

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE - IEE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA - PPGE

**ANÁLISE DAS PERDAS DE PRODUTIVIDADE EM GERADORES
FOTOVOLTAICOS POR EFEITO DE SUJIDADE**

VINÍCIUS GOUVEIA SCARTEZINI DE REZENDE

SÃO PAULO

2017

VINÍCIUS GOUVEIA SCARTEZINI DE REZENDE

ANÁLISE DAS PERDAS DE PRODUTIVIDADE EM GERADORES
FOTOVOLTAICOS POR EFEITO DE SUJIDADE

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles.

Versão Original

SÃO PAULO

2017

Nome: SCARTEZINI DE REZENDE, Vinícius Gouveia

Título: Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Energia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Presidente: _____ Assinatura: _____

APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos, diversos fatores contribuíram para inserção e difusão da geração fotovoltaica conectada à rede no Brasil, como, por exemplo, melhoria da tecnologia em termos de eficiência e versatilidade, redução dos custos de geradores fotovoltaicos no mercado internacional, melhoria do marco regulatório do setor apoiado por empreendedores e instituições acadêmicas, mobilização governamental para a elaboração de resoluções normativas, por meio da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, como a Resolução Normativa nº 482/2012¹, Resolução Normativa nº 687/2015² e as Chamadas de Projeto de P&D Estratégicos, entre outros fatores favoráveis para o crescimento contínuo do mercado fotovoltaico, como os leilões de energia de reserva (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015).

Em 2014 foi publicado a portaria do Ministério de Minas e Energia – MME nº 236, promovendo o Leilão de Energia de Reserva – LER do mesmo ano, em que se previa negociações de Contratos de Energia de Reserva – CER durante 20 a partir de outubro de 2017, seguindo a modalidade quantidade de energia, com diferenciações por tipo de fonte geradora, onde participaram diferentes projetos. Dentre os diferentes projetos cadastrados e habilitados que representaram 10.790 MW, foram contratados somente 202,1 MW_{med} (EPE, 2014).

O primeiro LER de 2015, oficializado pela portaria MME nº 69, teve projetos cadastrados e habilitados que representando 11.261 MW de potência instalada, sendo contratados 232,9 MW_{med}. Já o segundo LER de 2015, oficializado pela portaria MME nº 70, teve projetos cadastrados e habilitados que representando 20.953 MWp de potência instalada, sendo contratados 245,3 MW_{med} (EPE, 2015).

No ano de 2016 não foi verificado a participação de energia fotovoltaica em leilões de reserva, visto que o primeiro leilão do ano teve foco em hidroeletricidade e o segundo acabou sendo cancelado por intermédio da portaria MME nº 705.

¹ Estabelece diretrizes para o acesso de micro e mini geração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, sistema de compensação da energia distribuída e informa outras condições interessantes para o público de interesse.

² Publicada de forma a revisar a Resolução Normativa nº 482/2012, promovendo melhorias e esclarecimentos sobre o acesso de micro e mini geração distribuída, bem como novas diretrizes sobre as condições de adesão e crédito de energia.

Diversos estudos apontam que um desenvolvimento econômico e sustentável do mercado brasileiro, pode ser apoiado pelo uso de fontes de energia renovável. Certamente toda uma infraestrutura de apoio social e empresarial se faz necessário nos locais de inserção das tecnologias. No caso Brasileiro, a implementação de geração fotovoltaica distribuída se torna bastante atraente ao se verificar uma quantidade favorável de irradiação global anual em praticamente todo território, conforme evidenciado na Figura 0.1, a qual mostra o mapa mundial de irradiação normal direta e irradiação global horizontal num período anual, segundo dados obtidos do *software* SOLARGIS (SOLARGIS, 2016).

Outro fato interessante é de que presenciamos um aumento da potência instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil de forma crescente, conforme verificado na Figura 0.2, a qual mostra o número de conexões acumulado desde dezembro do ano de 2012 até novembro de 2016, segundo os dados da ANEEL, somando cerca de 6670 novas conexões no sistema elétrico brasileiro, totalizando uma potência de 47.266 kW, conforme apresentado pela Figura 0.3.

Apesar da confiabilidade técnica existente, os sistemas fotovoltaicos ainda apresentam dúvidas relacionadas ao seu desempenho operacional em ambientes com elevado nível de poluição e/ou que apresentam expressiva quantidade de material particulado suspenso. Fazendo com que seja necessário a pesquisa e a busca por informações, que auxiliem na operacionalidade dos sistemas, no âmbito da sujidade, custos e benefícios da frequência de limpeza, bem como índices de consumo de água (RYAN; VIGNOLA; McDANIELS, 1989; FARKAS; FRONTINI; MATURI, 2012).

Estudo da sujidade em sistemas fotovoltaicos é algo que atualmente não se tem muitas informações detalhadas e o preenchimento da lacuna de conhecimento em relação ao problema tem grande peso de contribuição, ao passo que possibilita auxiliar empresas e empreendedores em seus projetos de implementação, pesquisa e desenvolvimento. Facilitando a redução de custos nas metodologias de limpeza e aumentando a produtividade dos sistemas a partir de um ponto ótimo para cada caso específico (COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2016).

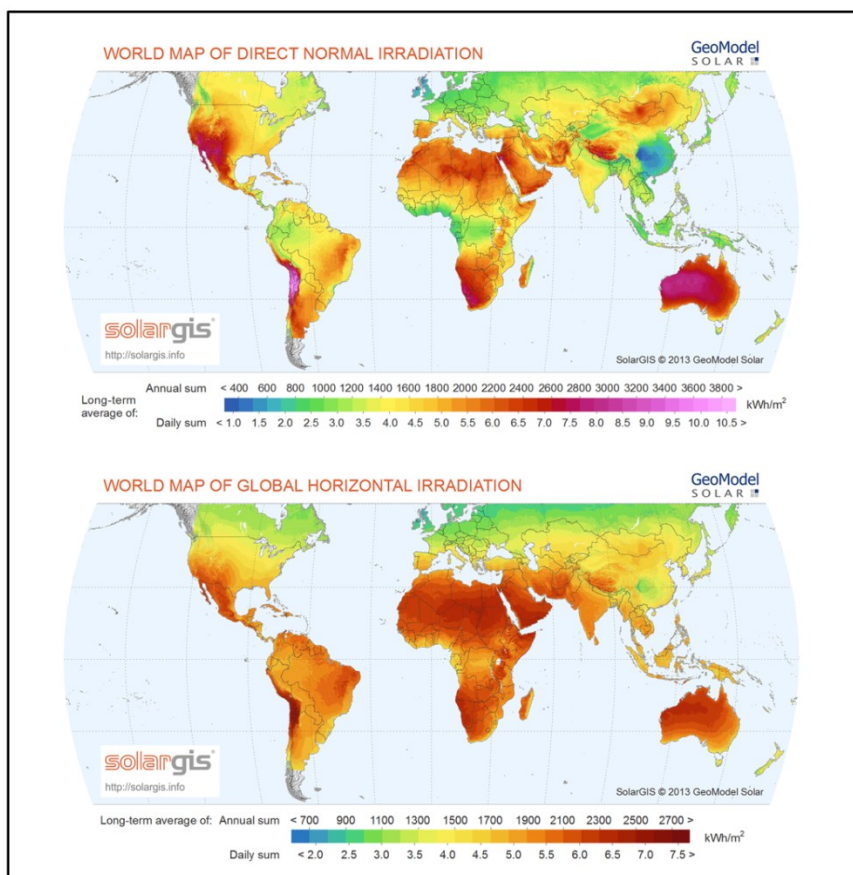


Figura 0.1 - Mapa mundial de irradiação direta normal e global horizontal num período anual. Fonte: SOLARGIS, 2013³.

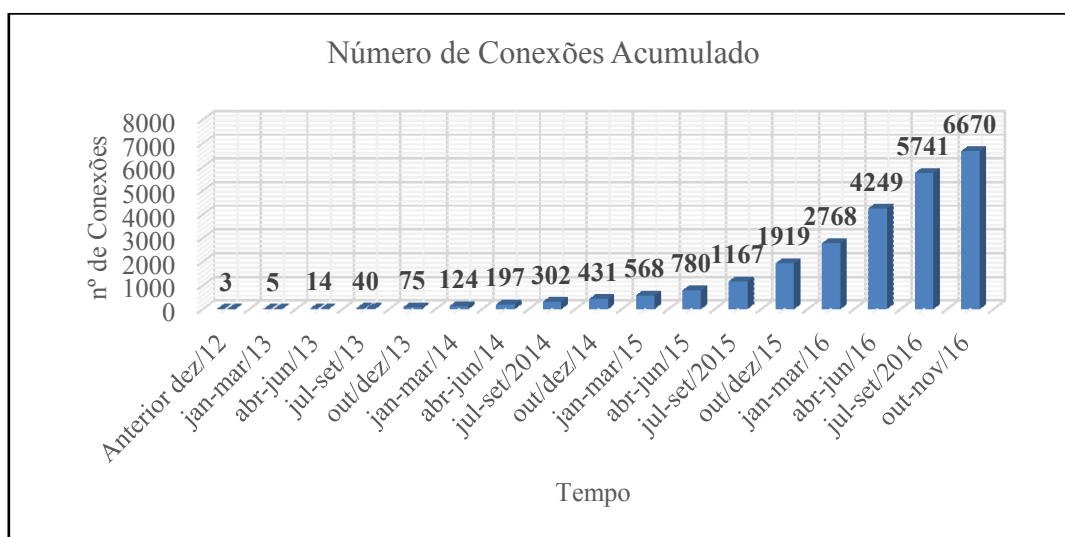


Figura 0.2 - Número de conexões à rede acumulado de dezembro de 2012 até novembro de 2016. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016⁴.

³ Disponível em: <<http://geosun.co.za/solar-maps/>>. Acesso em agosto de 2016.

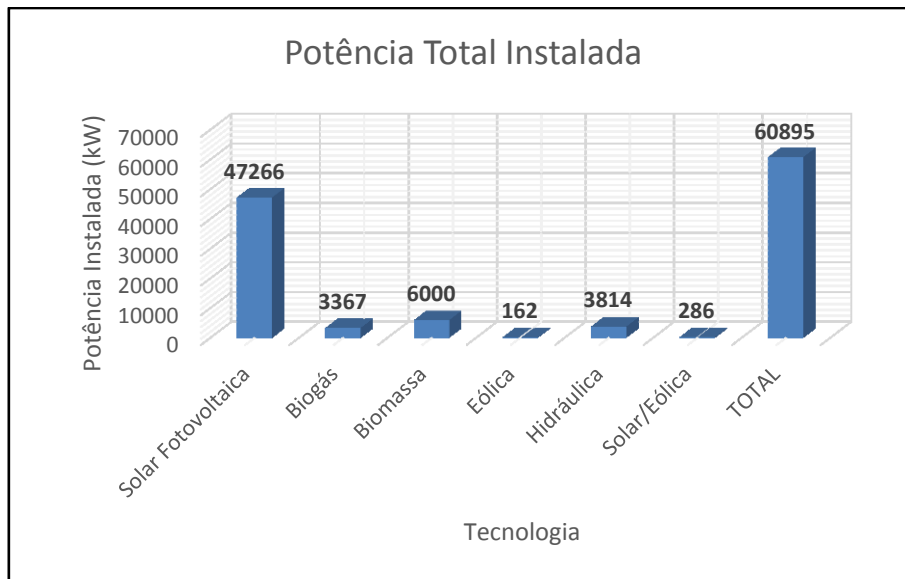


Figura 0.3 - Potência total instalada de diversas fontes de energia renovável no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016⁵.

Caracterização do Problema

Os módulos fotovoltaicos são confeccionados de uma forma que possam resistir às diferentes condições ambientais, sendo possível a existência de um certo nível de proteção contra a ação de esforços mecânicos, dos agentes atmosféricos e da umidade. A Figura 1.4 visa mostrar os materiais normalmente utilizados na fabricação de módulos, onde as células são revestidas de uma película de etileno acetato de vinilo (EVA), o que proporciona uma certa flexibilidade, translucidez, diminuição da reflexão da radiação solar e de certa forma assegura o isolamento elétrico entre as células (MANI e PILLAI, 2010).

⁴ Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

⁵ Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

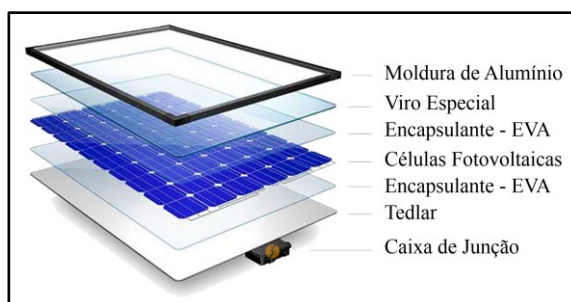


Figura 0.4 - Insumos Utilizados na Fabricação do Painel Solar Fotovoltaico. Fonte: Adaptado de PORTALSOLAR, 2017⁶.

Existem dificuldades relacionadas a permeabilidade de luz na célula fotovoltaica, em situações de sombreamento e sujidade, facilitando a perda de produtividade dos módulos fotovoltaicos. Situações no âmbito de sombreamento temporário resultam de acúmulo de folhas, sujeira também proveniente de dejetos de pássaros, poeiras de zonas urbanizadas, areia e até mesmo acúmulo de gelo e entre outras situações (HAMMOND; SRINIVASAN; HARRIS; WHITFIELD; WOHLGEMUTH, 1997; COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2016).

A remoção de materiais impregnados e dispostos na superfície dos módulos pode ocorrer de diferentes formas, seja da mais simples com ação de vento e chuva em situações de baixa impregnação e com um certo grau de inclinação dos módulos, ou até mesmo por lavagem com água e raspagem de materiais altamente impregnados, logicamente evitando-se ao máximo danificar a superfície do módulo.

Segundo o gerente de produtos da empresa SunPower, Kyle Cobb, agentes impregnados podem gerar a perda de produtividade de energia, variando entre 2% a 15% ou mais em outros casos mais severos, conferindo ainda mais a importância de uma rotina de limpeza eficiente, bem como a necessidade de implementação de uma metodologia de avaliação de impactos de sujidade na produção de energia. A Figura 0.5, ilustra a problemática da sujidade⁷ em sistemas de geração fotovoltaica, situação que retrata a importância do estudo sobre os efeitos da sujidade na produtividade de sistemas fotovoltaicos.

⁶ Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 04 de abril de 2017.

⁷ Efeito relacionado à perda de geração de energia em módulos fotovoltaicos devido ao acúmulo de diversos elementos, como, por exemplo, compostos químicos variados e presentes em água da chuva e no ar, pó, areia, argila, sal, neve, fungos, fezes de pássaros, materiais orgânicos como seiva, folhas e galhos de árvores e entre outros materiais particulados diversos existentes no meio ambiente.

Ambientes urbanos com elevado índice de poluição, atividade industrial e tráfego de veículos, representam um grande potencial para estudos de sujidade e aplicação de diferentes metodologias do tema. No caso brasileiro, os grandes centros urbanos representam localidades potenciais e os estudos nessas regiões podem ser utilizados como referências para outras localidades do globo, uma vez que apresentem características semelhantes. Desse modo as pesquisas brasileiras podem contribuir positivamente no setor fotovoltaico internacional.

Ainda existe uma carência de conhecimento no âmbito da sujidade em diferentes localidades do globo. Os poucos estudos sistemáticos existentes na literatura são em maior parte dedicados para usinas de grande porte em ambientes com alta concentração de poeira e areia. Se há difundido a mensagem de que não vale o esforço, material e econômico, para a limpeza dos módulos fotovoltaicos, em particular para sistemas de microgeração. Entretanto não se encontra uma sustentação metodológica e experimental para essa mensagem e, dependendo das condições, nível de ocupação, poluição, índice pluviométrico e inclinação do gerador fotovoltaico, as perdas de produtividade podem justificar a implantação de uma rotina de limpeza.



Figura 0.5 - Sujidade em painéis de plantas solares. Fonte: COBB, 2014.

A ausência de estudos sistemáticos dos efeitos da sujidade, em particular no ambiente urbano com alta densidade de veículos e poluição, contempla aspectos que irão oferecer incremento de conhecimento para o setor, empreendedores e empresas,

auxiliando em projetos e *softwares* da área fotovoltaica, possibilitando avaliar também ganhos e custos associados com implementação de rotinas de limpeza de diversos sistemas fotovoltaicos.

