (a resposta espectral máxima do a-Si é em torno de 600 nm, ao passo que a do CdTe é por volta dos 800 nm), terão perdas por sujeira com valores diferentes, sendo mais prejudicada a tecnologia FV com valores máximos de resposta espectral nos menores comprimentos de onda (neste caso, a-Si em relação a CdTe).

4.2 ANÁLISE DE PERDA DE DESEMPENHO POR SUJEIRA ATRAVÉS DE CURVAS I X V

Todas as análises foram conduzidas através do método descrito na seção 3.2, utilizando o mesmo equipamento e os mesmos instrumentos de medição.

4.2.1 Brotas de Macaúba-BA – Outubro 2014

A metodologia de avaliação foi executada em outubro de 2014, sendo efetuada num período de três dias (um para medições dos sistemas sujos, um para limpeza e outro para medições dos sistemas limpos). A Figura 31 mostra o perfil de sujeira encontrado nos cinco subsistemas antes de qualquer intervenção. O sistema havia sido instalado em novembro de 2013, portanto com aproximadamente um ano de operação, sem nenhuma atividade manual de limpeza dos módulos tendo ocorrido até a limpeza executada especificamente para este estudo.

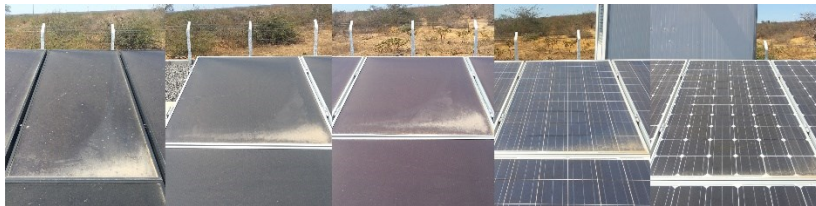


Figura 31 – Perfil do acúmulo de sujeira sobre módulo de cada tecnologia FV, visita de outubro 2014 (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ μ c-Si, a-Si, multi-Si, mono-Si).

Como pode ser visto na Figura 31, o perfil de sujeira dos sistemas é não-homogêneo, resultante do predomínio dos fortes ventos leste na região.

A disposição das imagens na Figura 31 está de acordo com o posicionamento dos subsistemas FV no terreno. A posição geográfica dos subsistemas varia de forma unidimensional: estão instalados lado a lado, sendo o subsistema CIGS posicionado mais a Leste, enquanto o subsistema m-Si encontra-se mais a Oeste do que os demais.

Portanto, além das características construtivas de cada módulo FV (diferentes alturas e formatos de moldura, e textura de vidro), a característica climática da região de fortes ventos predominantes de Leste e clima muito seco (o que resulta em alta concentração de particulados no ar) parece apresentar influência sobre a diferença de concentração de sujeira entre os subsistemas.

A Figura 32 mostra os subsistemas CIGS (extremo Leste da fileira que contém as mesas com todas as tecnologias FV e portanto a tecnologia de barlavento) e monocristalino (tecnologia de sotavento), ambos antes da limpeza. É visualmente perceptível a diferença de concentração de sujeira entre os subsistemas.



Figura 32 – Subsistemas CIGS (esquerda e a barlavento), apresentando maior concentração de sujeira, frente ao subsistema m-Si (direita e a sotavento).

A Figura 33 apresenta a visível diferença dos subsistemas antes e após a limpeza. O módulo FV estava na sua totalidade sendo impactado pela presença de sujeira sobre o vidro e o canto inferior direito apresentava uma maior concentração de sujeira, responsável por um maior impacto de sombreamento comparada às demais regiões do módulo FV.



Figura 33 – Comparação entre módulos FV sujos e limpos dos sistemas a-Si/ μ c-Si (esquerda) e p-Si (direita).

O resultado da análise é apresentado na Tabela 7. Como pode ser constatado, todos os subsistemas apresentaram valores de perda por sujeira não-negligenciáveis.

Tabela 7 – Valores de potência máxima de operação (1 ano) para todas as tecnologias, obtidas antes e depois da limpeza e os valores de perda por sujeira (valores em W).

Tecnologia	Ponto de Máxima Potência (Pmpp)		
	Limpo	Sujo	Perdas
a-Si	2079,75	1908,45	8,24%
CIGS	2040,80	1969,77	3,48%
a-Si/ μ c-Si	2066,43	1950,99	5,59%
m-Si	2111,27	2016,84	4,47%
p-Si	2154,04	1909,94	11,33%

A Figura 34 apresenta os mesmos resultados da influência da sujeira na potência total de cada tecnologia. Os valores percentuais, mostrados nas barras cinzas, representam o ganho de potência relativa após a limpeza dos módulos para cada tecnologia.

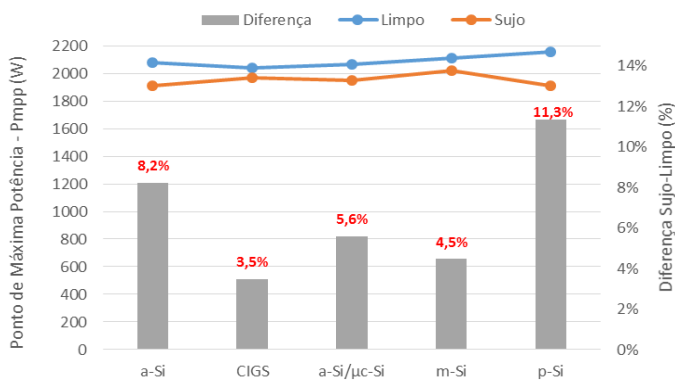


Figura 34 - Ponto de máxima potência para todos os sistemas, antes (curva laranja) e após (curva azul) a limpeza para a primeira campanha de limpeza manual realizada em outubro 2014, e suas respectivas diferenças relativas (barras cinzas).

A Figura 35 apresenta as curvas IxV do subsistema multicristalino sujo e limpo, assim como as respectivas curvas PxV. O impacto da não-homogeneidade da sujeira (entre módulos FV) na curva IxV é visualizado na curva verde (subsistema sujo). Tal impacto é percebido através das seguidas mudanças de direção da curva verde,

adquirindo uma característica não-linear. A curva vermelha mostra o perfil de curva IxV característico.

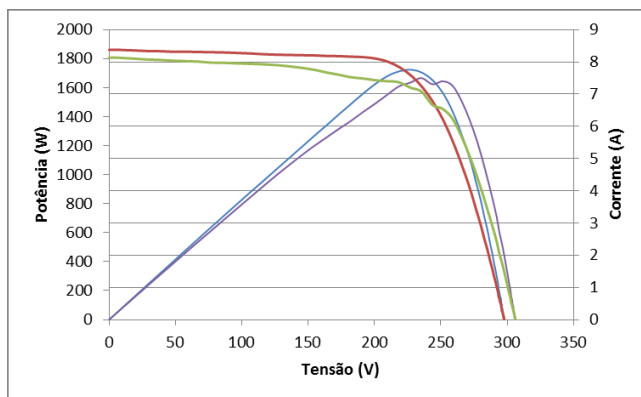


Figura 35 – Curvas IxV do subsistema p-Si sujo (verde) e limpo (vermelho), e as respectivas curvas PxV sujo (roxo) e limpo (azul).

A comparação dos valores de perdas por sujeira para cada subsistema FV é apresentada em seção adiante.