Em relação a descrição do problema surge diretamente as seguintes perguntas:

1. Como o efeito da sujeidade afeta a produtividade? Quais são os valores e comportamentos esperados?
2. Quais os principais pontos levantados na elaboração de uma escala de limpeza?
3. Quais as alternativas para minimizar os impactos? Quais são os impactos técnicos e econômicos dessas alternativas?
4. Qual o ponto ótimo no parâmetro tempo de limpeza versus produtividade?
5. Que experiências de empresas conhecidas podem auxiliar no estudo e preenchimento da lacuna de conhecimento?

Respostas para as perguntas anteriores serão interessantes na busca de conhecimento relacionado a diversos públicos, e poderão agregar valor ao estudo em questão.

1.1 Objetivos

O principal objetivo desse projeto de pesquisa consiste em quantificar as perdas de produtividade de energia de sistemas fotovoltaicos devido a sujeidade acumulada nos módulos, em regiões urbanas e altamente propensas ao efeito. Não obstante, de forma secundária, tem-se os objetivos de levantar dados de consumo de água e custos associados com as atividades de limpeza.

Os objetivos específicos dessa pesquisa de mestrado são:

1. Utilizar um sistema de micro geração solar fotovoltaica, distribuído em subsistemas;
2. Analisar o acúmulo da sujeidade em uma dada inclinação ao longo do tempo;
3. Coletar os dados de produtividade, kWh/kWp, relacionado o impacto da sujeidade ao longo do tempo de estudo nos subsistemas;

4. Desenvolver uma metodologia de limpeza eficiente para os geradores fotovoltaicos;
5. Levantar e analisar dados de custos relacionados a limpeza, como, por exemplo, índice de consumo de água e mão de obra.
6. Desenvolver um material de orientação para escalas de limpeza dos sistemas fotovoltaicos.
7. Desenvolver escalas de rotina de manutenção preventiva;
8. Definir os critérios necessários para que seja necessária uma escala de limpeza, bem como os procedimentos de limpeza;

Metodologia Utilizada

Para a obtenção dos objetivos traçados faz-se necessário determinar um passo a passo metodológico, de forma a facilitar o andamento e compreensão do estudo proposto. Nesse sentido, foram estabelecidas 7 atividades:

1. Executar uma revisão de literatura vinculada aos impactos da sujidade em sistema fotovoltaicos, visando buscar informações sobre o assunto da pesquisa em questão e metodologias já existentes;
2. Definir e caracterizar o local em que o sistema de geração será utilizado e analisado, sendo necessária a escolha de um local com alto nível de material particulado suspenso, o que pode ser próximo a grandes vias de tráfego automotivo na cidade de São Paulo;
3. Definir e caracterizar os equipamentos utilizados, bem como o tempo de análise de dados e de escala de limpeza para cada subsistema, tendo em vista a duração do programa de mestrado;
4. Analisar os impactos da sujidade em relação à produtividade ao longo do tempo, levantando dados em kWh/kWp dos sistemas;
5. Desenvolver uma metodologia eficiente para diferentes escalas de limpeza, bem como os equipamentos utilizados, registrando dados de consumo de água e tempo de trabalho da limpeza;
6. Efetuar uma análise de custos para a rotina de limpeza, tendo em conta o consumo de água, mão de obra e tempo de limpeza;

7. Elaborar um material informativo para orientação de implementação escalas de limpeza em geradores fotovoltaicos.

O local do experimento será o subsistema CTPV da usina fotovoltaica do Instituto de Energia e Ambiente – IEE, presente na Universidade de São Paulo – USP. O subsistema possui 10 mesas fotovoltaicas, compostas por 60 módulos fotovoltaicos de dimensões 0,99 m x 1,65 m, organizados em 3 fileiras de 20 módulos com uma *string-box* em cada fileira. Os módulos serão limpos somente com água comum de torneira e utilizando alguns instrumentos, como, cabos de extensão telescópica, fibras abrasivas de limpeza leve em vidros, mops para limpeza em vidros e adaptadores para agrupar os cabos, fibras e mops,

Para descrição e apresentação do desenvolvimento da pesquisa e respectivos resultados é proposta a seguinte estrutura capitular (avanços já realizados podem ser verificados no Apêndice I):

1. Introdução:
 - i. Apresentando o problema: efeitos da sujeira na produtividade de sistemas fotovoltaicos;
 - ii. Objetivos e metodologia.
2. Capítulo 1:
 - i. Breve revisão bibliográfica dos impactos da sujeira nos sistemas e metodologias de análise;
 - ii. Caracterização da região e local em que o estudo será efetuado.
3. Capítulo 2:
 - i. Detalhar os equipamentos a serem utilizados, período e forma de análise de dados, bem como explicação dos serviços de instalação e monitoramento dos sistemas e atividade de limpeza;
4. Capítulo 3:
 - i. Detalhar e expor os dados que foram adquiridos no estudo, utilizando tabelas e gráficos;

ii. Evidenciar os resultados do estudo.

5. Capítulo 4:

- i. Detalhar a metodologia eficiente para as escalas de limpeza;
- ii. Detalhar a análise de custos relacionados ao projeto;
- iii. Elaboração de material didático para orientação de escalas de limpeza.

6. Capítulo 5:

- i. Conclusões do estudo;
- ii. Recomendações do estudo.

7. Referências Bibliográficas

8. Apêndices.

APÉNDICE I

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

**ANÁLISE DAS PERDAS DE PRODUTIVIDADE EM GERADORES
FOTOVOLTAICOS POR EFEITO DE SUJIDADE**

VINÍCIUS GOUVEIA SCARTEZINI DE REZENDE

SÃO PAULO

2018

VINÍCIUS GOUVEIA SCARTEZINI DE REZENDE

ANÁLISE DAS PERDAS DE GERAÇÃO EM MICROGERADORES
FOTOVOLTAICOS POR EFEITO DE SUJIDADE

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles.

Versão Original

SÃO PAULO

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Scartezini de Rezende, Vinícius Gouveia.

Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade / Vinícius Gouveia Scartezini de Rezende; Orientador Roberto Zilles – São Paulo, 2018.

151 f.: il.: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências da Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Energia Solar 2. Geração Fotovoltaica 3. Sujidade. 4. Rendimento

Nome: SCARTEZINI DE REZENDE, Vinícius Gouveia

Título: Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Energia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Presidente: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Aos pilares de minhas ações e felicidade,
Deus, família e amigos por todo apoio,
suporte e motivação dado nessa etapa de
construção de conhecimento e formação
acadêmica.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela referência de luz e valores nos momentos de ansiedade e dificuldade.

Ao professor Roberto Zilles, pela orientação, incentivo, suporte e apoio constante.

À equipe do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP): professora Fedrizzi, professor Pinho, professor Aurélio, André, Teddy, Givaldo, Lorival, Tadeu, Roberto, Marcelo, Gilberto, Cesar, Maurício, Kaue, Alex, pelo suporte, conselhos e animação.

À Universidade de São Paulo, pelo acolhimento e oportunidade dada em efetuar um mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio econômico que contribuiu para o desenvolvimento da dissertação.

Aos professores e funcionários do IEE, pela dedicação no aprendizado das disciplinas ministradas e outros ensinamentos adquiridos por meio do instituto.

À minha família pelo incentivo, apoio constante e suporte para concretização dessa etapa.

Aos amigos e colegas, dentro e fora do programa de mestrado, pelo companheirismo durante aulas e jornadas de estudo, repletas de risos e sinceridade.

..... COLOCAR AQUI OUTROS AGRADECIMENTOS.....

EPÍGRAFE

"Se a ciência é filha da observação e da experiência, estes são, em verdade, os processos pelos quais principalmente ela deve ser ensinada." (Theodomiro Santiago).

"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê." (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Scartezini de Rezende, Vinícius Gouveia. **Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. 2018.

Com o advento da tecnologia e a necessidade de reduzir dependência energética proveniente dos combustíveis fósseis, evidencia-se, pelas economias mundiais, uma busca pelo uso de fontes energéticas alternativas nas suas várias atividades, com grande foco em produção de eletricidade. Dentre as diferentes fontes conhecidas identifica-se o uso de sistemas fotovoltaicos como um interessante mecanismo para a produção de eletricidade, apresentando um grande crescimento ao redor do mundo, principalmente no caso Brasileiro em que é verificado, nos últimos anos, um aumento do uso desses sistemas de forma conectada à rede e em ambientes urbanos. Certamente a difusão no uso de sistemas fotovoltaicos provém da melhoria das regulamentações, do desenvolvimento tecnológico, da melhoria na competitividade de mercado e da busca por soluções em energia, facilitando a inserção da tecnologia fotovoltaica nos diferentes mercados. Apesar de apresentar uma alta confiabilidade técnica, os sistemas fotovoltaicos ainda apresentam dúvidas relacionadas ao seu desempenho operacional em ambientes com elevado nível de poluição e/ou que apresentam expressiva quantidade de material particulado suspenso. Fazendo com que seja necessário a pesquisa e a busca por informações no âmbito da sujidade, custos e benefícios da frequência de limpeza, bem como índices de consumo de água, possibilitando auxiliar na operacionalidade dos sistemas. O estudo da sujidade em sistemas fotovoltaicos é algo que atualmente não se tem muitas informações detalhadas, a não ser para grandes empreendimentos, como o caso de usinas solares situadas em ambientes propensos. Entretanto no caso de mini e micro geração existe a necessidade do preenchimento da lacuna de conhecimento em relação à problemática da sujidade, possibilitando auxiliar empresas e empreendedores em seus projetos diversos, facilitando a redução de custos nos métodos de limpeza e aumentando a produtividade dos sistemas a partir de um ponto ótimo.

Palavras-chaves: Energia solar, geração fotovoltaica, sujidade, rendimento.

ABSTRACT

Scartezini de Rezende, Vinícius Gouveia. **Productivity losses analysis in photovoltaic generators due to soiling**. Masters dissertation. Graduate Program on Energy. University of São Paulo. 2018.

With the advent of technology and the need to reduce energy dependence from fossil fuels, is evidenced, by world economies, a search for the use of alternative energy sources in its various activities, with huge focus on electricity generation. Among the different known sources is identified the use of photovoltaic systems as an interesting mechanism for electricity production, presenting a great growth around the world, especially in Brazilian case where is verified, in the last years, an increase on the use of these systems in urban environment and connected to the grid. Certainly, the photovoltaics system diffusion comes from the regulations improvement, the technological development, the improvement on market competitiveness and the search on energy solutions, aiding the photovoltaic technology insertion on different markets. Despite having a high technical reliability, photovoltaic systems still present doubts related to their operational performance in environments with a high level of pollution and/or which presents expressive quantity of suspended particulate matter. Making necessary the research and search for information on ambit of soiling, costs and benefits of cleaning frequency, as well as water consumption index, making possible help the systems operability. The soiling study in photovoltaic systems is something that currently does not have much detailed information, except for large enterprises, such as the case of big solar power plants located in prone environments. However, for mini and micro generation there is a need to fill the knowledge gap in relation to the problematic due to soiling, making possible help companies and entrepreneurs on theirs several projects, making easy the cost reduction on cleaning methods and increasing the systems productivity from an optimum point.

Keywords: Solar energy, photovoltaic generation, soiling, yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1 - Mapa mundial de irradiação direta normal e global horizontal num período anual. Fonte: SOLARGIS, 2013.	39
Figura 0.2 - Número de conexões à rede acumulado de dezembro de 2012 até novembro de 2016. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016.	39
Figura 0.3 - Potência total instalada de diversas fontes de energia renovável no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016.	40
Figura 0.4 - Insumos Utilizados na Fabricação do Painel Solar Fotovoltaico. Fonte: Adaptado de PORTALSOLAR, 2017.	41
Figura 0.5 - Sujidade em painéis de plantas solares. Fonte: COBB, 2014.	42
Figura 1.1 - Evolução da tecnologia fotovoltaica e suas eficiências atuais. Fonte: NREL, 2016.	49
Figura 1.2 - Resposta espectral para diferentes tecnologias fotovoltaica, sendo a esquerda respostas relacionadas ao comprimento de onda e na direita atrelada à diferentes densidades de sujeira. Fonte: HICKEL <i>et al</i> , 2016.	51
Figura 1.3 - Relação da frequência com o comprimento de onda eletromagnética. Fonte: Adaptado de BONITO, 2011.	52
Figura 1.4 - Intensidade de Sujeira ao redor do globo. Fonte: MAGHAMI <i>et al</i> , 2016.	53
Figura 1.5 - Potencial de Sujeira ao redor do globo. Fonte: SISSAKIAN <i>et al</i> , 2013.	54
Figura 1.6 - Média de perdas por sujidade em diferentes regiões e ambientes nos Estados Unidos. Fonte: Adaptado de KIMBER <i>et al</i> , 2006.	55
Figura 1.7 - Módulo com presença de microrganismos e locais, indicados por setas, menor concentração de sujidades após coleta de material para análise laboratorial. Fonte: SHIRAKAWA <i>et al</i> , 2012.	57
Figura 1.8 - Usina fotovoltaica presente no IEE - USP. Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.	60
Figura 1.9 - Diagrama unifilar do subsistema CTPV. Fonte: ALMEIDA <i>et al</i> , 2016.	62
Figura 1.10 - Gerador fotovoltaico (esquerda) e eletrocentro (direita) do subsistema CTPV. Fonte: ALMEIDA <i>et al</i> , 2016.	63
Figura 2.1 - Equipamento SOLAR I-Vw utilizado para obtenção de curvas IxV. Fonte: HT <i>Instruments</i> , 2016.	67

Figura 2.2 - Simulador <i>HighLIGHT tester LMT</i> utilizado para obtenção de curvas IxV de módulos sujos e limpos. Fonte: Acervo do Autor, 2016.....	68
Figura 2.3 - Medidor de vazão e materiais do conjunto. Fonte: Acervo do Autor, 2016.	69
Figura 2.4 - Outros materiais necessários para limpeza em módulos. Fonte: Acervo do Autor, 2016.	69
Figura 2.5 - <i>Hotspots</i> ocorrentes em módulos fotovoltaicos. Fonte: MORETÓN <i>et al</i> , 2015.	73
Figura 2.6 - Interface do <i>software</i> SCADA com dados variados. Fonte: Acervo do Autor, 2017.	75
Figura 2.7 - Interface do <i>software</i> SCADA com dados de corrente, tensão e potência para cada mesa CTPV. Fonte: Acervo do Autor, 2017.	76
Figura 2.8 - Esquematização da rotina de limpeza nas mesas fotovoltaicas da central solar. Fonte: Acervo do Autor, 2017.	78
Figura 2.9 - Curva IxV, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade. Fonte: Autor, 2017.	82
Figura 2.10 - Curva de potência, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade. Fonte: Autor, 2017.	83
Figura 2.11 - Comparação de dados de produtividade em dia de céu claro e nublado e potência das mesas, com linhas de tendência. Fonte: Autor, 2017.....	84
Figura 3.1 - Limpezas anteriores ao período de 21 de dezembro de 2016, considerado tempo zero do estudo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.....	85
Figura 3.2 - Consumo de água da primeira limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão. Fonte: Acervo do Autor, 2017.....	87
Figura 3.3 - Módulos da mesa 7 no dia 21 de janeiro de 2017. Fonte: Acervo do Autor, 2017.	87
Figura 3.4 - Comparação entre módulos limpos e sujos com mais de 30 meses de sujidade acumulada. Fonte: Acervo do Autor, 2016.	88
Figura 3.5 - Limpeza de uma mesa com mais de 30 meses de sujidade acumulada e mop impregnado de sujeira, após limpar 3 módulos FV. Fonte: Acervo do Autor, 2016.	88
Figura 3.6 - Curvas de irradiância e potência pra uma dia de céu claro, 26 de dezembro de 2016. Fonte: SCADA, 2016.	89

Figura 3.7 - Curvas de irradiância e potência pra uma dia de céu nublado, 16 de janeiro de 2017. Fonte: SCADA, 2017.....	89
Figura 3.9 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.....	91
Figura 3.10 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.....	91
Figura 3.11 - Consumo de água da segunda limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão. Fonte: Acervo do Autor, 2017.....	93
Figura 3.12 - Módulos da mesa 7 no dia 21 de fevereiro de 2017, sendo a primeira imagem antes de iniciar o procedimento de limpeza e a segunda durante a limpeza em momentos de chuva moderada. Fonte: Acervo do Autor, 2017.....	93
Figura 3.13 - Curvas de irradiância e potência para uma dia de céu claro, 20 de fevereiro de 2017. Fonte: SCADA, 2017.....	94
Figura 3.14 - Curvas de irradiância e potência para uma dia de céu nublado, 02 de fevereiro de 2017. Fonte: SCADA, 2017.	94
Figura 3.15 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.....	96
Figura 3.16 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dados climatológicos representativos da estação do verão para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.....	64
Tabela 1.2 - Dados climatológicos representativos da estação do outono para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.....	64
Tabela 1.3 - Dados climatológicos representativos da estação do inverno para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.....	65
Tabela 1.4 - Dados climatológicos representativos da estação da primavera para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana), incluindo média anual das estações do ano. Fonte: INMET, 2016.....	65
Tabela 1.5 - - Concentração e deposição das espécies químicas analisadas em amostras de águas de chuva na região central de São Paulo*. Fonte: Adaptado de LEAL <i>et al</i> , 2004.	66
Tabela 2.1 - Dados de perdas de potência devido à degradação existente. Fonte: INMET, 2016.....	79
Tabela 2.2 - Dados de potência por fileira e por mesa. Fonte: Autor, 2017.....	80
Tabela 3.1 - Dados climatológicos para o dia 21 de janeiro de 2017 para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana) e Estação IEE. Fonte: INMET, 2017	86
Tabela 3.2 - Dados de consumo de água para a 1ª limpeza da mesa 7. Fonte: AUTOR, 2017.	86
Tabela 3.4 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.....	90
Tabela 3.5 - Dados climatológicos para o dia 21 de fevereiro de 2017 para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana) e Estação IEE. Fonte: INMET, 2017	92
Tabela 3.6 - Dados de consumo de água para a 2ª limpeza da mesa 7. Fonte: AUTOR, 2017.	93
Tabela 3.7 - Dados de produtividade de cada mesa para o 2º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.....	95
Tabela 4.1 - Tarifas de água para a unidade de negócio MO da SABESP. Fonte: SABESP, 2017.....	108
Tabela 4.2 - Dados de custos para consumo de água e mão-de-obra, referentes ao estudo de sujidade. Fonte: Autor, 2017.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CESP	Cia Energética de São Paulo
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
BAPV	<i>Building Applied Photovoltaics</i>
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para o Ensino e Pesquisa
BIPV	<i>Building Integration Photovoltaics</i>
CER	Contratos de Energia de Reserva
CESP	Cia Energética de São Paulo
CIGS	Cobre Índio Gálio Selênio
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
CTPV	Central Fotovoltaica
DPS	Dispositivos de Proteção Contra Surto
EBES	Empresa Brasileira de Energia Solar
EVA	Etileno Acetato de Vinilo
FV	Fotovoltaico (a) (os) (as)
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IMM	<i>Inverted Metamorphic</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia – INMET
LER	Leilão de Energia de Reserva
LSF	Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

MME	Ministério de Minas e Energia
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PID	Degradação do Potencial Induzido
PUREUSP	Programa Permanente para o Uso Eficiente de Energia na USP
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampere
λ	comprimento de onda
I	corrente
c.a.	corrente alternada
c.c.	corrente contínua
Isc	corrente de curto circuito
US\$	dólar americano
ν	frequência
g/m ²	grama por metro quadrado
°C	grau Celsius
°	graus
Hz	hertz
h	hora
L	litro
\geq	maior e igual a
MWp	mega watt pico
m	metro
$\mu\text{mol.L}^{-1}$	micro mol por litro
mg.m ⁻² .mês ⁻¹	miligrama por metro quadrado por mês
mm	milímetro
nm	nanômetro

%	percentual
pH	potencial hidrogeniônico
Kg	quilograma
km	quilometro
kW	quilowatt
kWh	quilowatt hora
kWp	quilowatt pico
kWh/kWp	quilowatt hora por quilowatt pico
R\$	reais
Si	silício
V	tensão
Voc	tensão de circuito aberto
CdTe	tolureto de cádmio
Wp	watt pico
W/m ²	watt por metro quadrado

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	37
Caracterização do Problema	40
Objetivos	43
Metodologia Utilizada	44
1 CAPÍTULO 1 – IMPACTO DA SUJIDADE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	47
1.1 Sujidade e suas consequências.....	47
1.2 Metodologias de análise de sujidade	57
1.3 Caracterização da região e local do estudo	60
2 CAPÍTULO 2 – EQUIPAMENTOS, ANÁLISE DE DADOS, MONITORMAENTO E LIMPEZA.....	67
2.1 Equipamentos utilizados	67
2.2 Análise de dados	74
2.3 Monitoramento dos sistemas	74
2.4 Atividade de limpeza.....	77
3 CAPÍTULO 3 – DADOS ADQUIRIDOS E RESULTADOS	85
3.1 Dados referentes ao 1º mês de estudo na Central Solar do IEE	85
3.2 Dados referentes ao 2º mês de estudo na Central Solar do IEE	92
3.3 Dados referentes ao 3º mês de estudo na Central Solar do IEE	97
3.4 Dados referentes ao 4º mês de estudo na Central Solar do IEE	97
3.5 Dados referentes ao 5º mês de estudo na Central Solar do IEE	97
3.6 Dados referentes ao 6º mês de estudo na Central Solar do IEE	97

3.7	Dados referentes ao 7º mês de estudo na Central Solar do IEE	97
3.8	Dados referentes ao 8º mês de estudo na Central Solar do IEE	97
3.9	Dados referentes ao 9º mês de estudo na Central Solar do IEE	98
3.10	Dados referentes ao 10º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	98
3.11	Dados referentes ao 11º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	98
3.12	Dados referentes ao 12º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	98
3.13	Dados referentes ao 13º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	98
3.14	Dados referentes ao 14º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	98
3.15	Dados referentes ao 15º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	98
3.16	Dados referentes ao 16º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	99
3.17	Dados referentes ao 17º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	99
3.18	Dados referentes ao 18º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	99
4	CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE LIMPEZA EFICIENTE E CUSTOS ASSOCIADOS	100
4.1	Metodologia eficiente de limpeza	100
4.2	Custos associados ao estudo de sujidade	104
5	CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	111
5.1	Conclusões	111
5.2	Recomendações.....	111
6	BIBLIOGRAFIA.....	112
7	ANEXOS.....	118

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, diversos fatores contribuíram para inserção e difusão da geração fotovoltaica conectada à rede no Brasil, como, por exemplo, melhoria da tecnologia em termos de eficiência e versatilidade, redução dos custos de geradores fotovoltaicos no mercado internacional, melhoria do marco regulatório do setor apoiado por empreendedores e instituições acadêmicas, mobilização governamental para a elaboração de resoluções normativas, por meio da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, como a Resolução Normativa n° 482/2012⁸, Resolução Normativa n° 687/2015⁹ e as Chamadas de Projeto de P&D Estratégicos, entre outros fatores favoráveis para o crescimento contínuo do mercado fotovoltaico, como os leilões de energia de reserva (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015).

Em 2014 foi publicado a portaria do Ministério de Minas e Energia – MME n° 236, promovendo o Leilão de Energia de Reserva – LER do mesmo ano, em que se previa negociações de Contratos de Energia de Reserva – CER durante 20 a partir de outubro de 2017, seguindo a modalidade quantidade de energia, com diferenciações por tipo de fonte geradora, onde participaram diferentes projetos. Dentre os diferentes projetos cadastrados e habilitados que representaram 10.790 MW, foram contratados somente 202,1 MW_{med} (EPE, 2014).

O primeiro LER de 2015, oficializado pela portaria MME n° 69, teve projetos cadastrados e habilitados que representando 11.261 MW de potência instalada, sendo contratados 232,9 MW_{med}. Já o segundo LER de 2015, oficializado pela portaria MME n° 70, teve projetos cadastrados e habilitados que representando 20.953 MWp de potência instalada, sendo contratados 245,3 MW_{med} (EPE, 2015).

No ano de 2016 não foi verificado a participação de energia fotovoltaica em leilões de reserva, visto que o primeiro leilão do ano teve foco em hidroeletricidade e o segundo acabou sendo cancelado por intermédio da portaria MME n° 705.

⁸ Estabelece diretrizes para o acesso de micro e mini geração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, sistema de compensação da energia distribuída e informa outras condições interessantes para o público de interesse.

⁹ Publicada de forma a revisar a Resolução Normativa n° 482/2012, promovendo melhorias e esclarecimentos sobre o acesso de micro e mini geração distribuída, bem como novas diretrizes sobre as condições de adesão e crédito de energia.

Diversos estudos apontam que um desenvolvimento econômico e sustentável do mercado brasileiro, pode ser apoiado pelo uso de fontes de energia renovável. Certamente toda uma infraestrutura de apoio social e empresarial se faz necessário nos locais de inserção das tecnologias. No caso Brasileiro, a implementação de geração fotovoltaica distribuída se torna bastante atraente ao se verificar uma quantidade favorável de irradiação global anual em praticamente todo território, conforme evidenciado na Figura 0.1, a qual mostra o mapa mundial de irradiação normal direta e irradiação global horizontal num período anual, segundo dados obtidos do *software* SOLARGIS (SOLARGIS, 2016).

Outro fato interessante é de que presenciamos um aumento da potência instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil de forma crescente, conforme verificado na Figura 0.2, a qual mostra o número de conexões acumulado desde dezembro do ano de 2012 até novembro de 2016, segundo os dados da ANEEL, somando cerca de 6670 novas conexões no sistema elétrico brasileiro, totalizando uma potência de 47.266 kW, conforme apresentado pela Figura 0.3.

Apesar da confiabilidade técnica existente, os sistemas fotovoltaicos ainda apresentam dúvidas relacionadas ao seu desempenho operacional em ambientes com elevado nível de poluição e/ou que apresentam expressiva quantidade de material particulado suspenso. Fazendo com que seja necessário a pesquisa e a busca por informações, que auxiliem na operacionalidade dos sistemas, no âmbito da sujidade, custos e benefícios da frequência de limpeza, bem como índices de consumo de água (RYAN; VIGNOLA; McDANIELS, 1989; FARKAS; FRONTINI; MATURI, 2012).

Estudo da sujidade em sistemas fotovoltaicos é algo que atualmente não se tem muitas informações detalhadas e o preenchimento da lacuna de conhecimento em relação ao problema tem grande peso de contribuição, ao passo que possibilita auxiliar empresas e empreendedores em seus projetos de implementação, pesquisa e desenvolvimento. Facilitando a redução de custos nas metodologias de limpeza e aumentando a produtividade dos sistemas a partir de um ponto ótimo para cada caso específico (COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2016).

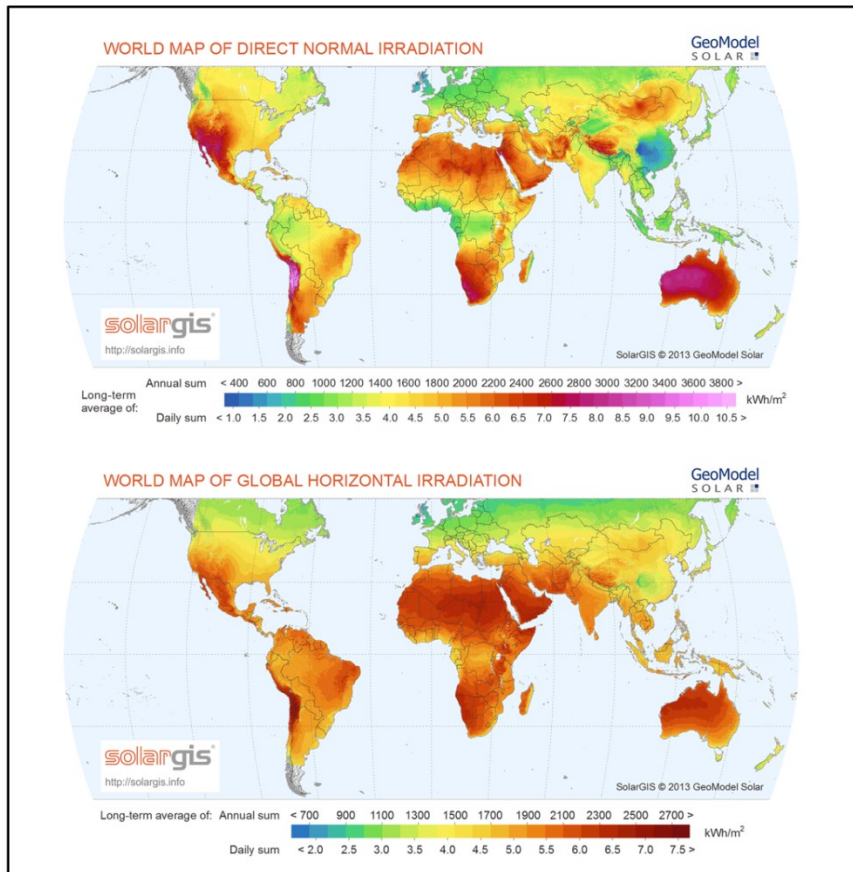


Figura 0.1 - Mapa mundial de irradiação direta normal e global horizontal num período anual. Fonte: SOLARGIS, 2013¹⁰.

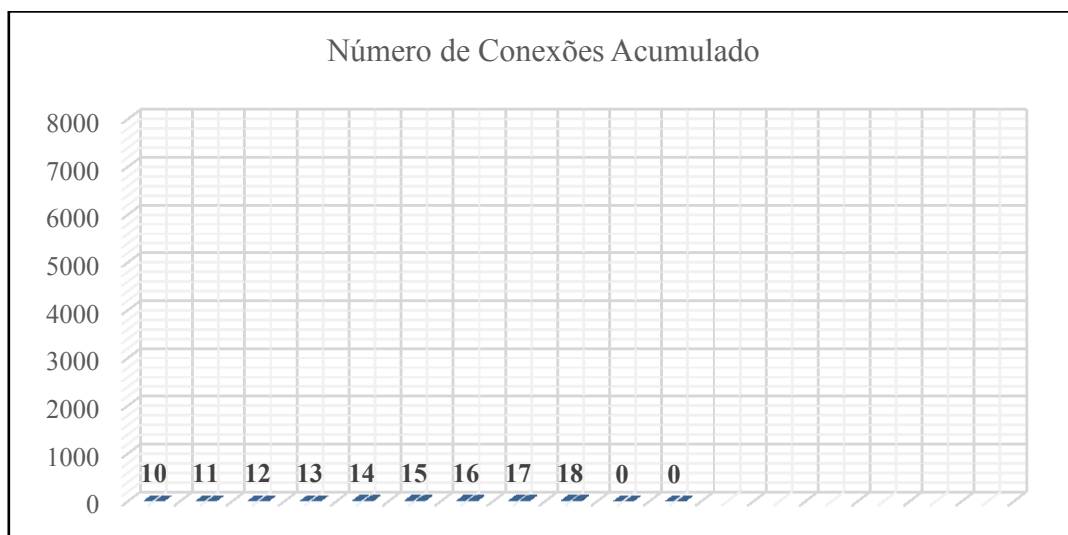


Figura 0.2 - Número de conexões à rede acumulado de dezembro de 2012 até novembro de 2016. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016¹¹.

¹⁰ Disponível em: <<http://geosun.co.za/solar-maps/>>. Acesso em agosto de 2016.

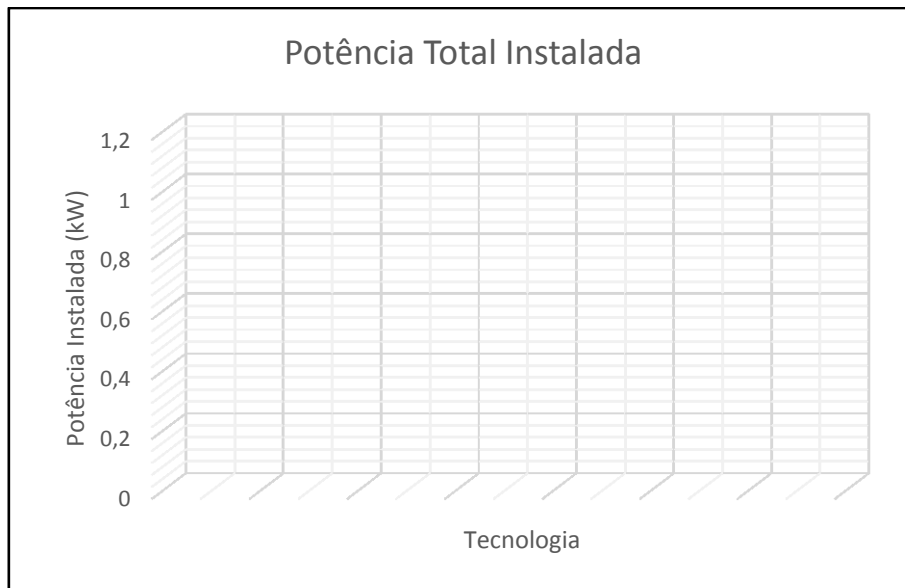


Figura 0.3 - Potência total instalada de diversas fontes de energia renovável no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016¹².