4.2.2 Brotas de Macaúba-BA – Novembro/15

Com o objetivo de confrontar os resultados da avaliação para um mesmo sistema FV, uma segunda avaliação foi realizada no sistema de Brotas. As medições foram realizadas em novembro de 2015, ou seja, um ano e um mês após a primeira avaliação e novamente sendo efetuada num período de três dias. De início, foi claramente visível que o sistema se encontrava muito menos sujo em relação à primeira visita. A Figura 36 mostra a situação dos subsistemas, antes de qualquer intervenção.

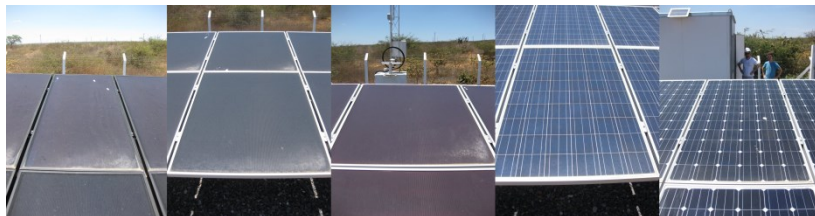


Figura 36 - Perfil do acúmulo de sujeira sobre módulo de cada tecnologia FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/μc-Si, a-Si, p-Si, m-Si).

Embora com menor concentração, o perfil de sujeira era o mesmo (maior concentração no canto inferior direito), conforme pode ser visto pela Figura 37. A comparação do sistema p-Si limpo/sujo, mostrando a menor concentração de sujeira no sistema em relação à primeira avaliação é mostrada na Figura 38.



Figura 37 – Perfil de acúmulo de sujeira dos subsistemas CIGS (esquerda) e a-Si (direita).

Também foi mantido o perfil de não-homogeneidade entre módulos FV de um mesmo sistema, conforme apresentado na Figura 39.



Figura 38 - Comparação entre módulos FV sujos e limpos do sistema p-Si. A pequena concentração de sujeira neste subsistema é percebida pela semelhança visual dos módulos FV limpos e sujos.



Figura 39 - Exemplo de não-homogeneidade entre módulos FV de um mesmo subsistema (a-Si).

Os perfil de sujeira em relação à posição geográfica dos sistemas também foi mantido. Novamente, os sistemas de filme fino apresentavam-se mais sujos que os de silício cristalino; estes com um padrão quase que homogêneo de sujeira, devida à baixa concentração da mesma sobre os módulos FV.

O resultado desta análise é apresentado na Tabela 8. Todos os subsistemas tiveram redução significativa em relação à primeira avaliação. O sistema que apresentou uma menor redução de perda relativa foi o subsistema CIGS, sistema que apresentou também menor variação de concentração de sujeira.

Tabela 8 – Valores de potência máxima de operação (1 ano aproximadamente) para todas as tecnologias, obtidas antes e depois da limpeza e os valores de perda por sujeira (valores em W).

Tecnologia	Ponto de Máxima Potência (Pmpp)		
	Limpo	Sujo	Perdas
a-Si	1922,65	1839,21	4,34%
CIGS	2001,43	1940,01	3,07%
a-Si/ μ c-Si	2019,18	1960,58	2,90%
m-Si	2042,94	1999,60	2,12%
p-Si	2064,61	2025,08	1,91%

A Figura 40 apresenta os mesmos resultados da influência da sujeira na potência de operação de cada tecnologia. Os valores percentuais, mostrados nas barras cinzas, representam o ganho de potência relativa, para cada tecnologia, após a limpeza dos módulos.

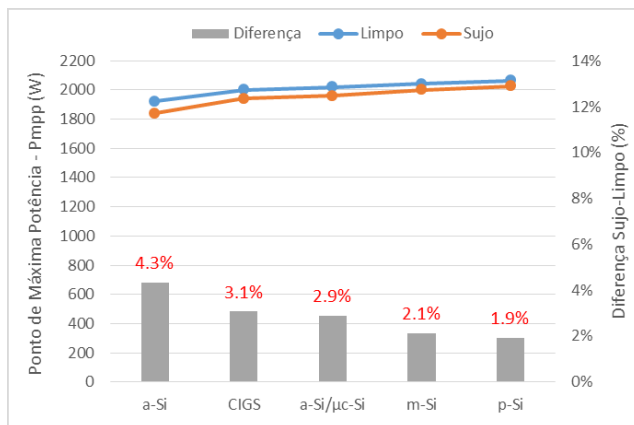


Figura 40 - Ponto de máxima potência para todos os subsistemas antes (curva laranja) e após (curva azul) a limpeza para a segunda campanha de limpeza manual realizada em novembro 2015, e suas respectivas diferenças relativas (barras cinzas).

A Figura 41 apresenta as curvas IxV e PxV do subsistema multicristalino sujo. O perfil praticamente homogêneo da sujeira desta avaliação é evidenciado pela curva IxV suja do subsistema (curva verde). O perfil praticamente homogêneo de sujeira pôde ser percebido através da característica linear da curva verde, não apresentando mudanças bruscas de direção (somente o joelho característico da curva IxV).

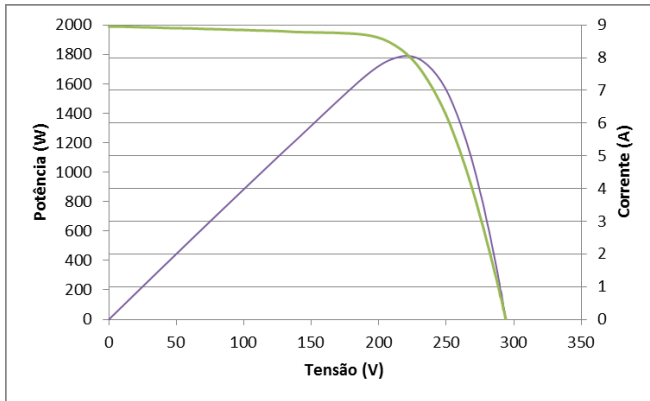


Figura 41 – Curvas IxV (verde) e PxV (roxo) do subsistema p-Si sujo.

A comparação dos valores de perdas por sujeira para cada subsistema FV é apresentada em seção adiante. Contudo, deve-se ressaltar a diferença entre as curvas IxV sujas das Figura 35 e Figura 41. É possível averiguar a influência da não-homogeneidade da sujeira na curva IxV dos módulos da tecnologia de silício cristalino, frutos da topologia elétrica destes módulos (formato de células e presença de diodos de desvio).

Conforme previamente discutido, a não-homogeneidade de sujeira resulta em diferentes atenuações de corrente dentro do mesmo módulo FV. O mesmo raciocínio pode ser utilizado no caso de não-homogeneidade de sujeira entre os módulos FV de uma mesma *string*, situação mostrada na Figura 35. No caso da Figura 41, a pequena variação do perfil de sujeira (sujeira homogênea) em um módulo FV, e entre módulos FV de uma mesma *string* resultam numa curva com perfil sem variações bruscas.

4.2.3 Buritis - RO

A principal diferença entre as avaliações realizadas no sistema de Brotas de Macaúbas e esta é a aquisição de múltiplas curvas IxV para os dois estágios da análise (limpo e sujo), buscando assim reduzir o impacto da incerteza de reprodutibilidade do equipamento utilizado.