Caracterização do Problema

Os módulos fotovoltaicos são confeccionados de uma forma que possam resistir às diferentes condições ambientais, sendo possível a existência de um certo nível de proteção contra a ação de esforços mecânicos, dos agentes atmosféricos e da umidade. A Figura 0.4 mostra os materiais normalmente utilizados na fabricação de módulos, onde as células são revestidas de uma película de etileno acetato de vinilo (EVA), o que proporciona uma certa flexibilidade, translucidez, diminuição da reflexão da radiação solar e de certa forma assegura o isolamento elétrico entre as células (MANI e PILLAI, 2010).

¹¹ Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

¹² Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

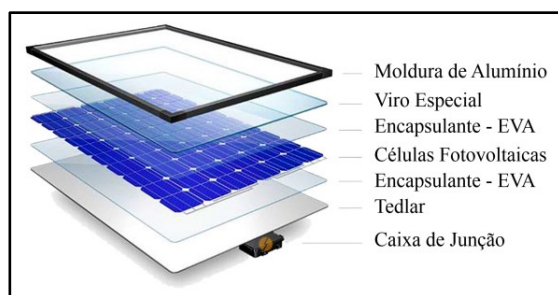


Figura 0.4 - Insumos Utilizados na Fabricação do Painel Solar Fotovoltaico. Fonte: Adaptado de PORTALSOLAR, 2017¹³.

Existem dificuldades relacionadas a permeabilidade de luz na célula fotovoltaica, em situações de sombreamento e sujeidade, facilitando a perda de produtividade dos módulos fotovoltaicos. Situações no âmbito de sombreamento temporário resultam de acúmulo de folhas, sujeira também proveniente de dejetos de pássaros, poeiras de zonas urbanizadas, areia e até mesmo acúmulo de gelo e entre outras situações (HAMMOND; SRINIVASAN; HARRIS; WHITFIELD; WOHLGEMUTH, 1997; COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2016).

A remoção de materiais impregnados e dispostos na superfície dos módulos pode ocorrer de diferentes formas, seja da mais simples com ação de vento e chuva em situações de baixa impregnação e com um certo grau de inclinação dos módulos, ou até mesmo por lavagem com água e raspagem de materiais altamente impregnados, logicamente evitando-se ao máximo danificar a superfície do módulo.

Segundo o gerente de produtos da empresa SunPower, Kyle Cobb, agentes impregnados podem gerar a perda de produtividade de energia, variando entre 2% a 15% ou mais em outros casos mais severos, conferindo ainda mais a importância de uma rotina de limpeza eficiente, bem como a necessidade de implementação de uma metodologia de avaliação de impactos de sujeidade na produção de energia. A Figura 0.5, ilustra a problemática da sujeidade¹⁴ em sistemas de geração fotovoltaica, situação que retrata a importância do estudo sobre os efeitos da sujeidade na produtividade de sistemas fotovoltaicos.

¹³ Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 04 de abril de 2017.

¹⁴ Efeito relacionado à perda de geração de energia em módulos fotovoltaicos devido ao acúmulo de diversos elementos, como, por exemplo, compostos químicos variados e presentes em água da chuva e no ar, pó, areia, argila, sal, neve, fungos, fezes de pássaros, materiais orgânicos como seiva, folhas e galhos de árvores e entre outros materiais particulados diversos existentes no meio ambiente.

Ambientes urbanos com elevado índice de poluição, atividade industrial e tráfego de veículos, representam um grande potencial para estudos de sujidade e aplicação de diferentes metodologias do tema. No caso brasileiro, os grandes centros urbanos representam localidades potenciais e os estudos nessas regiões podem ser utilizados como referências para outras localidades do globo, uma vez que apresentem características semelhantes. Desse modo as pesquisas brasileiras podem contribuir positivamente no setor fotovoltaico internacional.

Ainda existe uma carência de conhecimento no âmbito da sujidade em diferentes localidades do globo. Os poucos estudos sistemáticos existentes na literatura são em maior parte dedicados para usinas de grande porte em ambientes com alta concentração de poeira e areia. Se há difundido a mensagem de que não vale o esforço, material e econômico, para a limpeza dos módulos fotovoltaicos, em particular para sistemas de microgeração. Entretanto não se encontra uma sustentação metodológica e experimental para essa mensagem e, dependendo das condições, nível de ocupação, poluição, índice pluviométrico e inclinação do gerador fotovoltaico, as perdas de produtividade podem justificar a implantação de uma rotina de limpeza.



Figura 0.5 - Sujidade em painéis de plantas solares. Fonte: COBB, 2014.

A ausência de estudos sistemáticos dos efeitos da sujidade, em particular no ambiente urbano com alta densidade de veículos e poluição, contempla aspectos que irão oferecer incremento de conhecimento para o setor, empreendedores e empresas,

auxiliando em projetos e *softwares* da área fotovoltaica, possibilitando avaliar também ganhos e custos associados com implementação de rotinas de limpeza de diversos sistemas fotovoltaicos.

Em relação a descrição do problema surge diretamente as seguintes perguntas:

6. Como o efeito da sujeidade afeta a produtividade? Quais são os valores e comportamentos esperados?
7. Quais os principais pontos levantados na elaboração de uma escala de limpeza?
8. Quais as alternativas para minimizar os impactos? Quais são os impactos técnicos e econômicos dessas alternativas?
9. Qual o ponto ótimo no parâmetro tempo de limpeza versus produtividade?
10. Que experiências de empresas conhecidas podem auxiliar no estudo e preenchimento da lacuna de conhecimento?

Respostas para as perguntas anteriores serão interessantes na busca de conhecimento relacionado a diversos públicos, e poderão agregar valor ao estudo em questão.

Objetivos

O principal objetivo desse projeto de pesquisa consiste em quantificar as perdas de produtividade de energia de sistemas fotovoltaicos devido a sujeidade acumulada nos módulos, em regiões urbanas e altamente propensas ao efeito. Não obstante, de forma secundária, tem-se os objetivos de levantar dados de consumo de água e custos associados com as atividades de limpeza.

Os objetivos específicos específicos dessa pesquisa de mestrado são:

9. Utilizar um sistema de micro geração solar fotovoltaica, distribuído em subsistemas;
10. Analisar o acúmulo da sujeidade em uma dada inclinação ao longo do tempo;
11. Coletar os dados de produtividade, kWh/kWp, relacionado o impacto da sujeidade ao longo do tempo de estudo nos subsistemas;

12. Desenvolver uma metodologia de limpeza eficiente para os geradores fotovoltaicos;
13. Levantar e analisar dados de custos relacionados a limpeza, como, por exemplo, índice de consumo de água e mão de obra.
14. Desenvolver um material de orientação para escalas de limpeza dos sistemas fotovoltaicos.
15. Desenvolver escalas de rotina de manutenção preventiva;
16. Definir os critérios necessários para que seja necessária uma escala de limpeza, bem como os procedimentos de limpeza;

Metodologia Utilizada

Para a obtenção dos objetivos traçados faz-se necessário determinar um passo a passo metodológico, de forma a facilitar o andamento e compreensão do estudo proposto. Nesse sentido, foram estabelecidas 7 atividades:

8. Executar uma revisão de literatura vinculada aos impactos da sujidade em sistema fotovoltaicos, visando buscar informações sobre o assunto da pesquisa em questão e metodologias já existentes;
9. Definir e caracterizar o local em que o sistema de geração será utilizado e analisado, sendo necessária a escolha de um local com alto nível de material particulado suspenso, o que pode ser próximo a grandes vias de tráfego automotivo na cidade de São Paulo;
10. Definir e caracterizar os equipamentos utilizados, bem como o tempo de análise de dados e de escala de limpeza para cada subsistema, tendo em vista a duração do programa de mestrado;
11. Analisar os impactos da sujidade em relação à produtividade ao longo do tempo, levantando dados em kWh/kWp dos sistemas;
12. Desenvolver uma metodologia eficiente para diferentes escalas de limpeza, bem como os equipamentos utilizados, registrando dados de consumo de água e tempo de trabalho da limpeza;
13. Efetuar uma análise de custos para a rotina de limpeza, tendo em conta o consumo de água, mão de obra e tempo de limpeza;

14. Elaborar um material informativo para orientação de implementação escalas de limpeza em geradores fotovoltaicos.

O local do experimento será o subsistema CTPV da usina fotovoltaica do Instituto de Energia e Ambiente – IEE, presente na Universidade de São Paulo – USP. O subsistema possui 10 mesas fotovoltaicas, compostas por 60 módulos fotovoltaicos de dimensões 0,99 m x 1,65 m, organizados em 3 fileiras de 20 módulos com uma *string-box* em cada fileira. Os módulos serão limpos somente com água comum de torneira e utilizando alguns instrumentos, como, cabos de extensão telescópica, fibras abrasivas de limpeza leve em vidros, mops para limpeza em vidros e adaptadores para agrupar os cabos, fibras e mops,

Para descrição e apresentação do desenvolvimento da pesquisa e respectivos resultados é proposta a seguinte estrutura capitular:

9. Introdução:

- i. Apresentando o problema: efeitos da sujidade na produtividade de sistemas fotovoltaicos;
- ii. Objetivos e metodologia.

10. Capítulo 1:

- i. Breve revisão bibliográfica dos impactos da sujidade nos sistemas e metodologias de análise;
- ii. Caracterização da região e local em que o estudo será efetuado.

11. Capítulo 2:

- i. Detalhar os equipamentos a serem utilizados, período e forma de análise de dados, bem como explicação dos serviços de instalação e monitoramento dos sistemas e atividade de limpeza;

12. Capítulo 3:

- i. Detalhar e expor os dados que foram adquiridos no estudo, utilizando tabelas e gráficos;
- ii. Evidenciar os resultados do estudo.

13. Capítulo 4:

- i. Detalhar a metodologia eficiente para as escalas de limpeza;
- ii. Detalhar a análise de custos relacionados ao projeto;
- iii. Elaboração de material didático para orientação de escalas de limpeza.

14. Capítulo 5:

- i. Conclusões do estudo;
- ii. Recomendações do estudo.

15. Referências Bibliográficas

16. Apêndices.

2 CAPÍTULO 1 – IMPACTO DA SUJIDADE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Este capítulo visa apresentar de forma clara e objetiva a problemática da sujidade na geração de energia em sistemas fotovoltaicos, expondo uma breve revisão bibliográfica do assunto e algumas metodologias de análise para obtenção de informações vinculadas ao problema. Não obstante este capítulo informa a caracterização da região e local em que o estudo ocorreu, bem como os sistemas fotovoltaicos utilizados.

2.1 Sujidade e suas consequências

Ao se abordar o tema sujidade, devemos levar em conta que o mesmo engloba uma variedade de elementos que juntos promovem uma perda de geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Os elementos encontrados em superfícies de módulos fotovoltaicos comumente são partículas de solo, cimento, cinzas, carbono, limonita, sílica, carbonato de cálcio, areia, argila, solo, fungos, fezes de pássaros, lama e materiais grosseiros. Não obstante outros elementos mais raros também podem ser encontrados, como metais pesados, neve em regiões propensas e seiva de árvore (DARWISH; KAZEM; SOPIAN; AL-GOUL; ALAWADHI, 2015).

Certamente o acúmulo de componentes diversos, presentes no meio ambiente, na superfície dos módulos fotovoltaicos, resulta em um aumento da sujidade e consequentemente em uma ampliação da perda de produtividade dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que existe um impacto na absorção de irradiância solar causado por um efeito de sombreamento nos semicondutores utilizados. Algumas tecnologias podem sofrer um efeito maior de perda de produtividade em relação a intensidade de sujidade existente, dependendo da resposta espectral do material utilizado para a confecção do módulo fotovoltaico.

A Figura 1.1 expõe um gráfico da eficiência das células fotovoltaicas, o qual é atualizado de tempos em tempos pelo *National Renewable Energy Laboratory* – NREL, dos Estados Unidos, identificando as diferentes tecnologias existentes até o ano de

2016, numa escala de tempo, bem como as eficiências atuais de cada tecnologia, em condições de teste padrão, e as empresas/laboratórios que desenvolveram as células.

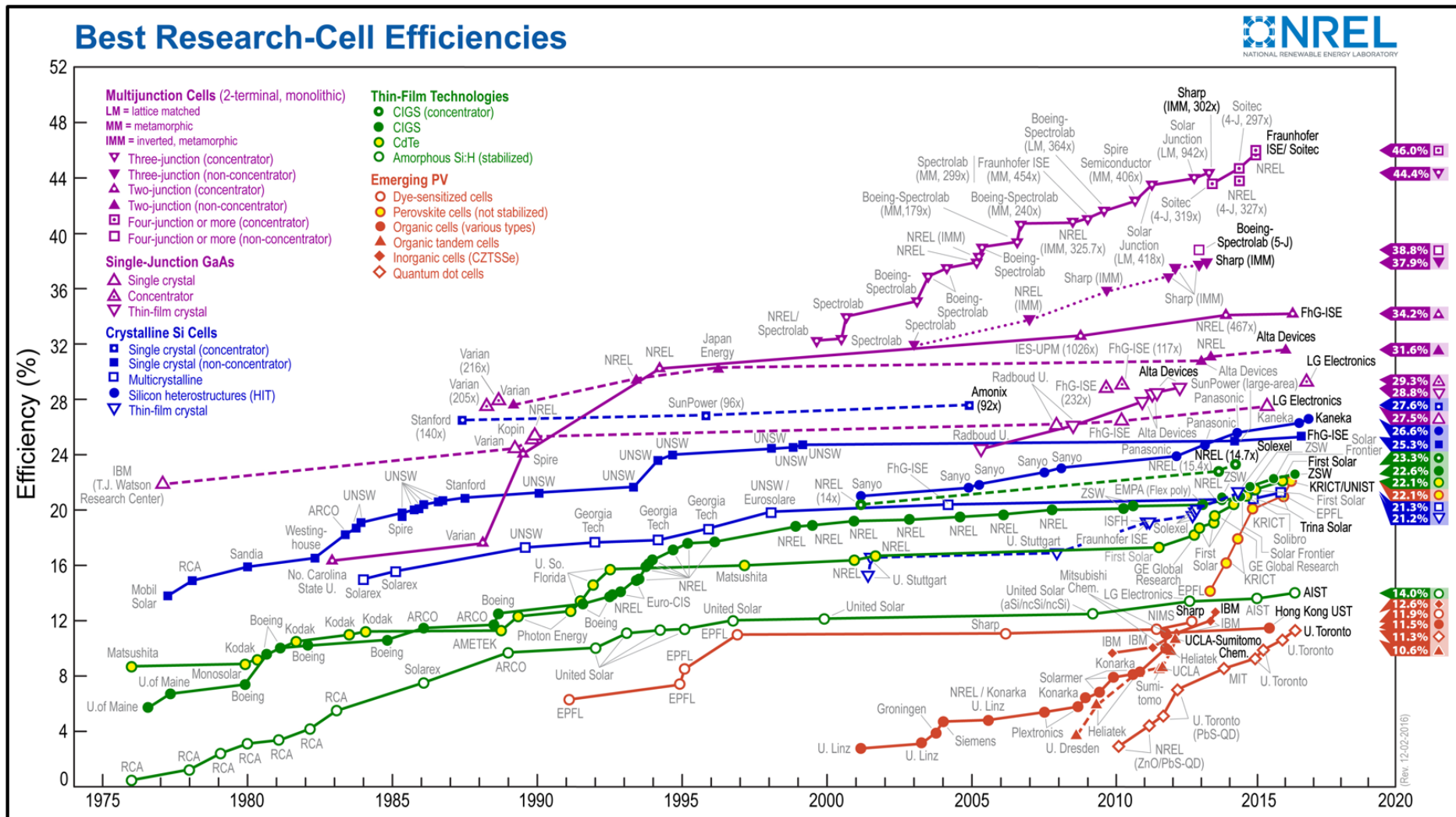


Figura 2.1 - Evolução da tecnologia fotovoltaica e suas eficiências atuais. Fonte: NREL, 2016.

Segundo o NREL, ocorreu em dezembro de 2014 a demonstração de uma eficiência de conversão, em condições padrão, de 45,7% da tecnologia de multi-junções *Inverted Metamorphic* – IMM, composta por 4 junções de diferentes materiais que está sendo aprimorada e desenvolvida nos Estados Unidos (NREL, 2014).

Certamente células de alta eficiência ainda não são empregadas em larga escala nos ambientes que visam geração distribuída, uma vez que seus usos possuem um foco maior na área espacial e seus custos podem ser impeditivos. Outras tecnologias, com menores eficiências, das gerações de filmes finos e silício cristalino acabam sendo mais atrativas para os ambientes urbanos, por serem tecnologias mais consolidadas no mercado, com compreensão mais difundida e economicamente mais viável (KING; LAW; EDMONDSON, 2006).