As medições foram realizadas no mês de agosto de 2016, sendo utilizados quatro dias para o procedimento (um para medições dos sistemas sujos, dois para a limpeza, e um para as medições dos sistemas limpos). A limpeza dos subsistemas FV das tecnologias de filmes finos

de silício amorfo e microamorfo não pode ser realizada na sua totalidade, devido ao fato do sistema contar com mesas com quatro fileiras horizontais de módulos FV, impossibilitando o acesso para uma limpeza profunda e completa. A Figura 42 mostra as mesas em questão.



Figura 42 – Subsistemas a-Si (esquerda) e a-Si/ μ c-Si (direita), exemplificando as mesas com configuração de quatro fileiras de módulos FV horizontais.



Figura 43 - Subsistemas p-Si (esquerda) e a-Si sem moldura (direita).

A razão pela qual a limpeza nestes dois subsistemas não pôde ser realizada na sua totalidade é que nestes subsistemas a sujeira da parte inferior dos módulos FV apresentava-se fortemente aderida ao vidro do módulo FV. Esta adesão acentuada, evidenciada nestes dois subsistemas, pode ser explicada pelo acúmulo da sujeira represada pela moldura do próprio módulo FV.

Os subsistemas com módulos de silício amorfo com moldura e microamorfo apresentam a mesma moldura (são do mesmo fabricante), moldura esta com elevada altura em relação ao vidro, principalmente se comparado à moldura do sistema multicristalino, de menor altura. Ambos os subsistemas (amorfo com moldura e microamorfo) apresentavam maior concentração desta sujeira aderida ao vidro.

O subsistema multicristalino por sua vez apresentava pouca sujeira aderida e o subsistema amorfo sem moldura não apresentava sujeira aderida. A Figura 44 e Figura 45 mostram o perfil da sujeira acima descrita nos diferentes subsistemas.



Figura 44 – Subsistemas a-Si (esquerda) e a-Si/ μ c-Si (direita), mostrando o perfil de sujeira aderida.



Figura 45 - Subsistemas p-Si (esquerda) e a-Si sem moldura (direita), mostrando o perfil de sujeira aderida. Nota-se a menor concentração de sujeira aderida naquele, e a inexistência neste.

Pela incapacidade da limpeza total dos subsistemas amorfo com moldura e microamorfo, escolheu-se realizar a análise de perda de desempenho dos subsistemas através da medição de *strings* dos sistemas amorfo e microamorfo.

Como anteriormente citado, a não-homogeneidade de sujeira de um módulo FV, ou de módulos FV dentro de uma mesma *string*, cria um descasamento elétrico não-negligenciável para a análise. Os sistemas que apresentavam um perfil não-homogêneo, embora muito sutil, eram justamente os sistemas amorfo com moldura e microamorfo, em razão da parcela de sujeira aderida ao vidro.

Deve-se ressaltar que a análise de perda de desempenho por sujeira para estes subsistemas, utilizando a medição de *strings*, é uma aproximação da perda total de cada subsistema.

Os subsistemas multicristalino e amorfo sem moldura por não apresentarem sujeira fortemente aderida (sendo assim totalmente limpos) tiveram medição realizada tanto para *string* quanto para sistema, para contrastar os resultados de cada um das análises, e assim verificar se o padrão de sujeira era realmente semelhante e homogêneo, conforme a inspeção visual sugeria.

Para o subsistema multicristalino, o perfil de sujeira aderida era muito reduzido e concentrava-se sobre região não-sobreposta às células inferiores do módulo FV. A Figura 46 exemplifica a afirmação.



Figura 46 – Detalhe do perfil de sujeira aderida ao subsistema p-Si. A sujeira aderida não representa sombreamento ao módulo FV.

A Tabela 9 fornece os valores resultantes da avaliação realizada por *strings* para o sistema. Nota-se que todos os sistemas tiveram perdas consideráveis pelo acúmulo de sujeira. Os valores apresentados na Tabela 9 são os valores médios de cada grupo de curvas IxV.

O resultado para a análise do subsistema de silício amorfo com moldura não é representativo. Isto porque para esta *string*, apenas quatro módulos FV, dos sete módulos integrantes da *string* puderam ser totalmente limpos, pelo motivo previamente citado (disposição das mesas). Para os demais subsistemas, todos os módulos FV integrantes das *strings* escolhidas foram totalmente limpos.

Tabela 9 - Valores médios de potência máxima de operação (2 anos) para todas as tecnologias, medidas por *string*, obtidas antes e depois da limpeza e os valores de perda por sujeira (valores em W).

Tecnologia	Ponto de Máxima Potência (Pmpp)		
	Limpo	Sujo	Perdas
a-Si com moldura	744,24	625,50	15.95%
a-Si sem moldura	738,14	614,97	16.69%
a-Si/ μ c-Si	513,52	445,20	13.30%
p-Si	3629,56	3218,83	11.32%

A Tabela 10 fornece os valores resultantes das avaliações realizadas para os subsistemas. Estes resultados, se comparadas as mesmas tecnologias, mostram boa aderência para os resultados obtidos na avaliação por *strings* (Tabela 9), confirmando a hipótese do perfil homogêneo de sujeira verificado através da inspeção visual.

Tabela 10 - Valores médios de potência máxima de operação (2 anos) das tecnologias descritas, medidas para cada subsistema total, obtidas antes e depois da limpeza, e os valores de perda por sujeira (valores em W).

Tecnologia	Ponto de Máxima Potência (Pmpp)		
	Limpo	Sujo	Perdas
a-Si sem moldura	2925,00	2444,83	16,42%
p-Si	7309,72	6469,13	11,50%

A Figura 47 apresenta as curvas IxV e PxV do subsistema multicristalino sujo. O formato da curva evidencia o perfil homogêneo da sujeira.

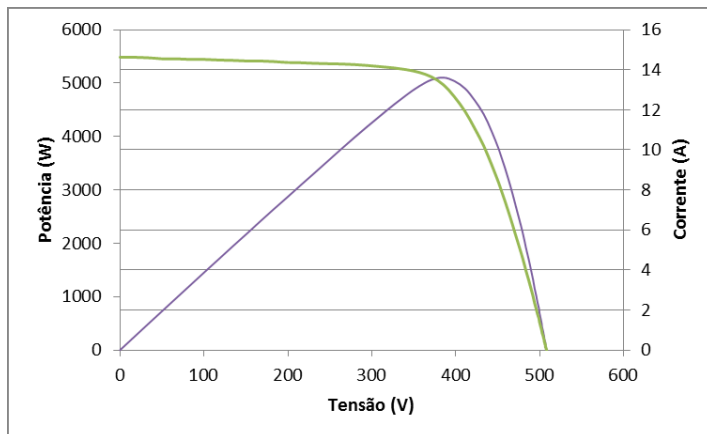


Figura 47 - Curvas IxV (verde) e PxV (roxo) sujas do subsistema p-Si.

A Tabela 11 mostra o número de curvas IxV obtidas para cada estágio da medição (limpo e sujo) de cada subsistema, na avaliação por *string*, e o valor dos respectivos desvios-padrão de cada estágio.

Tabela 11 – Número de medidas realizadas para cada estágio da avaliação, e suas respectivas incertezas-padrão (desvio padrão da amostra).

Tecnologia	Ponto de Máxima Potência (Pmpp)			
	Limpo		Sujo	
	N° Medidas	Incerteza Padrão	N° Medidas	Incerteza Padrão
a-Si sem moldura	5	0,17%	3	0,17%
a-Si com moldura	5	0,10%	3	0,14%
a-Si/ μ c-Si	5	0,25%	3	0,43%
p-Si	5	0,32%	3	0,81%

O valor de precisão do equipamento, definido pela reprodutibilidade, é de 2%. Através desta análise amostral para cada estágio de medição, pôde-se reduzir a dispersão dos pontos em torno da média dos mesmos, ou seja, aumentando a precisão (reprodutibilidade) das medidas.

Desta forma, pôde-se reduzir os impactos causados pelos erros aleatórios, oriundos das oscilações das condições ambientes, nos diferentes instantes de medição.

Como as grandezas (valores médios de Pmpp) são realizadas entre si através de uma razão, foram somados os valores de incerteza

entre as medidas, assim definindo valores de incerteza totais da medida. Estes valores são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 –Valores de perda por sujeira para os subsistemas (análise por *string*) e suas respectivas incertezas.

Tecnologia	Ponto de Máxima Potência (Pmpp)	
	Perda por Sujeira	Incerteza
a-Si com moldura	15,95%	0,34%
a-Si sem moldura	16,69%	0,24%
a-Si/ μ c-Si	13,30%	0,78%
p-Si	11,32%	1,13%

Deve-se ressaltar que este aumento da confiabilidade dos valores de precisão, através do aumento da amostra, é obtido através da redução dos erros aleatórios. Erros sistemáticos, que implicarão na alteração da exatidão da medida devem ser evitados.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE SUBSISTEMAS FV

A comparação entre os subsistemas FV deve ser feita levando em consideração as diferentes concentrações de sujeira entre subsistemas de uma mesma análise e entre análises diferentes.

4.3.1 Brotas de Macaúba - BA – Outubro 2014

O subsistema com maior perda por sujeira naquela primeira campanha de limpeza foi o de silício multicristalino. Fica evidenciado o impacto da não-homogeneidade da sujeira na diminuição do desempenho do subsistema, pois esta tecnologia apresenta ampla resposta espectral, amplitude da resposta espectral deslocada para os altos comprimentos de onda, e também apresentava-se visivelmente menos sujo em relação aos sistemas de filme fino.

As demais comparações, por não poder ser quantificada a concentração total de sujeira sobre o módulo FV, foi feita por módulos com topologias elétricas (formato de células FV) semelhantes.

4.3.1.1 Módulos de silício cristalino

As perdas entre as duas tecnologias de silício cristalino (m-Si e p-Si) apresentaram valores muito discrepantes entre si, cerca de 4,5% e 11,3% respectivamente.

Este fato pode ser explicado pelo perfil não-homogêneo da sujeira. É possível observar através da Figura 48 que a tecnologia p-Si apresenta um acúmulo de sujeira maior em relação à tecnologia m-Si, especialmente na parte inferior direita. Isso ocorre possivelmente devido a: posição geográfica dos subsistemas (p-Si se encontra a barlavento) e regime dos ventos predominantes na localidade (provenientes do Leste); e diferentes texturas de vidro (Garcia, 2016).



Figura 48 – Sistemas FV da tecnologia m-Si (esquerda) e p-Si (direita).

A Figura 49 apresenta dois módulos da mesma tecnologia FV (p-Si): um deles foi escolhido, através de inspeção visual, como sendo o módulo mais sujo, e o outro menos sujo. As curvas IxV e PxV limpa e suja aparecem abaixo dos mesmos. É possível observar a diferença de sujeira entre ambos, principalmente no canto inferior direito. Foi verificado uma perda de potência, devido à sujeira, de 12,1% e 4,5% para o módulo mais sujo e mais limpo, respectivamente. Através desta análise pôde-se evidenciar a diferença de concentração de sujeira em função: da posição relativa do módulo na mesa; e em relação à direção predominante dos ventos locais

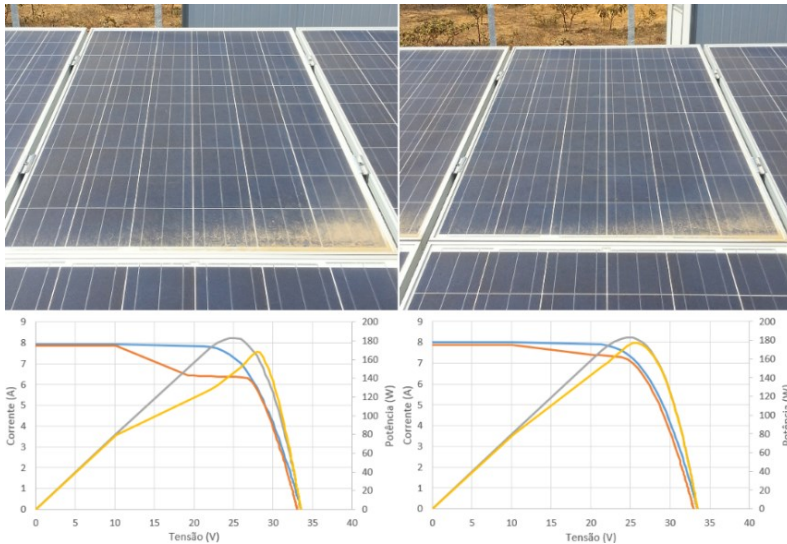


Figura 49 – Módulos idênticos da tecnologia p-Si de uma mesma mesa do subsistema p-Si fotografados e medidos na mesma data. Módulo FV com maior concentração de sujeira (esquerda) e módulo com menor concentração de sujeira (direita), com suas respectivas curvas IxV limpa (azul), suja (laranja), e curvas PxV limpa (cinza) e suja (amarela).

Portanto, verifica-se o impacto que a célula mais suja apresenta sobre o módulo, e conseqüentemente o módulo mais sujo de uma *string* (e sistema, pois nesse caso o sistema é constituído de somente uma *string*) apresenta perante os demais módulos do mesmo subsistema. Neste caso, o módulo menos sujo teve redução de potência imposta pelo módulo mais sujo de aproximadamente 8% (ambos os módulos são integrantes do mesmo subsistema).

4.3.1.2 Tecnologias de Filmes Finos

Para as perdas relativas às tecnologias de filmes finos, verifica-se que os valores de perdas em função da sujeira para a tecnologia CIGS foram os menores, mesmo o sistema estando visualmente tão ou mais sujo quanto os outros. Já as perdas das tecnologias de silício amorfo (a-Si e a-Si/ μ c-Si) foram consideravelmente maiores.

Isso pode ser explicado pela diferença da resposta espectral entre as tecnologias de filme fino, em que a tecnologia CIGS tem valor máximo de resposta espectral para comprimentos de onda maiores e as

tecnologias a-Si e a-Si/ μ c-Si para comprimentos de onda menores. Além disto, os intervalos de resposta espectral da tecnologia CIGS são muito mais amplos (350 a 1200 nm, aproximadamente) em relação às demais tecnologias. Portanto, o acúmulo de sujeira, mesmo que razoavelmente maior no subsistema CIGS, tende a ter um efeito menor sobre esta tecnologia e maior sobre as tecnologias que utilizam silício amorfo.

4.3.2 Brotas de Macaúba - BA – Novembro 2015

A Figura 50 mostra a diferença de concentração de sujeira em relação à primeira visita. A concentração semelhante de sujeira entre as tecnologias de silício cristalino explica os valores aproximados de suas respectivas perdas, uma vez que ambos também apresentam a mesma resposta espectral.