Em condições de campo, outras variáveis que reduzem a produtividade das células solares devem ser levadas em consideração, como, por, exemplo, variações de irradiância, sombreamento, sujeira, orientação irregular dos módulos, entre outras. Segundo Sharma *et al*, 2015, módulos de silício monocristalino apresentam eficiências em campo da ordem de 14% a 17%, para policristalino de 12% a 14%. Já na categoria dos filmes finos, os módulos de Tólueto de Cádmio – CdTe apresentam eficiências da ordem de 9% a 11%, 10% a 12% para Cobre-Índio-Gálio-Selênio – CIGS e 4% a 8% para silício amorfo. Tecnologias de multijunção chegam a ter eficiências da ordem de 20% ou um pouco mais (SHARMA; JAIN; SHARMA, 2015).

Apesar do exposto por Sharma *et al* em 2015, já é possível, em 2017, encontrar as mesmas tecnologias apresentando eficiências superiores em condições de campo.

No âmbito de sujeidade e escolha da tecnologia a ser utilizada, deve-se também ter em mente as diferentes respostas espectrais das tecnologias fotovoltaicas. A Figura 1.2, retirada de um estudo sobre influência de sujeira sobre diferentes tecnologias fotovoltaicas, mostra a resposta espectral para diferentes tecnologias fotovoltaicas, onde no primeiro gráfico é possível verificar a transmitância espectral para diferentes comprimentos de onda, e no segundo verificar a transmitância espectral para diferentes densidades de poeira acumulada. Possibilitando concluir que existe uma atenuação maior para comprimentos de onda considerados menores ou mais voltados para a faixa do azul, informando então que para tecnologias elaboradas com, por exemplo, silício amorfo apresentará um impacto maior na produtividade devido à sujeidade, quando

comparado com outras tecnologias como CIGS ou CdTe. (HICKEL; DESCHAMPS; NASCIMENTO; SIMÕES; RUTHER, 2016).

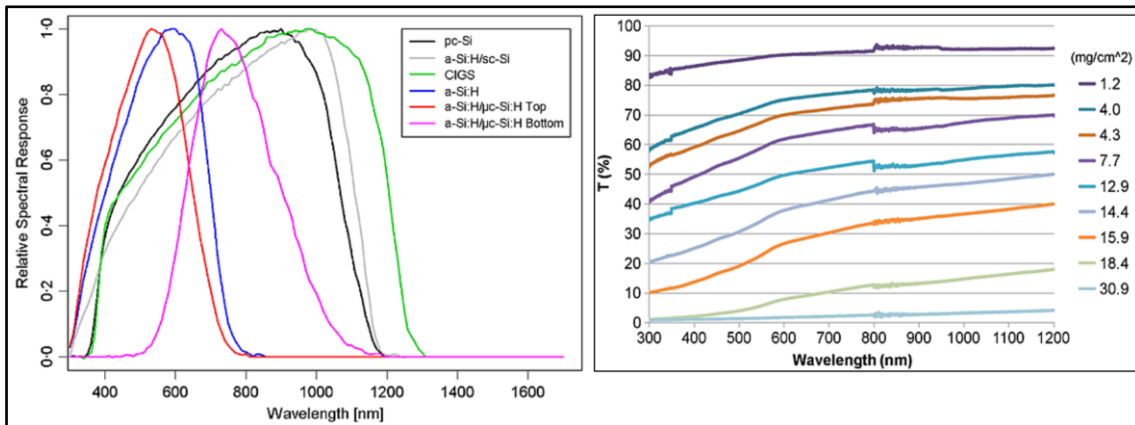


Figura 2.2 - Resposta espectral para diferentes tecnologias fotovoltaica, sendo a esquerda respostas relacionadas ao comprimento de onda e na direita atrelada à diferentes densidades de sujeira. Fonte: HICKEL *et al*, 2016.

Vale ressaltar que a radiação emitida pelo Sol sofre alteração em intensidade e polarização ao penetrar na atmosfera terrestre, devido aos processos de espalhamento ocorridos por meio de diferentes moléculas de gases, gotas de água, poeira, partículas de aerossóis, absorção por gases presentes na atmosfera e por último, por meio de sucessivos processos de absorção e reflexão no solo ou em superfícies líquidas (HAAG e KRENZINGER, 2007).

A tecnologia fotovoltaica não utiliza somente a parcela de irradiação direta, como também abrange o percentual de irradiação difusa incidente, que pode ser entendido como resultado da interação da radiação solar com o espalhamento produzido por partículas diversas, como, por exemplo, moléculas e aerossóis presentes na atmosfera terrestre (GUEYMARD, 1995).

Apesar da existência de mecanismos de espalhamento e absorção da radiação solar, uma considerável parcela da energia é transmitida de forma direta e consegue atingir o solo em feixes aproximadamente paralelos, constituindo então a principal parcela da irradiância solar para comprimentos de onda maiores que 400 nm (espectro da luz visível, conforme ilustrado na Figura 1.3), o que se faz bastante importante em um dia de céu limpo, com ausência de nuvens (HAAG e KRENZINGER, 2007).

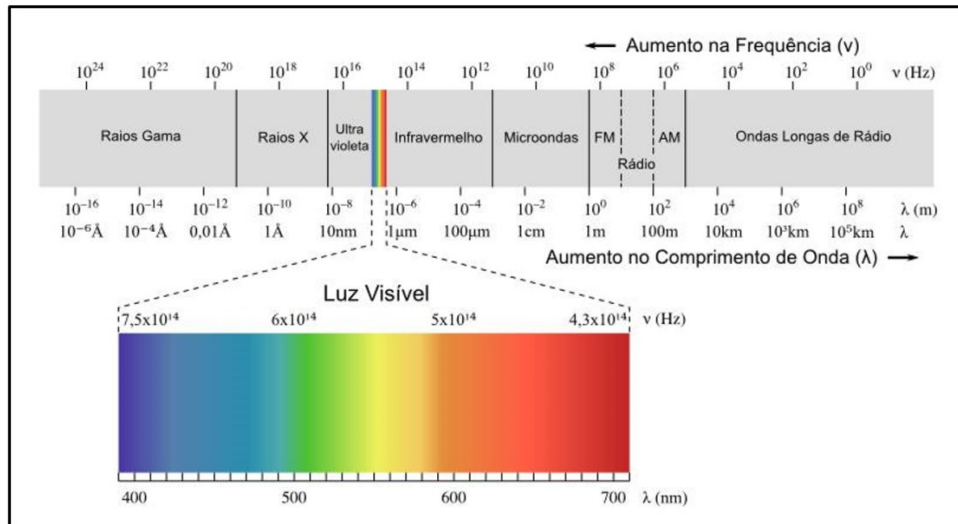


Figura 2.3 - Relação da frequência com o comprimento de onda eletromagnética. Fonte: Adaptado de BONITO, 2011.

Quanto maior for a parcela irradiante de energia solar incidindo no material semiconductor, em presença de um campo elétrico, maior será a geração energia elétrica no sistema. Entretanto o acúmulo de sujeira na superfície dos módulos fotovoltaicos promove um efeito de barreira para a passagem dos fótons, afetando a produtividade dos sistemas ao longo do tempo. Em 2006, após sete meses de estudo, Elminir *et al*, chegou à conclusão de que a redução de transmitância está fortemente ligada e dependente da inclinação em que os módulos se encontram, bem como da densidade de sujeira existente na superfície dos mesmos e a orientação em relação aos regimes de ventos na localidade de instalação (ELMINIR; GHITAS; HAMID; EI-HUSSAINY; BEHEARY; ABDEL-MONEIM, 2006).

A sujeira acumulada na superfície dos módulos fotovoltaicos tende a ser mais uniforme em superfícies lisas. Entretanto superfícies rugosas exibem grande variação na distribuição das partículas de sujeira, podendo apresentar pontos com menor transmitância do que outros num mesmo módulo (SAMPLE; GARCIA; POZZA, 2016). Um tamanho típico para o diâmetro de uma partícula de sujeira seria algo menor que 10 μm , mas existem variações em tamanho dependendo da localidade e do ambiente ao entorno (MAGHAMI; HIZAM; GOMES; RADZI; REZADAD; HAJIGHORBANI, 2016).

A Figura 1.4, retirada da revisão de MAGHAMI *et al*, 2016, ilustra a intensidade de sujidade ao redor do globo, em que foi possível categorizar o mapa em 4 zonas distintas. Sendo assim, zonas mais escuras tendem a apresentar um maior grau de sujidade, possivelmente devido a ocorrência de ventos, erupções vulcânicas, movimentos de veículos, processos industriais, construção civil, processos de desertificação, diferenças de altitude, longitude e latitude, umidade, poluição atmosférica e entre outros.

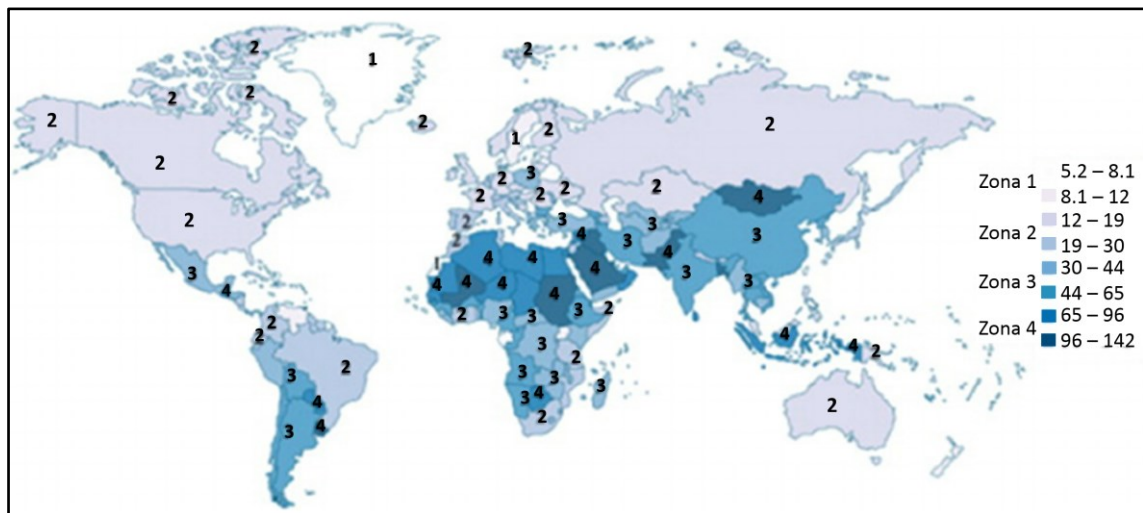


Figura 2.4 - Intensidade de Sujira ao redor do globo. Fonte: MAGHAMI *et al*, 2016.

Zonas de número 4 são os piores casos encontrados, como verificado no Oriente Médio e norte da África. Outros países não apresentam problemas tão graves e podem ser categorizados em zonas de menor impacto, como o caso do Brasil, em zona 2, apesar de existirem locais brasileiros em que a intensidade de sujeira é bem elevada, podendo ser estes, categorizados como zona 4.

A Figura 1.5, retirada de um estudo sobre tempestades de areia no Iraque, ilustra um mapa fazendo referência ao potencial de sujidade ao redor do mundo, elaborado por meio de um *software* que utiliza dados geográficos e outras informações relevantes em sua confecção de mapas. Na imagem é possível verificar que algumas localidades brasileiras, como, por exemplo, as situadas no nordeste, se assemelham às regiões do norte da África e Oriente médio. Necessitando assim, de uma maior atenção para com o efeito da sujidade em sistemas e empreendimentos solares nos locais de maior potencial

de sujeira, forçando a implementação de ciclos eficientes de limpeza e manutenção em respostas as condições ambientais variáveis.

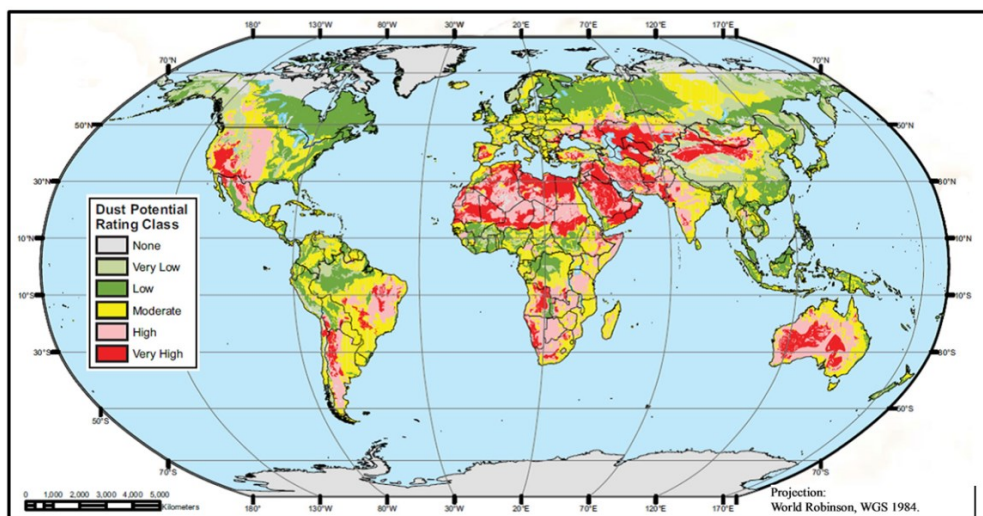


Figura 2.5 - Potencial de Sujeira ao redor do globo. Fonte: SISSAKIAN *et al*, 2013.

Existem diversos estudos vinculados ao desempenho da tecnologia fotovoltaica em diferentes regiões e ângulos de inclinação dos módulos fotovoltaicos, os quais apontam variações de perda de eficiência por sujeira entre 1% e 25%. Em um estudo ocorrido em 2001 na Califórnia, Estados Unidos, foi verificada uma perda de eficiência média diária de 0,2% em dias sem presença de chuvas e em ambientes secos, ocasionando perdas anuais variando de 1,5% a 6,2% dependendo da região do estado (MAGHAMI; HIZAM; GOMES; RADZI; REZADAD; HAJIGHORBANI, 2016).

Outro estudo em Los Angeles, Estados Unidos, efetuado em 2006 estudou perdas de geração por sujeira em três sistemas idênticos localizados em escritórios comerciais, encontrando uma perda de geração anual média de aproximadamente 5%. Vale ressaltar que existiam escalas de limpeza e manutenção, na qual um dos sistemas analisados era limpo duas vezes no período de tempo seco, outro somente uma única vez e o terceiro não foi limpo em nenhum momento. O estudo informou que limpezas somente são justificáveis ao se terem custos inferiores a US\$ 0,25/kWh (KIMBER, 2006).

A Figura 1.6 foi extraída de um segundo estudo de Kimber, juntamente com os Autores Mitchell, Nogradi e Wenger, no ano de 2006, em que o gráfico ilustra a perda

anual média de produtividade em energia devido a sujidade em regiões caracterizadas como rural, suburbana e urbana, sendo a terceira região uma área englobando também vias expressas e aeroportos. Como resultado, as áreas consideradas urbanas sofrem maiores problemas em decorrência da sujidade do que as demais áreas, chegando a ter perdas de produtividade anual média de 6%.



Figura 2.6 - Média de perdas por sujidade em diferentes regiões e ambientes nos Estados Unidos. Fonte: Adaptado de KIMBER *et al*, 2006.

Há relatos de duas pesquisas ocorridas na década de 90, também analisando perdas por sujidade, mas com foco em diferentes compostos e atingindo resultados semelhantes variando entre 8% e 10%. Ambas as pesquisas informaram que, depois de certo tempo de acúmulo de elementos na superfície de módulos, não é possível diminuir a perda sem que seja efetuada uma limpeza eficiente, uma vez que a própria chuva em estações favoráveis do ano, não tem capacidade de retirar o acúmulo de sujidade. Um dos estudos ocorreu em 1997 pelos Autores Hammond, Srinivasan, Harris, Whitfield e Wohlgemuth, o qual analisou dejetos de pássaros como um fator sério na perda de geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos. A outra pesquisa, realizada em 1998 por Haberlin e Graf, levantou a questão de um ambiente com alta concentração de

pó de ferro no ar, proveniente de ferrovias com menos de 50 metros de distância, em que foi possível observar, após um ano, o crescimento de pequenas plantas e acúmulo de pólen juntamente com o material ferroso (MILLER e JACKSON, 2009).