Figura 50 – Comparação do perfil do acúmulo de sujeira (Out. 2014 na fileira de cima, Nov. 2015 na fileira de baixo) sobre módulo de cada tecnologia FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si/ μ c-Si, a-Si, p-Si, m-Si).

Nas tecnologias de filmes finos, os resultados encontram-se coerentes com o que foi anteriormente apresentado: a tecnologia de silício amorfo apresenta maiores valores de perda, devido à sua resposta espectral deslocada para os baixos valores de comprimento de onda, onde a sujeira impacta de forma acentuada.

É interessante ressaltar a comparação entre subsistemas amorfo e microamorfo, que apresentam o mesmo perfil de sujeira em ambas as avaliações, pois de fato são módulos FV do mesmo fabricante, possuindo a mesma topologia elétrica construtiva, assim como os

materiais utilizados (vidro e moldura). Em ambas as avaliações, a diferença de perda relativa entre as duas tecnologias é de 50%.

O valor de perda medido para a tecnologia de silício microamorfo, que foi similar ao da tecnologia CIGS pode ser explicado pelo fato do sistema CIGS apresentar a maior concentração de sujeira frente aos outros sistemas.

A condição climática local (ventos fortes de Leste) e a posição geográfica do sistema CIGS (sistema mais barlavento) sugerem a hipótese deste subsistema ser novamente o com maior concentração de sujeira frente aos demais.

4.3.3 Buritis - RO

A Figura 51 apresenta a diferença entre os subsistemas limpos e sujos, evidenciando a alta concentração de sujeira em todos os subsistemas.



Figura 51 - Comparação entre o sistema sujo (superior) e limpo (inferior).

Como a concentração de sujeira é de maneira geral uniforme, principalmente tratando-se do subsistema multicristalino, onde não havia sujeira aderida ao vidro, a topologia elétrica dos módulos FV não influencia a comparação entre os subsistemas. A Figura 52 mostra o perfil de sujeira na vista frontal dos subsistemas.



Figura 52 – Perfil de sujeira para cada tecnologia (da esquerda para direita, a-Si/ μ c-Si, a-Si com moldura, a-Si sem moldura e p-Si).

Novamente percebe-se a influência da característica espectro-seletiva da sujeira. Ambos os subsistemas amorfo com e sem moldura (amplitude de resposta espectral em torno de 600 nm, intervalo de resposta espectral entre 300 e 900nm) tiveram maiores valores de perda por sujeira. De fato, ambos possuem a mesma resposta espectral.

O sistema microamorfo, com amplitude máxima de resposta espectral para 800 nm (valor intermediário entre a-Si e p-Si), e intervalo de resposta espectral entre 550 e 1100 nm apresentou um valor menor de perda em relação aos sistemas amorfos, porém ainda com perda maior que o sistema multicristalino (amplitude máxima de resposta espectral em torno de 1000 nm, e intervalo entre 300 e 1200 nm).

Esses diferentes valores de amplitude e intervalo de resposta espectral têm grande importância na forma de como a sujeira impacta na atenuação da distribuição espectral de irradiância.

Tratando-se de uma sujeira homogênea e de alta concentração, as atenuações na irradiância incidente no módulo FV se dão por toda a área do módulo (de forma igual em todas as células), e de forma mais acentuada nos baixos comprimentos de onda.

Uma análise de granulometria foi feita coletando uma amostra do material depositado sobre um módulo FV. O resultado é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição de tamanho de grãos da amostra e classificação –
Buritis/RO

Diâmetro (μm)	% da amostra	Tipo de grão
1000-500	0,00	Areia grossa
500-250	0,00	Areia média
250-125	0,32	Areia fina
125-63	15,20	Areia muito fina
63-31	23,39	Silte grosso
31-16	24,34	Silte médio
16-8	16,63	Silte fino
8-4	10,43	Silte muito fino
<4	9,69	Argila

A granulometria apresenta uma distribuição concentrada em grãos mais finos, o que sugere, segundo previamente discutido, uma acentuação mais pronunciada nos menores comprimentos de onda em relação aos maiores comprimentos de onda, do espectro solar, proposta esta corroborada pelos resultados da análise.

4.3.3.1 Avaliação da presença de moldura (a-Si)

O fato da sujeira aderida estar presente somente nos subsistemas que possuem moldura já serve para levantar a hipótese de que, para esta localidade, a presença de moldura prejudica o desempenho do sistema FV, funcionando como uma espécie de contenção da sujeira presente sobre a superfície do módulo FV.

Através da análise entre os dois subsistemas a-Si, com e sem moldura, pôde-se avaliar a perda relativa a esta sujeira impregnada.

Tal sujeira não foi possível retirar nem mesmo com a utilização de um lava-jato, sendo somente possível removê-la com imposição de força mecânica, utilizando um pano.

Assim, o sistema com moldura não fica nunca totalmente limpo durante a sua operação rotineira, nem mesmo com uma forte chuva, ao passo que o sistema sem moldura tem maior probabilidade de uma limpeza total, nas mesmas condições.

A Tabela 14 apresenta os resultados da análise de sujeira para o subsistema amorfo com e sem moldura. Deve-se ressaltar que, de 49 módulos FV presentes no sistema amorfo com moldura, 15 foram limpos em sua totalidade (módulos das extremidades da mesa), propondo que a diferença seria ainda maior, caso estes não fossem limpos.

O valor da análise do subsistema amorfo com moldura não é representativo, contudo, pode-se perceber a influência indireta da presença da moldura na queda de desempenho do sistema. A moldura atua como uma barreira para o escoamento natural da sujeira depositada sobre o módulo FV, não podendo este ser totalmente limpo através de uma chuva, por exemplo.

Isto dito, como ambos os subsistemas são da mesma tecnologia FV, pode-se esperar, numa situação de mesma concentração de sujeira, que o subsistema amorfo com moldura apresentaria, no mínimo, perdas por acúmulo de sujeira de aproximadamente 16%, podendo ser ainda maior este valor, pois o subsistema apresentava sujeira aderida.

Tabela 14 – Perdas por sujeira para as tecnologias FV.

Tecnologia	Perdas	Incertezas
a-Si sem moldura	16,42%	0,38%
a-Si com moldura	13,90%	0,20%

Através desta análise, conclui-se que:

- A disposição de mesas com números elevados de fileiras horizontais (de fato, acima de duas fileiras já prejudicaria) acaba por prejudicar o procedimento de limpeza dos módulos FV, principalmente para o caso de sujeiras fortemente aderidas ao módulo. Esta intervenção tinha como objetivo principal mensurar as perdas resultantes do acúmulo de sujeira no sistema FV, portanto, todas as medidas cabíveis disponíveis foram realizadas, visando a limpeza total do sistema. Isto dito, uma empresa contratada para a limpeza deste sistema possivelmente não conseguiria efetuar sua atividade por completo;
- Para esta localidade (região de baixa latitude, que conseqüentemente resulta num baixo valor de ângulo de inclinação de instalação do módulo FV) a presença de moldura,

mesmo não apresentando influência direta na forma de deposição de sujeira sobre o módulo FV, tem caráter prejudicial para o desempenho do sistema, pois atua como uma barreira para a sujeira que seria escoada juntamente com a água da chuva. A Figura 53 apresenta a hipótese citada.