Outro estudo efetuado na região do Iraque constatou perda de oridutividade de 15% em detrimento às tempestades de areia frequentes. Estas também ocorrentes em países do norte da África e oriente médio (SISSAKIAN; AL-ANSARI; KNUTSSON, 2013). A sujidade fotovoltaica pode causar perdas significativas, chegando até 28%, na corrente de curto-circuito de um módulo, e 6% na tensão de circuito aberto, para valores relacionados à 22 g/m² de deposição de poeira (JIANG; LU; SUN, 2011). Em um estudo relacionado a poeira acumulada, foi constatado queda de 1,5% em produtividade para uma concentração de 4 g/m² de poeira, realçando a importância de impedir ou minimizar ao máximo econômico viável a ocorrência de sujidade (KALDELLIS; FRAGOS, 2011).

Um estudo experimental relatou uma queda de potência em 13%, após 18 dias de exposição em terreno arenoso¹⁵ situado em Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos (AL-HANAI; HASHIM; EL-CHAAR; LAMONT, 2011). Outro fato encontrado na literatura, foi sobre um estudo em duas usinas fotovoltaicas de 1 MW cada, uma construída em terreno arenoso e outra em solo compactado, encontrando perdas na produção de energia de 1,1% ao ano para a usina em solo compactado e de 6,9% para solo arenoso (MASSI; MELLIT; PIERI, 2001).

Regiões úmidas podem ter influência de microrganismos em biofilmes¹⁶ na perda de potencia, conforme verificado num estudo brasileiro de Shirakawa *et al*, realizado em 2012. A ocorrência de fungos filamentosos, bactérias e fototróficos (Figura 1.7) contribuem para o escurecimento das superfícies de módulos, redução da transmitância e consequente perda de produtividade, podendo reduzir a potência nominal de módulos em 4,8% (SHIRAKAWA; JOHN; SANTOS; MOCELIN; ZILLES, 2012).

¹⁵ Um solo arenoso possui cerca de 70% de areia em relação ao total de partículas sólidas. Ele possui uma textura leve e granulosa, sendo composto, em grande parte, por areia (70%) e, em menor parte, por argila (15%). Apresenta poros grandes entre os grãos de areia, sem muito material de cimentação, pelos quais a água e o ar circulam com relativa facilidade, possibilitando auxiliar no efeito de sujidade por meio de carregamento.

¹⁶ Os biofilmes são definidos por uma colonização complexa entre microrganismos e seus produtos extracelulares de forma que o conjunto fique aderido às superfícies, sejam estes líquido-líquido, sólido-ar ou sólido-sólido.

A presença de colonização microbiana pode chegar a reduzir a potência de um sistema fotovoltaico, a depender da localidade, em 7%, num período entre 6 e 12 meses, chegando a 11% em até 18 meses, mesmo com presença de chuvas fortes e sem uma limpeza correta e eficiente de módulos (SHIRAKAWA; ZILLES; MOCELIN; GAYLARDE; GORBUSHINA; HEIDRICH; GIUDICE; NEGRO; JHON, 2015).

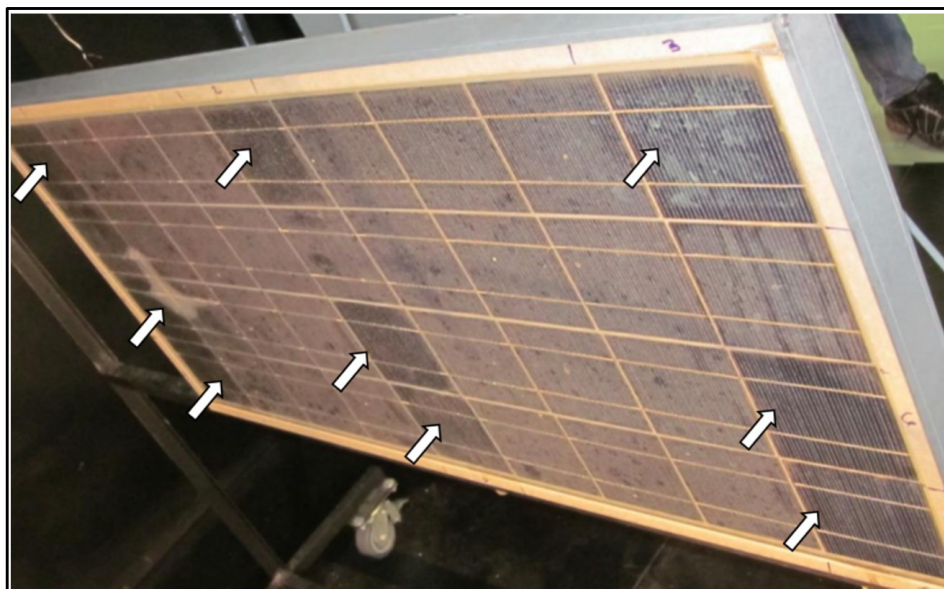


Figura 2.7 - Módulo com presença de microrganismos e locais, indicados por setas, menor concentração de sujidades após coleta de material para análise laboratorial. Fonte: SHIRAKAWA *et al*, 2012.

2.2 Metodologias de análise de sujidade

Um dos aspectos mais importantes da manutenção relacionada aos módulos fotovoltaicos é a limpeza regular da superfície dos mesmos. Entretendo para se estabelecer uma escala de limpeza, tem-se a necessidade de avaliar a intensidade de sujidade ocorrente nos geradores FV¹⁷.

Na literatura atual é possível encontrar algumas metodologias para determinação da intensidade da sujidade, em que se é verificado um acúmulo de sujeira tanto de forma artificial quanto natural. Artificialmente não se faz necessário o aguardo de grandes períodos de tempo para a quantificação de produtividade e perdas, podendo ser feito com adição uniforme de materiais diversos, como por exemplo, cinzas produzidas da

¹⁷ A abreviatura FV será utilizada nos termos que se referem a partes e componentes de um sistema fotovoltaico, e pode se referir às palavras fotovoltaico, fotovoltaicos, fotovoltaica ou fotovoltaicas, dependendo do contexto (concordância de gênero e número).

queima incompleta da combustão de hidrocarbonetos, de exaustão veicular e estações termoelétricas (KALDELLIS e FRANGOS, 2011).

Uma acumulação natural, apesar de demandar maior tempo de análise quando comparado com a artificial, traz informações mais precisas em condições reais de campo, tendo interação fidedigna ao longo do tempo, dos sistemas FV com o ambiente em que foram inseridos e em diferentes estações do ano.

De modo geral, as metodologias mais utilizadas contam com o uso de conjuntos equivalentes de módulos da tecnologia que se deseja analisar, sendo um conjunto tido como padrão, mantido não limpo durante todo o tempo de análise e outros conjuntos submetidos a uma escala de limpeza. Esta variando consideravelmente à depender do grau de detalhamento desejado em relação ao problema da sujidade, podendo ser de semanas até meses. Os conjuntos também podem ser submetidos à análises de variação de inclinação, direção de indecência de ventos e orientação geográfica, facilitando um maior ou menor acúmulo de sujidade com o tempo (THANGARAJ e VELURY, 2016).

Para o foco desta dissertação de mestrado, foi escolhido o *software* SCADA, desenvolvido pela empresa WEG. O programa SCADA apresenta certo grau confiabilidade e desempenho, sendo a solução WEG para monitoramento e operação de usinas solares fotovoltaicas, com funções de armazenamento dos dados coletados, monitoramento de variáveis elétricas e meteorológicas da usina (WEG, 2016).

O sistema SCADA facilita as atividades de operação e manutenção das usinas solares por meio de um sistema integrado. Além disso, possibilita a comunicação entre os principais equipamentos da usina, garantindo monitoramento e visualização das condições de operação a todo o momento e em tempo real. Outras informações são fornecidas, como, por exemplo, medição de tensão e corrente individualizada para cada *strings*¹⁸ da usina solar, possibilidade de detecção de falha de operação individualizada por *string*, sinalização de queima de protetor de surtos, aquisição de dados meteorológicos para análise de desempenho da usina, função de registro histórico das características de operação da usina solar, detecção automática de queda de desempenho

¹⁸ A *String-Box* é um quadro elétrico de proteção em corrente contínua, composto por um conjunto de dispositivos aptos a intervir contra distúrbios elétricos que ocasionalmente podem ocorrer entre as séries de Módulos Fotovoltaicos e o Inversor. Os dispositivos de proteção que compõem uma *String Box*, são: bases porta fusível; fusíveis; DPS – Dispositivos de Proteção Contra Surto; chave seccionadora em corrente contínua.

de geração da usina, com gerenciamento e controle de alarmes configurável e interface desenvolvida especialmente para cada cliente e projeto, atendendo a cada particularidade (WEG, 2016).

Após a definição do programa e aquisição de dados, inicia-se o processo de compilação e estruturação de dados, visando obtenção de informações precisas, objetivas e com fácil entendimento.

Algumas métricas efetuadas para avaliação de sujeira em módulos FV podem ser: (a) por meio da obtenção da potência máxima e a corrente de curto circuito, através de medições de corrente (I) e tensão (V), obtidas por curvas do tipo IxV; (b) avaliação da corrente de curto circuito, que é diretamente proporcional à irradiância recebida pelo módulo, sendo um método mais rápido e não exige equipamentos sofisticados. Contudo somente utiliza-se esse método na existência de uma acumulação uniforme de sujeira, não ocasionando descasamentos elétricos entre as células de um módulo avaliado; (c) avaliação através da taxa de desempenho do sistema em termos de produtividade de energia, o qual se destina o foco dessa dissertação de mestrado e que mais se aproxima ao valor real de perda do sistema FV, principalmente se comparada a avaliação da corrente de curto circuito (HICKEL; DESCHAMPS; NASCIMENTO; SIMÕES; RUTHER, 2016).

Alguns equipamentos são necessários para a obtenção de curvas IxV, dados de irradiância solar no momento das medições, dados de temperatura. Vale ressaltar que as incertezas de tais equipamentos devem ser levadas em consideração para uma análise mais coerente. No âmbito dessa pesquisa, alguns dados foram levantados utilizando equipamentos da empresa HT Instruments, desenvolvidos especificamente para uso em sistemas fotovoltaicos, possuindo confiabilidade e versatilidade.

Não obstante certas preocupações precisam ser levadas em conta, diminuindo incertezas no resultado final da avaliação, como, por exemplo, utilizar o mesmo equipamento para obtenção de curvas IxV e mesma célula de referência em todas as medições; realizar as medições com níveis de irradiância próximos a 1000 W/m², reduzindo assim as incertezas relativas à correção dos valores medidos para valores em condições padrão de medição; utilizar metodologia adequada e sensores de boa precisão na aquisição de dados de temperatura, quanto outros dados (RUTHER; HICKEL; DESCHAMPS; NASCIMENTO; SIMÕES, 2016).

2.3 Caracterização da região e local do estudo

A localidade de estudo do presente trabalho se dá no território brasileiro, na região sudeste, na capital do estado de São Paulo, dentro do Instituto de Energia e Ambiente – IEE, da Universidade de São Paulo – USP, de coordenadas geográficas 23°33′28,71″ S e 46°44′04,30″ W. A Figura 1.8, adquirida através do *software* Google Earth, evidencia a usina utilizada nessa pesquisa.



Figura 2.8 - Usina fotovoltaica presente no IEE - USP. Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.

A usina fotovoltaica em questão foi desenvolvida por meio de um projeto de P&D (PD-0068-0029/2011), juntamente com: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP, Cia Energética de São Paulo – CESP, Instituto de Energia e Ambiente – IEE, Programa Permanente para o Uso Eficiente de Energia na USP – PUREUSP e as empresas tidas como fornecedores (WEG, SS SOLAR, FAZILITA Energias Renováveis, SINDUSTRIAL, Empresa Brasileira de Energia Solar – EBES). O P&D teve o objetivo de instalação, operação e monitoramento de uma usina solar fotovoltaica de 0,540 MWp conectada indiretamente por meio de unidades consumidoras à rede de distribuição de energia elétrica, constituída por 4 subsistemas incorporando os seguintes conceitos e

estudos: *Building Integration* – BIPV¹⁹, *Building Applied* – BAPV²⁰, CENTRAL Solar, tipologias e configurações de inversores e Correção do fator de potência.

Os 4 subsistemas apresentam a seguintes configurações:

1. 150 kWp integrados em cobertura de vagas de estacionamento com configuração *multi-string* de inversores c.c./c.a., Si-monocristalino; BIPV;
2. 156 kWp aplicados em cobertura de edificação com configuração *multi-string* de inversores c.c./c.a., Si-monocristalino; BAPV;
3. 156 kWp sobre o terreno, estrutura fixa, com inversor c.c./c.a. central trifásico, Si-monocristalino; CTPV;
4. 78 kWp aplicados em cobertura de edificação com configuração *multi-string* de inversores c.c./c.a. sem transformador com controle de potência reativa; CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA²¹

A Central Fotovoltaica – CTPV, possui 10 mesas fotovoltaicas, compostas por 60 módulos fotovoltaicos de dimensões 0,99m x 1,65m, organizados em 3 fileiras de 20 módulos com uma *string-box* em cada fileira.

O subsistema CTPV possui um único inversor central de 140 kW nominais, trifásico (127/220 V) e sem transformador de fabricação nacional da WEG, modelo SIW 700. Ao inversor estão conectadas 30 séries fotovoltaicas compostas por 20 módulos de 260 Wp da fabricante Yingli, modelo YL260C-30b. O inversor está localizado dentro de um eletrocentro, onde também há um transformador elevador e os dispositivos de proteção elétrica. As proteções elétricas (fusíveis, DPS e chaves interruptoras) e os instrumentos de medição (corrente, tensão e variáveis ambientais) do gerador fotovoltaico estão instalados em caixas de conexão onde também é feita a

¹⁹ BIPV's representam o uso da tecnologia FV integrado com edificações para a substituição de materiais de construção convencionais em partes externas de um edifício, como telhado, claraboias, janelas ou fachadas, efetuando mais funções além da geração de energia, como, por exemplo, controle de luminosidade e barreira contra chuva.

²⁰ BAPV's representam o uso da tecnologia FV adicionada em edificações após a construção da mesma, ou seja, visando um *retrofit*, diferentemente dos BIPV's que ocorrem no momento da construção da edificação.

²¹ Por definição, o fator de potência é um número adimensional entre 0 e 1. Quando o fator de potência é igual a zero (0), o fluxo de energia é inteiramente reativo, e a energia armazenada é devolvida totalmente à fonte em cada ciclo. Quando o fator de potência é 1, toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga. Normalmente o fator de potência é assinalado como atrasado ou adiantado para identificar o sinal do ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão elétricas que são geradas.

ligação em paralelo de três séries fotovoltaicas, de maneira que apenas 10 pares positivo e negativo são encaminhados por eletrodutos subterrâneos ao inversor central. O diagrama unifilar deste subsistema é apresentado na Figura 1.9 (ALMEIDA; ZILLES; RIBEIRO; DEORIO. 2016).

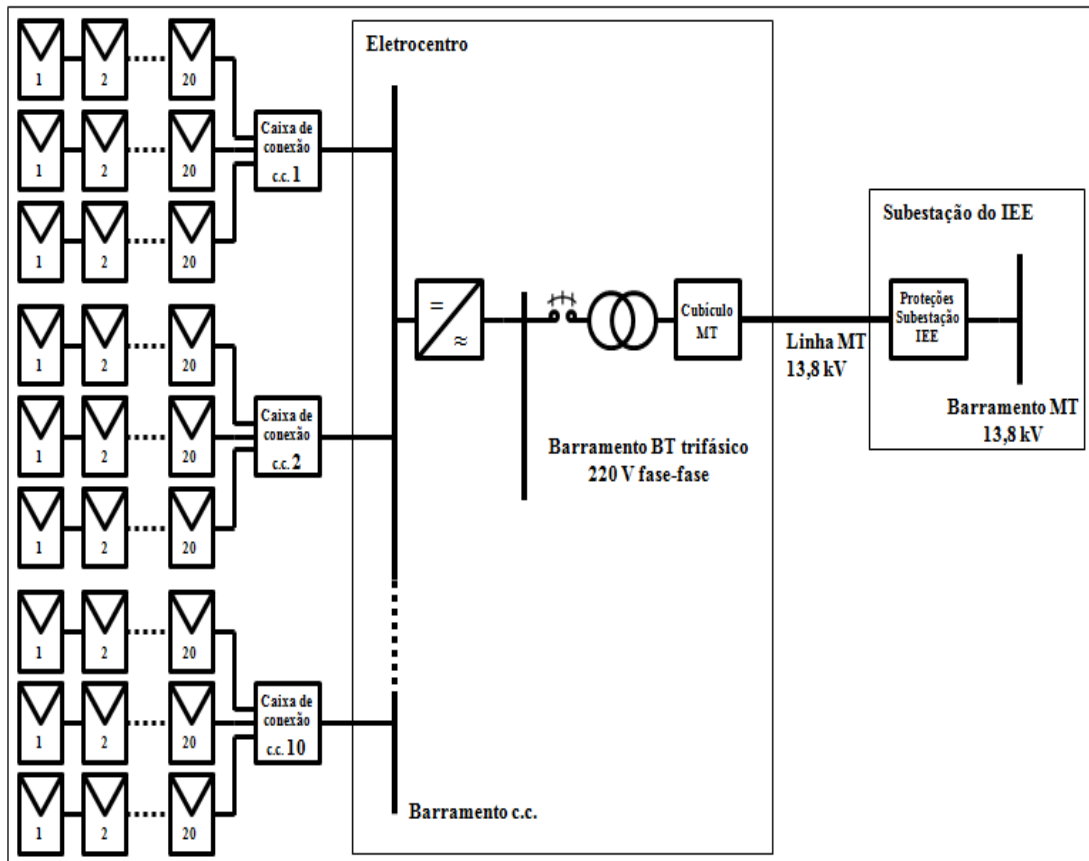


Figura 2.9 - Diagrama unifilar do subsistema CTPV. Fonte: ALMEIDA *et al*, 2016.