Figura 53 – Sujeira represada sobre módulo FV pela presença de moldura, após intensa aplicação de água sobre o mesmo.

4.4 INCERTEZAS DA ANÁLISE – CONCENTRAÇÃO DE SUJEIRA E INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

4.4.1 CONCENTRAÇÃO DE SUJEIRA

No que diz respeito ao acúmulo de sujeira sobre módulos FV, poucos trabalhos científicos são conduzidos no sentido de quantificar a densidade de sujeira sobre o módulo FV. De fato, esta análise é difícil de ser realizada, devido a alguns fatores: seja pela restrição da quantificação do valor da densidade de superfície (concentração) da sujeira sobre determinado módulo FV; ou seja pela característica não uniforme, ou não homogênea, da sujeira sobre este módulo FV, apresentando assim diferentes valores de densidade de superfície para um mesmo módulo.

Através das inspeções visuais realizadas nas três avaliações deste estudo, verificou-se que a concentração de sujeira, considerando o mesmo tipo de sujeira, irá variar em forma sobre o módulo FV, localização sobre o módulo FV e em densidade de superfície (mg/cm^2). A variação de tipo de sujeira, como por exemplo de uma região para outra (entre Brotas de Macaúbas e Buritis, por exemplo), resultará ainda

em diferentes aspectos que possam vir a sofrer variação, como distribuição de tamanho de partículas, forma de partículas e composição.

Qasem (2013) afirma que, consideradas constantes a granulometria e composição da amostra, o acúmulo de sujeira sobre sistemas FV irá variar sob três formas:

Atenuação espectral (relativas às diferentes tecnologias FV);

Concentração de sujeira sobre o módulo FV (relativas às diferentes atenuações espectrais impostas pela sujeira);

Uniformidade da densidade de sujeira (relativas às diferentes topologias elétricas dos módulos FV);

Ou seja, conforme verificado, os impactos de forma, localização e densidade, são avaliações análogas aos três pontos descritos por Qasem (2013).

No caso dos módulos de silício cristalino, a uniformidade de sujeira apresenta maior impacto na perda de desempenho do sistema, pois tem relação direta com a topologia elétrica do módulo FV.

No caso de módulos de filme fino, o impacto será evidenciado pela concentração ou densidade de sujeira sobre o módulo FV.

Contudo, mensurar essa concentração de sujeira sobre o módulo FV não é tarefa trivial. Conforme dito, poucos estudos são conduzidos na forma de mensurar concentrações de sujeira, sendo esses mais focados na análise qualitativa e quantitativa de amostras de sujeira retiradas sobre módulos FV.

4.4.2 INCERTEZAS INERENTES AO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Sem levar em conta o aspecto qualitativo e quantitativo da sujeira, o processo de medição de um módulo ou sistema FV em campo possui incertezas, sejam relacionadas ao sistema de medição ou as variações das condições ambientais (Dirnberger, 2013).

As principais incertezas associadas aos instrumentos utilizados do sistema de medição (sensor de temperatura, sensor de irradiância, traçador de curva IxV), no que dizem respeito à exatidão da medida (quanto de fato a medida desvia do valor real) podem ser expressas como:

- Irradiância medida pela célula de referência: incerteza total atribuída ao sensor;
- Descasamento espectral: diferença entre a resposta espectral da célula de referência e do módulo avaliado;
- Calibração do sensor de temperatura;
- Correção dos valores adquiridos para as condições-padrão (STC);

Contudo, considerando que as aquisições para o sistema sujo e limpo são realizadas com os mesmos instrumentos, através do mesmo método, com os valores de irradiância mais próximos possíveis entre si, estas incertezas são suavizadas de modo a se tornarem desprezíveis para esta análise, principalmente frente às demais fontes de incerteza.

As incertezas do sistema de medição, no que diz respeito à precisão da medida obtida, são resultantes das oscilações das condições ambiente, neste caso, entre os dois dias. As principais fontes de incerteza são:

- Distribuição espectral relativa: Embora a medida de irradiância seja aferida pelo mesmo instrumento, não pode-se afirmar que a distribuição espectral seja exatamente a mesma;
- Diferenças de temperatura entre célula FV e parte inferior do módulo FV e diferenças de temperatura entre regiões do módulo FV e a região de fixação do sensor de temperatura (gradientes de temperatura).

A distribuição espectral relativa entre as medidas pode ser quantificada para posterior correção, utilizando um espectrorradiômetro. Contudo, os valores de resposta espectral das diferentes tecnologias variam de fabricante para fabricante. Tais grandezas não são fornecidas pelo fabricante e necessitam de equipamentos específicos para aferição da resposta espectral.

Os gradientes de temperatura são as principais fontes geradoras de incerteza da medida. Os fatores que implicam esta variação de temperatura do sistema são: temperatura ambiente, variação da temperatura ambiente por regime de ventos e tamanho do sistema aferido (tamanho de módulo, no caso da avaliação de um único módulo FV e número de módulos, para avaliação de um sistema). Portanto, para mitigar este impacto, um aumento no número de curvas adquiridas para cada estágio da análise foi proposto.

4.5 PROPOSTA DE APERFEIÇOAMENTO DO MÉTODO

A proposta de aperfeiçoamento do método de aquisição de curvas IxV em campo, para posterior análise de medidas relativas entre si, visando mensurar a perda de desempenho por acúmulo de sujeira teve as seguintes melhorias já implementadas:

- Estabelecimento dos critérios de aquisição de dados para a curva IxV: dia de céu aberto sem nuvens, mesmo horário do dia, com valores de irradiância os mais próximos possíveis entre si e superiores a 850 W/m^2 , visando manter as condições de medição as mais semelhantes, reduzindo assim as incertezas relativas;
- Aumento do número de curvas adquiridas em cada estágio do processo de avaliação: buscando assim reduzir os impactos associados aos gradientes de temperatura impostos pelas oscilações nas condições ambientes.

Através do desenvolvimento do estudo, análise dos resultados e maior conhecimento das incertezas do processo de medição, as seguintes melhorias são propostas para futuras análises:

- Aquisição de distribuição de irradiância no instante da obtenção da curva IxV, visando assim mensurar a oscilação da distribuição da irradiância entre os dois estágios de medição;
- Coleta de amostra de sujeira dos módulos FV avaliados, para uma avaliação de granulometria e composição, assim como uma obtenção de curvas de transmitância espectral para diferentes densidades de sujeira;
- Utilização de sensores de irradiância com mesma tecnologia FV do módulo avaliado (ou com filtros que simulem esta condição), para assim anular o efeito do descasamento espectral.

5 CONCLUSÕES

Através de seguidas avaliações, em diferentes sistemas, com diferentes tecnologias e diferentes tipos e perfis de acúmulo de sujeira, pôde-se obter dados suficientes para aperfeiçoar, através dos resultados obtidos, o método de avaliação de perda por sujeira através de medições em campo, e as implicações específicas que determinado tipo de sujeira apresenta na atenuação da irradiância incidente sobre o módulo FV.

O conhecimento detalhado do tipo de sujeira da região, seja na característica de disposição espacial sobre o módulo ou sistema FV (através de forma, localização e densidade de sujeira), ou de constituição da sujeira (granulometria e composição), pode ser utilizado como fator contribuinte para a escolha da tecnologia FV a ser utilizada em determinado local, como fator decisivo na escolha do local, ou como fator decisivo para tomada de decisões no que diz respeito ao estabelecimento de uma rotina de limpeza dos módulos do sistema FV. Como pôde ser visto, o sistema FV de Brotas de Macaúbas, meramente por suas condições ambientais, apresenta uma disposição espacial de sujeira sobre o módulo FV que prejudica de forma acentuada os sistemas da tecnologia de silício cristalino, frente aos sistemas de filme fino (perdas cerca de três vezes maiores, para a primeira visita). As consequências econômicas da necessidade de limpeza periódica dos módulos de um gerador solar fotovoltaico não foram consideradas neste estudo, e devem ser levadas em conta quando da preparação dos estudos de viabilidade econômica do empreendimento.

Foi verificado, através da Tabela 7, que a tecnologia de silício cristalino, por causa meramente de sua topologia elétrica, sofre maior impacto na distribuição não-homogênea de sujeira, especialmente quando a densidade de sujeira é maior em determinado ponto do módulo FV em comparação aos demais pontos. Fato esse evidenciado pela comparação dos resultados das duas análises para o mesmo sistema de Brotas de Macaúbas, onde o mesmo perfil de sujeira depositado sobre os módulos FV, em diferentes concentrações, obteve valores muito discrepantes entre si, como no caso da tecnologia de silício multicristalino, com valores cerca de cinco vezes maiores (aproximadamente 1,9% para 2015, e 11,3% para 2014). Para as tecnologias de filme fino, o pior caso obteve valores cerca de duas vezes maiores (a-Si, com perdas da ordem de 8,34% para 2014, e 4,34% para 2015).

O resultado da avaliação experimental realizada corrobora com a curva de transmitância conhecida da literatura (Qasem et al, 2012), onde ambas as curvas de transmitância, com diferentes granulometrias, para amostras com diferentes concentrações de sujeira, obtiveram o mesmo perfil de curva, com atenuação acentuada nos baixos comprimentos de onda, em comparação aos altos comprimentos de onda, para todas as diferentes concentrações. Como foi observado, a dispersão da irradiância incidente é evidenciada para os menores comprimentos de onda, independente da distribuição de partículas da sujeira (ou granulometria). Essa atenuação acentuada é ainda mais evidenciada para concentrações (ou densidade de superfície) elevadas de sujeira, conforme observado nos resultados obtidos através da análise experimental, onde para concentrações acima de 15 mg/cm^2 a diferença nos valores de atenuação da irradiação solar é maior para os baixos comprimentos de onda, em relação aos altos comprimentos de onda. Esta afirmação pôde ser comprovada na avaliação de Buritis, onde a concentração de sujeira encontrava-se visivelmente elevada.

Como as análises, experimental e conhecida da literatura, apresentaram curvas de transmitância com perfis semelhantes, mesmo para sujeiras com concentrações, composições e granulometrias diferentes, pôde-se concluir que a resposta espectral de cada tecnologia fotovoltaica tem impacto fundamental na perda de desempenho por acúmulo de sujeira, sendo as tecnologias mais prejudicadas aquelas que possuem resposta espectral situada nos baixos comprimentos de onda, ou seja principalmente as tecnologias a-Si e CdTe, independente do tipo de sujeira.

Na avaliação de sistemas de filmes finos, o impacto da sujeira é evidenciado pela concentração de sujeira sobre o módulo (sujeira homogênea) ou em determinado ponto do módulo (sujeira não-homogênea), principalmente para as tecnologias onde a janela de resposta espectral está contida nos baixos comprimentos de onda, como é o caso da tecnologia a-Si, pelos motivos acima descritos. A tecnologia CIGS, por apresentar simultaneamente disposição otimizada de células (no que diz respeito ao perfil de sujeira não-homogênea) e resposta espectral de intervalo amplo e com amplitudes máximas situadas nos altos comprimentos de onda, é a tecnologia que apresenta menor impacto na geração através do acúmulo de sujeira. Na primeira avaliação de Brotas de Macaúba-BA, onde os sistemas se encontravam com concentração elevada de sujeira, o sistema CIGS apresentava as menores perdas relacionadas ao acúmulo de sujeira, se comparado às demais tecnologias, mesmo sendo o sistema visivelmente mais sujo.

Entretanto, o aspecto visual não pode, ser tomado como referência absoluta. A incerteza nos valores de concentração de sujeira sobre os módulos FV é o principal fator que dificulta a comparação dos resultados, uma vez que os sistemas comparados não apresentavam a mesma concentração de sujeira entre eles, aspecto este evidenciado principalmente nas avaliações de Brotas de Macaúbas. Por este motivo, um método de quantificação da concentração de sujeira sobre os módulos FV faz-se extremamente necessário, para que a comparação dos resultados possa ser realizada de maneira mais precisa.

Os aspectos construtivos do módulo FV, seja pela topologia elétrica, conforme previamente afirmado, ou seja pelos diferentes materiais utilizados, como vidro, presença ou não, ou até mesmo a altura de molduras de módulos FV, podem apresentar impacto na concentração de sujeira sobre o módulo FV, conforme pôde ser observado na avaliação de Buritis, onde a moldura do módulo FV teve aspecto fundamental no impacto do acúmulo de sujeira sobre os mesmos.

Um levantamento das incertezas envolvidas no processo do sistema de medição, através da avaliação dos procedimentos de medição em campo utilizados nas três visitas, e através de estudos presentes na literatura, ajudou a compreender o impacto de cada instrumento de medição e também como forma de mitigar as incertezas totais relativas à análise, através do aumento da amostra, estratégia utilizada nas avaliações de Buritis. Sugestões de como reduzir ainda mais estas incertezas foram elencadas e serão implementadas em futuras análises desenvolvidas por este grupo de pesquisa.

Através deste estudo, melhorias no procedimento de medição em campo foram implementadas, como condições pré-definidas para posterior comparação de estágios de medição (limpo e sujo), como posicionamento de sensor de irradiância e temperatura, e estratégias de medição como padronização dos valores de irradiância para ambas as medidas (limpa e suja). Também foi implementado um aumento no número de curvas obtidas para cada estágio de medição, visando reduzir as incertezas associadas aos valores de precisão do sistema de medição. Valores obtidos entre 0,24% e 1,13% ajudaram a reduzir a incerteza-padrão de 2% do equipamento, dado fornecido pelo fabricante. Uma análise mais detalhada das incertezas envolvidas em todo o processo faz-se necessária.

Com a adoção em larga escala de usinas solares fotovoltaicas de grande porte no Brasil, que vem sendo realizada através de leilões que até o presente já contrataram a construção de mais de 3 mil megawatts

de potência, o conhecimento dos efeitos do acúmulo de sujeira no desempenho de geradores fotovoltaicos passa a ser de interesse não somente científico e tecnológico, mas também econômico. Este trabalho pretendeu avançar na experiência acumulada nesta área no Brasil e contribuir para o conhecimento e estabelecimento de um método para a estimação dos efeitos descritos aqui.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Método para quantificação da concentração de sujeira depositada sobre módulos FV;
- Previsão de perdas de desempenho por acúmulo de sujeira sobre sistemas FV, através da quantificação de valores de concentração de sujeira;
- Análise técnico-econômica para tomada de decisão de intervenção manual de limpeza em sistemas FV;
- Análise detalhada das incertezas do processo de obtenção de curvas IxV em campo: medidas absolutas e relativas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Hasan, A. Y. A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface. **Solar Energy**, vol. 63, 323-333, 1998.