Cada grupo de três séries fotovoltaicas de 20 módulos está instalado em uma estrutura de suporte metálica fixa, com inclinação de 23° em relação à horizontal e azimute de aproximadamente 18° Oeste em relação ao Norte geográfico, presa ao solo. A Figura 1.10 mostra uma visão lateral das estruturas de suporte com os módulos, além de uma visão externa do eletrocentro situado próximo ao conjunto FV (ALMEIDA; ZILLES; RIBEIRO; DEORIO. 2016).

A Central solar está inserida na cidade de São Paulo, uma das regiões metropolitanas mais movimentadas do mundo, representando o principal centro financeiro, corporativo e mercantil da América do Sul, contendo uma população de aproximadamente 12 milhões de habitantes (IBGE, 2016).



Figura 2.10 - Gerador fotovoltaico (esquerda) e eletrocentro (direita) do subsistema CTPV. Fonte: ALMEIDA *et al*, 2016.

Afora de ser o maior centro de produção e o maior mercado consumidor do país, São Paulo também é um grande entroncamento rodoviário, e faz a importante ligação Norte-Sul do Brasil. A cidade é atendida por diversas rodovias, como a Rodovia Presidente Dutra, ligando o Rio de Janeiro, Rodovia Ayrton Senna, conectando o Vale do Paraíba; Rodovia Fernão Dias, destinando para Belo Horizonte; Rodovia dos Bandeirantes, ligando à Campinas; Rodovia Anhanguera, unindo Uberaba (Minas Gerais); Rodovia Castelo Branco, para Sorocaba; Rodovia Raposo Tavares, para a divisa do Mato Grosso do Sul; Rodovia Régis Bittencourt, conectando Curitiba; Rodovia dos Imigrantes e Rodovia Anchieta em direção a Baixada Santista. Certamente possui um considerável tráfego de veículos de pequeno, médio e grande porte, movidos por combustíveis como gasolina, diesel e álcool, os quais contribuem para a poluição do ar e conseqüentemente para aumento de parte da sujidade encontrada em geradores fotovoltaicos.

Além da grande movimentação de veículos, São Paulo é servida pelos aeroportos Campo de Marte, Congonhas, Cumbica e Viracopos em Campinas, sendo que estes dois últimos também são aeroportos internacionais e de carga. Aeroportos também são considerados ambientes que auxiliam no aumento de material particulado e contaminantes no ar atmosférico, conseqüentemente incremento de sujidade. Esta ainda sofre parcela de contribuição do grande parque industrial existente na cidade de São Paulo.

Em termos de climatologia, o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET tem o Mirante de Santana como sua principal estação meteorológica para a cidade de São Paulo, localizada no bairro Jardim de São Paulo, com altitude de 792 metros do nível do mar e possuindo um preciso monitoramento climatológico para toda a cidade.

Segundo dados do Banco de Dados Meteorológicos para o Ensino e Pesquisa – BDMEP, vinculado ao INMENT, e a normal meteorológica de 1961-1990, foi possível elaborar tabelas com dados de Temperatura máxima absoluta (°C), Temperatura máxima média (°C), Temperatura média (°C), Temperatura mínima média (°C), Temperatura mínima absoluta (°C), Precipitação (mm), Dias com precipitação (≥ 1 mm), Umidade relativa (%) e Horas de sol (horas) para a cidade de São Paulo.

Os dados climatológicos em questão foram distribuídos nas estações do ano que englobam, para efeito de organização, os meses de Janeiro, Fevereiro e Março como representativos da estação do verão (Tabela 2.3.1); os meses Abril, Maio e Junho, como representativos da estação do outono (Tabela 2.3.2); os meses de Julho, Agosto e Setembro, como representativos do Inverno (Tabela 2.3.3); os meses Outubro, Novembro e Dezembro, como representativos da Primavera (Tabela 2.3.4). Vale ressaltar que a Tabela 2.3.4 contém uma coluna com valores de média anual para os dados climatológicos compilados da estação Mirante de Santana para a cidade de São Paulo.

Tabela 2.1 - Dados climatológicos representativos da estação do verão para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.

Mês	Jan	Fev	Mar
Temperatura máxima absoluta (°C)	37,0	36,4	34,3
Temperatura máxima média (°C)	27,3	28	27,2
Temperatura média (°C)	22,1	22,4	21,8
Temperatura mínima média (°C)	18,7	18,8	18,2
Temperatura mínima absoluta (°C)	11,9	12,4	12,0
Precipitação (mm)	237,4	221,5	160,5
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	15,0	14,0	11,0
Umidade relativa (%)	80,0	79,0	80,0
Horas de sol (horas)	170,6	162,2	167,1

Tabela 2.2 - Dados climatológicos representativos da estação do outono para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016

Mês	Abr	Mai	Jun
Temperatura máxima absoluta (°C)	33,4	31,7	28,8
Temperatura máxima média (°C)	25,1	23,0	21,8
Temperatura média (°C)	19,7	17,4	16,3
Temperatura mínima média (°C)	16,3	13,8	12,4
Temperatura mínima absoluta (°C)	6,8	3,7	1,2

Precipitação (mm)	72,6	71,4	50,1
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	7,0	6,0	4,0
Umidade relativa (%)	80,0	79,0	78,0
Horas de sol (horas)	165,8	182,3	172,6

Tabela 2.3 - Dados climatológicos representativos da estação do inverno para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.

Mês	Jul	Ago	Set
Temperatura máxima absoluta (°C)	30,2	33,0	35,5
Temperatura máxima média (°C)	21,8	23,3	23,9
Temperatura média (°C)	15,8	17,1	17,9
Temperatura mínima média (°C)	11,7	12,8	13,9
Temperatura mínima absoluta (°C)	0,8	3,4	3,5
Precipitação (mm)	43,9	39,6	70,7
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	4,0	4,0	7,0
Umidade relativa (%)	77,0	74,0	77,0
Horas de sol (horas)	187,1	175,3	152,6

Tabela 2.4 - Dados climatológicos representativos da estação da primavera para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana), incluindo média anual das estações do ano. Fonte: INMET, 2016.

Mês	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima absoluta (°C)	37,8	35,3	34,8	37,8
Temperatura máxima média (°C)	24,8	25,9	26,3	24,9
Temperatura média (°C)	19,0	20,2	21,1	19,2
Temperatura mínima média (°C)	15,3	16,6	17,7	15,5
Temperatura mínima absoluta (°C)	7,0	7,0	10,3	0,8
Precipitação (mm)	126,9	145,8	200,7	1 441
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	10,0	11,0	14,0	107,0
Umidade relativa (%)	79,0	78,0	80,0	78,4
Horas de sol (horas)	153,9	163,0	150,8	2003,3

O estudo vinculado à esta dissertação também conta com dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG da Universidade de São Paulo.

Um ponto importante para se entender a sujidade, ocorrente na superfície dos módulos situados na área de estudo, é a composição de elementos presentes no ar atmosférico da cidade de São Paulo. A Tabela 2.3.5, proveniente de um estudo sobre a composição iônica majoritária de águas de chuva no centro da cidade de São Paulo, efetuado em 2004, informa existência dos seguintes compostos: CH_3COO^- , HCOO^- , Cl^- ,

NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e H^+ em diferentes concentrações e a deposição dos mesmos em miligramas por metro quadrado por mês (LEAL; FONTENELE; PEDROTTI; FORNARO, 2004).

Tabela 2.5 - - Concentração e deposição das espécies químicas analisadas em amostras de águas de chuva na região central de São Paulo*. Fonte: Adaptado de LEAL *et al.*, 2004.

Íon	MPV $\mu\text{mol.L}^{-1}$	Média ($\pm\text{dp}$) $\mu\text{mol.L}^{-1}$	Deposição $\text{mg.m}^{-2}.\text{mês}^{-1}$
CH_3COO^-	16,90	25,90 (20,90)	103,0
HCOO^-	4,69	9,77 (14,60)	22,0
Cl^-	8,54	16,70 (18,70)	31,0
NO_2^-	0,46	0,59 (0,71)	2,2
NO_3^-	21,20	30,90 (30,70)	136,0
SO_4^{2-}	12,40	18,20 (16,30)	124,0
$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	0,63	0,86 (0,91)	5,5
Na^+	15,00	31,30 (36,00)	35,0
NH_4^+	37,60	49,00 (40,30)	70,0
K^+	2,64	4,54 (10,10)	10,0
Ca^{2+}	5,33	7,89 (9,85)	22,0
Mg^{2+}	2,51	2,89 (2,11)	6,2
H^+	6,51	10,10 (16,40)	0,63
pH	5,19	4,99	--
Λ ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	13,00	18,7 (12,6)	--

* Para a elaboração da Tabela utilizou-se média ponderada por volume (MPV) e média aritmética (\pm desvio padrão) de 94 amostras, para pH e condutividade no período de 03/2002 a 02/2003 e de 69 amostras para cátions e ânions no período de 07/2002 a 02/2003.

A escolha da central solar, existente no IEE – USP, se mostra então como uma opção sob influência significativa dos efeitos de sujidade ocorrentes na cidade de São Paulo, podendo ser seguramente um estudo de referência para outras localidades do país e mundo com características semelhantes, contribuindo assim positivamente para o preenchimento de parte da lacuna de conhecimento existente na temática que tange essa pesquisa.

3 CAPÍTULO 2 – EQUIPAMENTOS, ANÁLISE DE DADOS, MONITORAMENTO E LIMPEZA

Este capítulo apresenta os equipamentos utilizados durante o estudo, o período, forma de análise de dados e a descrição do monitoramento do sistema e atividade de limpeza executada para que se tenha uma correta avaliação da sujidade no decorrer do tempo.

3.1 Equipamentos utilizados

O estudo de sujidade na central solar do IEE-USP, conta com uso de alguns equipamentos desenvolvidos para sistemas fotovoltaicos. Informações técnicas dos equipamentos podem ser encontradas na parte destinada aos materiais anexos desse estudo.

Um dos equipamentos utilizados é um instrumento multifuncional para verificação e monitoramento em instalações fotovoltaicas, desenvolvido pela empresa *HT Instruments*, ilustrado na Figura 2.1.



Figura 3.1 - Equipamento SOLAR I-Vw utilizado para obtenção de curvas IxV. Fonte: *HT Instruments*, 2016.

O aparelho apresenta fabricação com código HT: 0251 e modelo: SOLAR I-Vw, proporcionando medidas em instalações FV, aquisição de curvas IxV de um único módulo ou conjunto de módulos, medição de tensão de circuito aberto – Voc e corrente de curto circuito – Isc, banco de dados de até 30.000 módulos fotovoltaicos selecionáveis e de certo modo versátil para a finalidade do estudo.

Outro equipamento utilizado para obtenção de curvas IxV dos módulos fotovoltaicos, tanto sujos como limpos, foi o simulador *High^{LIGHT} tester* do tipo LMT disponível no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos – LSF do IEE, apresentado na Figura 2.2. O simulador foi desenvolvido pela empresa Pasan SA do grupo Meyer Burger e considerado como referência mundial para caracterização de módulos fotovoltaicos, tendo classificação A⁺A⁺A⁺, conforme catalogo do fabricante.



Figura 3.2 - Simulador *HighLIGHT tester LMT* utilizado para obtenção de curvas IxV de módulos sujos e limpos. Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Para avaliar a sujidade, existe a necessidade de realizar rotinas de limpeza nos módulos existentes na Central solar do IEE, o que gera consumo de água. Sendo assim, foi utilizado um medidor de vazão da empresa Conrad, de código nº: 552059, simples e capaz de contabilizar volumes totais acumulados durante o trabalho de limpeza. Vale ressaltar que o manual do equipamento não informa suas incertezas, forçando o uso de uma verificação direta de volumes, em que foi utilizado um recipiente graduado e com capacidade para 4 litros. A água ao passar no medidor de vazão, aciona um dispositivo mecânico, ligado a um contador eletrônico que registra os valores volumétricos. O fluxo da água foi parado no momento em que o leitor do instrumento indicou exatos 4 litros, possibilitando a verificação do volume existente no recipiente, o qual também continha exatos 4 litros de água, evidenciando a confiabilidade de medida para o propósito da pesquisa.

A Figura 2.3 apresenta o medidor de vazão utilizado no estudo da sujidade, bem como os materiais necessários em conjunto, como, esguicho, mangueira, braçadeiras e outros.



Figura 3.3 - Medidor de vazão e materiais do conjunto. Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Outros materiais como, cabos de extensão telescópica fabricados em alumínio anodizado de 4,5m, fibras abrasivas de limpeza leve e mops para limpeza em vidros, adaptadores para agrupar os cabos, fibras e mops, balde, esponjas e rodos também foram necessários para a execução da limpeza na superfície dos módulos fotovoltaicos e são apresentados na Figura 2.4.



Figura 3.4 - Outros materiais necessários para limpeza em módulos. Fonte: Acervo do Autor, 2016.

A primeira metodologia de limpeza com foco na obtenção de dados de consumo de água não utilizou os cabos de junta telescópica, fibra abrasivas de limpeza leve e mops, contando somente com um esfregão de pano, balde e uma esponja não abrasiva pequena. A limpeza foi realizada em 6 módulos de dimensões 0,99m x 1,65m, com

sujidade acumulada de 30 meses, registrando um consumo de água de aproximadamente 2,5 litros por módulo FV. O procedimento adotado foi:

- 1) Inicie o procedimento preferencialmente ao final da tarde, onde a produtividade do sistema é menor e as temperaturas dos módulos não são elevadas, evitando evaporação precoce da água na superfície dos módulos;
- 2) Desligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando evitar problemas com os diodos e possível danificação dos circuitos existentes, uma vez que estará trabalhando com água;
- 3) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 4) Uso somente de água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de *hotspots*²² e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 5) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 6) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 7) Em um balde coloque aproximadamente 8 litros de água limpa e comum de torneira, deixando o recipiente próximo ao local da atividade de trabalho;
- 8) Molhar uma vez a superfície do módulo sujo com o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o esfregão de pano, encharcado com água proveniente do balde, em toda a superfície do módulo para a remoção da parte mais grosseira da sujeira acumulada;
- 9) Molhar uma segunda vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o agora a esponja não abrasiva para uma limpeza mais fina;
- 10) Molhar uma terceira vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;

²² *Hotspot*, do inglês ponto quente, consiste em um sobreaquecimento localizado num módulo fotovoltaico. Aparece quando, devido a alguma anomalia, a corrente de curto-circuito da célula afetada se torna inferior à corrente de funcionamento do conjunto, dando origem a uma polarização invertida, dissipando a energia gerada por outras células em forma de calor.

- 11) Deixe a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo;
- 12) Repetir o procedimento em outros módulos, levando em conta que a água do balde deve ser trocada somente quando estiver muito suja e escura, evitando assim desperdícios;
- 13) Ao término da limpeza, ligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando que o sistema volte a operar normalmente e guarde todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

O procedimento utilizado em módulos com 30 meses de acúmulo de sujeira se mostrou trabalhoso, negativo em termos ergonômicos e com alto consumo de água, apesar de ter limpadado nitidamente os módulos. Certamente módulos mais impregnados tendem a apresentar um consumo maior de água.