Alonso-García, M.C.; Ruiz, J.M.; Chenlo, F. Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Volume 90, Issue 3, 2006.

Alonso-Abella, M., et al. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. **Energy**, Volume 67, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT 10899:2006 – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia, 2006.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G173-03**. 2012.

Bird, R.E.; Hulstrom, R.L.; Lewis, L.J. Terrestrial solar spectral data sets. **Solar Energy**, Volume 30, Issue 6, 1983.

Brooks, A. E., et al. The consequence of soiling on PV system performance in Arizona; Comparing three study methods. In: Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013 IEEE 39th, Tampa, FL, 2013.

Caron, J. R.; Littmann, B. Direct Monitoring of Energy Lost Due to Soiling on First Solar Modules in California. In: IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 3, no. 1, pp. 336-340, Jan. 2013.

Cox, A. J.; DeWeerd, A. J.; Linden, J. An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections. **American Journal of Physics**, Volume 70, 620-625, 2002.

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPTEL - CRESESB. Rio de Janeiro - Brasil, 2014.

Darwish, Z. A., et al. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 41, 2015.

DGS. Planning and Installing Photovoltaic Systems - A guide for installers, architects and engineers. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie - The German Energy Society Berlin, 2008.

Dirnberger, D.; Kräling, U. Uncertainty in PV Module Measurement—Part I: Calibration of Crystalline and Thin-Film Modules. **IEEE Journal of Photovoltaics**, vol. 3, no. 3, pp. 1016-1026, Julho 2013.

Dirnberger, D., et al. On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Volume 132, 2015.

DOS SANTOS, I. P., et al. Ábacos para análise simplificada de orientação e inclinação de sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações. In: Anais IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino Americana da ISES – ABENS. São Paulo, 2012.

Dubey, S; Sarvaiya, J. N.; Seshadri, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. **Energy Procedia**, Volume 33, 2013.

Duffie, J.A.; Beckman, W.A. **Solar engineering of Thermal Processes**. Wiley J. & Sons, Inc, New York, 1991.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. **Photovoltaics Report**. 2015.

Dunn, L., et al. PV module soiling measurement uncertainty analysis. In: Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013 IEEE 39th , 658-663, 16-21 Junho 2013.

EL CHAAR, L.; LAMONT, L. A.; EL ZEIN, N. Review of photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Issue 5, v.15, p.2165-2175, 2011.

Emery, K., et al. Photovoltaic Spectral Responsivity Measurements. NREL, 1998.

First Solar - FS-Series PV Module Cleaning Guidelines, 2013.

Gostein, M., et al. Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements. In: Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013.

Gostein, M.; Caron, J. R.; Littmann, B. Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. In: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO, 2014.

Gostein, M.; Caron, J.R.; Littmann, B. Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. In: Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th, 885-890, 8-13 Junho 2014.

Green, M. A. SOLAR CELL FILL FACTORS: GENERAL GRAPH AND EMPIRICAL EXPRESSIONS. *Solid State Electronics* Vol. 24, No. 8, pp. 788-789, 1981.

Gueymard, C.A.; Myers, D.; Emery, K. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing. **Solar Energy**, Volume 73, Issue 6, 2002.

Guo, B., et al. Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar. **Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)**, 2015 First Workshop on, Doha, 2015.

Haeberlin, H., Graf, J.D. Gradual reduction of PV generator yield due topollution. In: 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6–10 Julho 1998.

Huld, T., et al. Data sets for energy rating of photovoltaic modules, **Solar Energy**, Volume 93, 2013.

International Electrotechnical Commission. IEC 60904-3– Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. 2008.

International Electrotechnical Commission, IEC 60891, Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. 2nd ed, 2009.

International Electrotechnical Commission. IEC 61853-1, Photovoltaic (PV) Module Performance Testing and Energy Rating. 2011.

Iqbal, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Academic Press, Toronto. 1983. 408p.

Ishii, T., et al. Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions. **Prog. Photovolt: Res. Appl.**, Volume 21: 481–489, 2011.

Kaldellis, J. K.; Kapsali, M.; Kavadias, K. A. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. **Renewable Energy**, Volume 66, 2014.

Kimber, A., et al. The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States. In: Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, HI, 2006.

Krebs, F. C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Volume 93, Issue 4, 2009.

Li, H., et al. Solar constant values for estimating solar radiation. **Energy**, Volume 36, Issue 3, 1785-1789, 2011.

Lopez-Garcia, J.; Pozza, A.; Sample, T. Long-term soiling of silicon PV modules in a moderate subtropical climate. **Solar Energy**, Volume 130, Pages 174-183, 2016.

Lorente, D. G., et al. Mismatch losses in PV power plants. **Solar Energy**, Volume 100, 2014.

LORENZO, E.; MORETÓN, R.; LUQUE, I. Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2013.

MARION, B., et al. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In: 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition. Lake Buena Vista, Florida, 2005.

Massi Pavan, A., et al. A comparison between BNN and regression polynomial methods for the evaluation of the effect of soiling in large scale photovoltaic plants. **Applied Energy**, Volume 108, 2013.

Mishchenko, M. I.; Travis, L. D.; Lacis, A. A. **Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles**. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

MORGERA, A.F.; LUGHI, V. Frontiers of photovoltaic technology: A review. In: Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference. 115-121, 16-18 Junho 2015.

Nelson, L.; Hansen, C. Evaluation of photovoltaic system power rating methods for a Cadmium Telluride array. In: Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE, Seattle, WA, 2011.

Nofuentes, G., et al. Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution. **Applied Energy**, Volume 113, 2014.

NREL - National Renewable Energy Laboratory - **Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review**. 2012.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Issue 3, v.15, p.1625-1636, 2011.

QASEM, H., et al. Dust-induced shading on photovoltaic modules. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2012.

Qasem, H.; Betts, T.R.; Gottschalg, R. Spatially-resolved modelling of dust effect on cadmium telluride photovoltaic modules. **Solar Energy**, Volume 90, 2013.

Qasem, H. **Effect of accumulated dust on the performance of photovoltaic modules**, 2013, 145p.. Tese de Doutorado, Loughborough University, Londres, 2013.

Razykov, T.M, et al. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. **Solar Energy**, Volume 85, Issue 8, 2011.

Ross, R. G.; Gonzalez, C. C. Reference Conditions for Reporting Terrestrial Photovoltaic Performance. In: AS/ISES 1980 Annual Meeting, 1980.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. LABSOLAR/UFSC. Florianópolis - Brasil, 2004.

Saito, J.; Sasaki, H.; Yachi, T. Degradation of photovoltaic module output power by microparticles. In: 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, WA, 2011.

Schill, C.; Brachmann, S.; Koehl, M. Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules. **Solar Energy**, Volume 112, 2015.

Sinha, P., et al. Environmental variables affecting solar photovoltaic energy generation in Morocco. In: Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2014 International, 230-234, 17-19 Outubro 2014.

Townsend, T. U.; Hutchinson, P. A. Soiling Analysis at PVUSA. In: Proceedings of ASES-2000, Madison, WI, 2000.

WAGNER, A. Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions; University of Applied Sciences Dortmund, 2000.

Zorrilla-Casanova, J., et al. Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules. In: Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden, 2011.

Zorrilla-Casanova, J., et al. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. **Prog. Photovolt: Res. Appl.**, Volume 21: 790–796, 2013.