Visando a redução de consumo de água, otimização do tempo e melhoria da ergonomia, uma segunda metodologia foi aplicada em outros 6 módulos semelhantes e com 30 meses de sujidade acumulada. Desta vez, utilizando os cabos de junta telescópica, fibras abrasivas de limpeza leve e mops para vidros, com movimentos mais precisos. O segundo procedimento adotado foi:

- 1) Inicie o procedimento preferencialmente ao final da tarde, em momentos com chuva leve ou pós-chuva, onde a produtividade do sistema é menor e as temperaturas dos módulos não são elevadas, evitando evaporação precoce da água na superfície dos módulos;
- 2) Desligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando evitar problemas com os diodos e possível danificação dos circuitos existentes, uma vez que estará trabalhando com água;
- 3) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com o consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 4) Uso somente de água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de *hotspots* e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 5) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;

- 6) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 7) Molhar uma vez a superfície do módulo sujo com o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o cabo com junta telescópica, em conjunto com um mop de pano para vidro encharcado com água, proveniente do esguicho, em toda a superfície do módulo para a remoção da parte mais grosseira da sujeira acumulada;
- 8) Molhar uma segunda vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o cabo com junta telescópica, em conjunto com fibra abrasiva de limpeza leve especial para vidros, em uma limpeza mais fina do módulo;
- 9) Molhar uma terceira vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;
- 10) Deixe a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo;
- 11) Repetir o procedimento em outros módulos;
- 12) Ao término da limpeza, ligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando que o sistema volte a operar normalmente e guarde todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

O segundo procedimento de limpeza resultou no consumo de cerca de 2,1 litros de água por módulo com dimensões de 0,99m x 1,65m cada e 30 meses de sujidade acumulada, tendo então uma redução no consumo de aproximadamente 13,6% e apresentando uma limpeza mais rápida e mais confortável ao trabalhador. Certamente a diminuição do consumo de água é facilitada ao passo em que a prática da atividade é melhorada pelo trabalhador e com utilização de outras fontes de água, como a própria água da chuva previamente armazenada em reservatório próximo. Sendo assim a segunda metodologia de limpeza foi adotada como o procedimento a seguir no decorrer do experimento. Vale ressaltar que situações com menor intensidade de sujidade terão consumos menores em litros de água por módulo ou por metro quadrado. Um *hotspot* em um módulo FV pode ocorrer devido a um sobreaquecimento localizado no mesmo, em que a energia de algumas células do módulo é dissipada na forma de calor, uma vez que a corrente de curto-circuito da célula afetada se torna inferior à corrente de

funcionamento do conjunto, dando origem a uma polarização invertida (MORETÓN; LORENZO; NAVARTE, 2015).

A Figura 2.5 apresenta o surgimento de pontos quentes em módulos fotovoltaicos alcançando temperaturas de até 78,1°C. *Hotspots* ao persistirem durante o tempo acabam por diminuir a vida útil do gerador FV. Essa situação anômala pode ocorrer por uma série de situações, como por exemplo, acúmulo de sujeira, produtos químicos e ocorrência de sombreamento na parte externa dos módulos (LORENZO; MORETÓN; LUQUE, 2014; GARCIA; RUIZ; CHENLO, 2003; MOLENBROEK; WADDINGTON; EMERY, 1991).

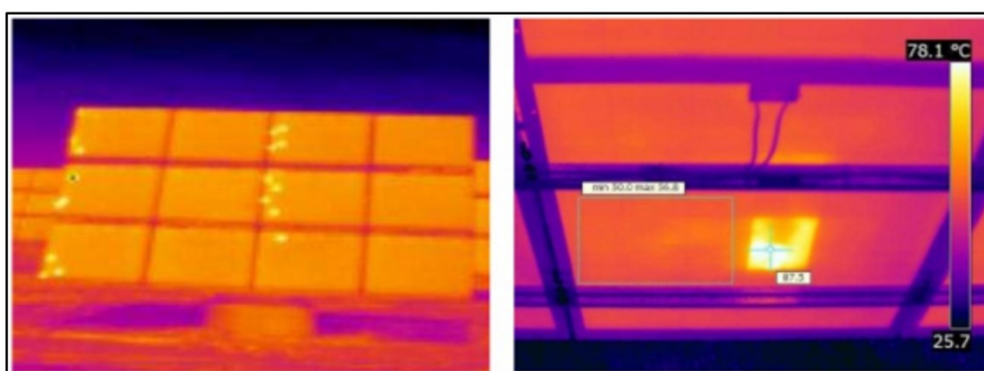


Figura 3.5 - *Hotspots* ocorrentes em módulos fotovoltaicos. Fonte: MORETÓN *et al*, 2015.

Internamente aos módulos o surgimento de pontos quentes pode prover de microfissuras diversas, ocasionadas por impactos em transporte, instalação, manutenção e/ou excessos de pressões exercidas nos geradores; de uma soldagem defeituosa na ligação metálica entre as células, gerando variações na resistência da passagem de corrente elétrica atuante no conjunto de células e conseqüentemente *hotspots* (BUERHOP; SCHLEGEL; NIESS; VODERMAYER; WEISSMANN; BRABEC, 2012). Não obstante a degradação induzida pelo diferencial de potencial existente, e imperfeições diversas nos materiais de fabricação do módulo, sejam em forma, espessura ou composição química também podem gerar pontos quentes. (BERGHOLD; KOCH; BOTTCHE; UKAR; LEERS; GRUNOW, 2013; VASKO; VIJH; KARPOV, 2014).

3.2 Análise de dados

Os dados obtidos foram compilados por meio de planilhas, sintetizados em gráficos e tabelas com o intuito de visualizar às informações de produtividade dos geradores fotovoltaicos, consumo de água, tempo de trabalho e intensidade de sujidade do subsistema CTPV.

Diferentes abordagens visam ser utilizadas, como uso de curvas de potência e irradiância, definindo dias de céu claro, nublados, chuvosos e/ou com variações climáticas mistas; uso de curvas IxV dos módulos e séries de módulos para entender perdas paralelas ao efeito da sujidade; utilização de dados de produtividade adquiridos minuto a minuto pelo *software* SCADA e trabalhados em planilhas, possibilitando efetuar somatórios diário, mensal, anual e cálculos de percentual de perdas em geração nos diferentes períodos de análise. Não obstante, outras abordagens interessantes podem surgir e prover informações a respeito da interação entre sujidade, produtividade de energia e custos envolvidos.

3.3 Monitoramento dos sistemas

O monitoramento do sistema CTPV se dá em tempo real e conta com ajuda do *software* SCADA, o qual apresenta certo grau confiabilidade e desempenho, com funções de armazenamento dos dados coletados minuto a minuto. O programa em questão tem capacidade de gerar curva de irradiância diária, e gráficos de produção de energia em diferentes períodos de tempo e entre outras funções.

As Figuras 2.6 e 2.7 evidenciam a interface do *software* com o fornecimento de dados de potência ativa, potência c.c., tensão c.a., tensão c.c., corrente, eficiência, temperatura da célula e módulo, irradiância, energia, data de visualização e informações de advertência relacionada à usina solar e as mesas fotovoltaicas que são objeto deste estudo.

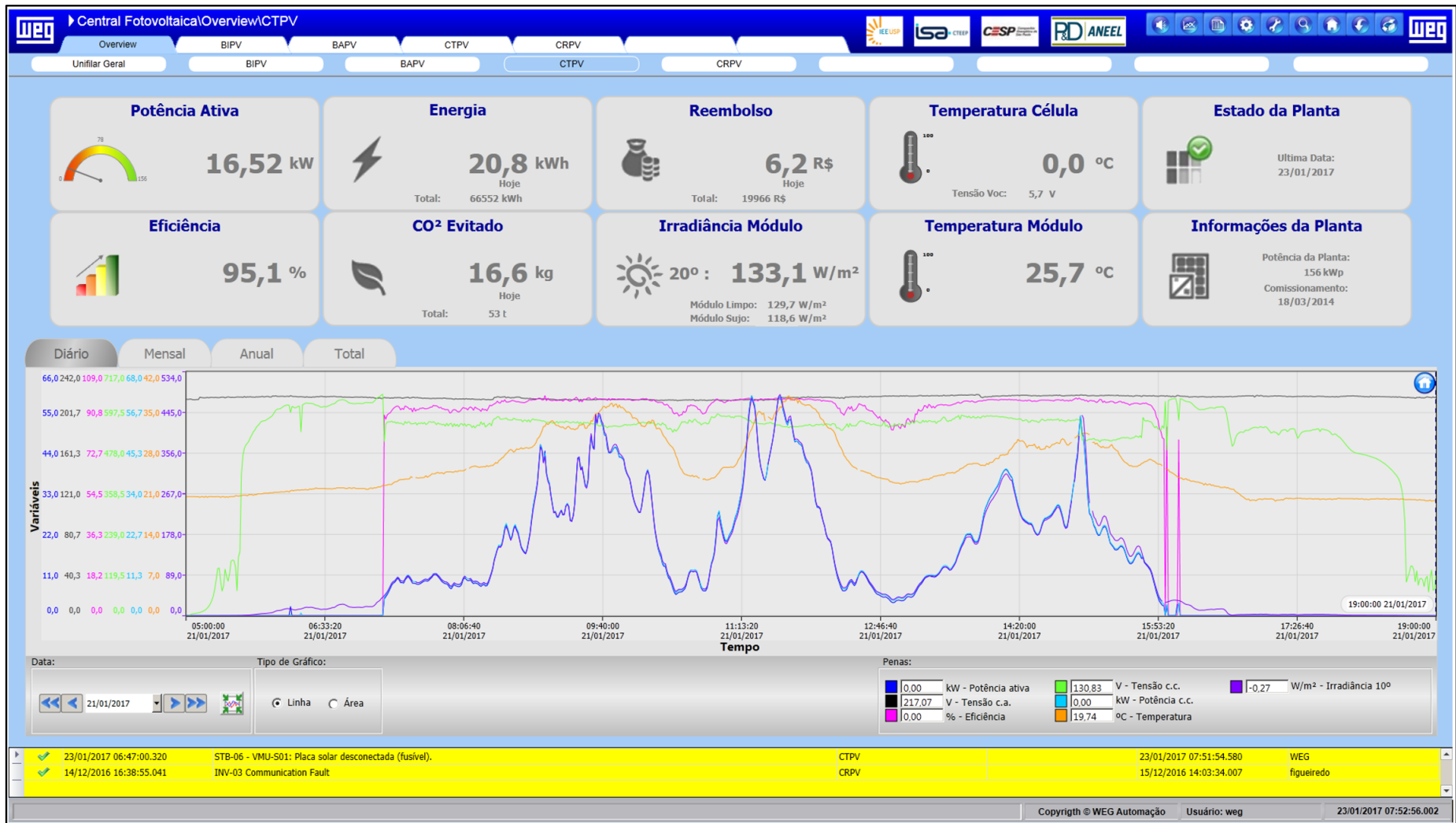


Figura 3.6 - Interface do software SCADA com dados variados. Fonte: Acervo do Autor, 2017.

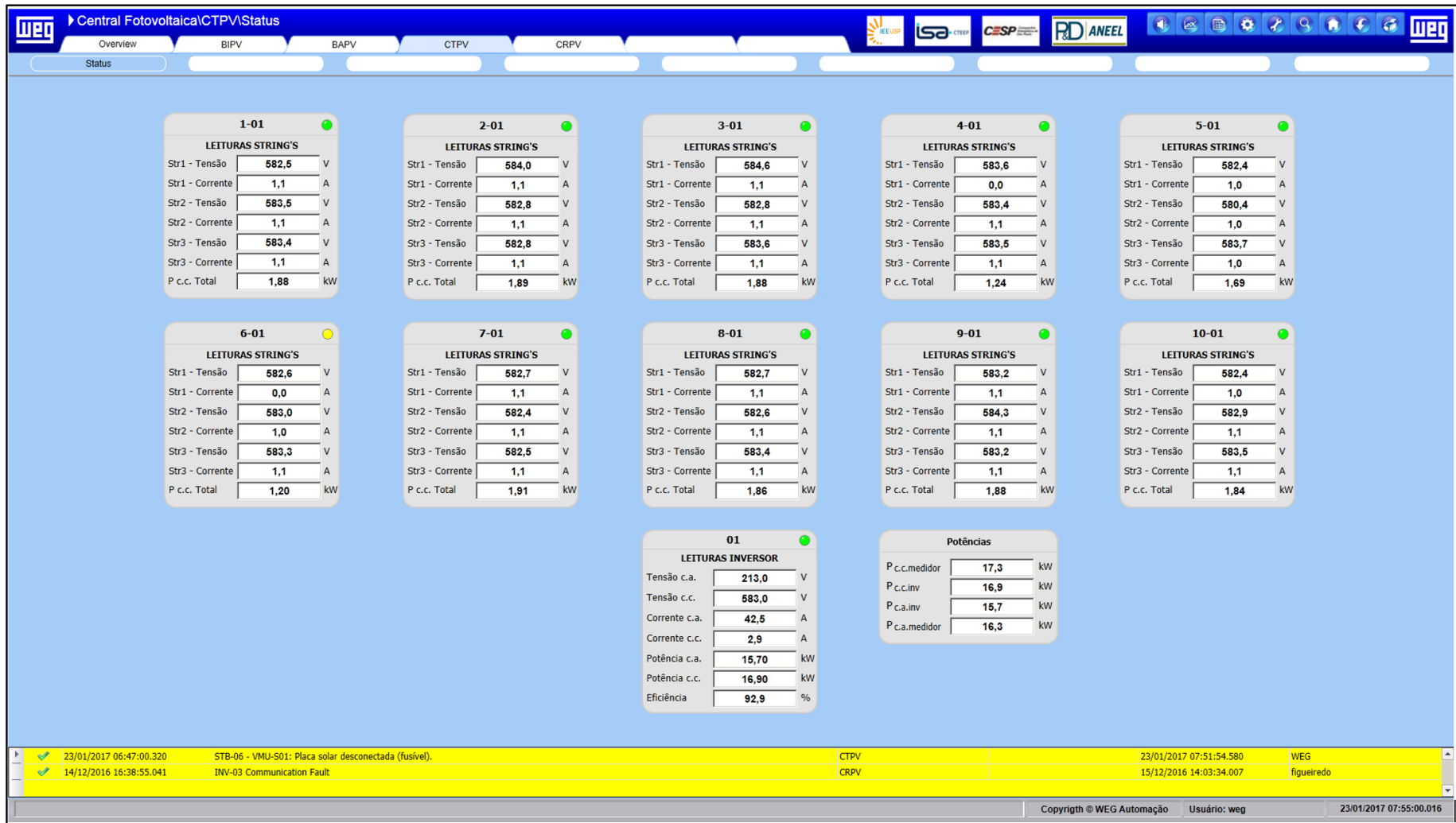


Figura 3.7 - Interface do *software* SCADA com dados de corrente, tensão e potência para cada mesa CTPV. Fonte: Acervo do Autor, 2017.

3.4 Atividade de limpeza

O presente estudo possui como um dos objetivos adquirir dados de produtividade em relação ao acúmulo e sujidade no decorrer do tempo, sendo assim de forma natural. Para tal, uma escala de limpeza se faz necessária em todas as mesas selecionadas como objeto de pesquisa. Conforme dito anteriormente, a usina possui 10 mesas fotovoltaicas, com 60 módulos em cada. A Figura 2.8 ilustra um diagrama esquemático da usina, com as mesas numeradas de 1 a 10 e suas respectivas rotinas de limpeza.

Das 10 mesas existentes, 8 foram selecionadas para o estudo de análise das perdas de geração em microgeradores fotovoltaicos por efeito de sujidade e 2 para um estudo de degradação em módulos FV. Sendo assim, para efeito de otimização das atividades paralelas as mesas foram organizadas da seguinte forma:

- 1) Mesa 5, mantida sempre suja e apresentando sujidade acumulada superior a 30 meses;
- 2) Mesa 7, limpa 1 vez ao mês;
- 3) Mesa 8, limpa de 3 em 3 meses;
- 4) Mesa 3, limpa de 6 em 6 meses;
- 5) Mesa 9, limpa de 9 em 9 meses;
- 6) Mesa 2, limpa de 12 em 12 meses;
- 7) Mesa 10, limpa de 15 em 15 meses;
- 8) Mesa 1, limpa de 18 em 18 meses;
- 9) Mesas 4 e 6, destinadas para o estudo de degradação em módulos FV.

Em paralelo a este estudo, também está sendo desenvolvido na mesma usina um estudo sobre degradação de módulos fotovoltaicos. O monitoramento da degradação²³ é um aspecto que interessa ao lado técnico e financeiro de empreendimentos da área fotovoltaica, visto que a deterioração dos módulos afeta diretamente a potência de saída e conseqüentemente o retorno do investimento acaba sendo reduzido, podendo gerar riscos financeiros.

²³ Degradação em módulos FV gera impactos significativos para a perda de produtividade dos geradores, diminuindo a redução do investimento inicial aplicado no empreendimento e pode ser por diversas causas como, por exemplo, potencial induzido, a corrosão, delaminação, descoloração, interação entre elétrons dos materiais e quebra/rachaduras.

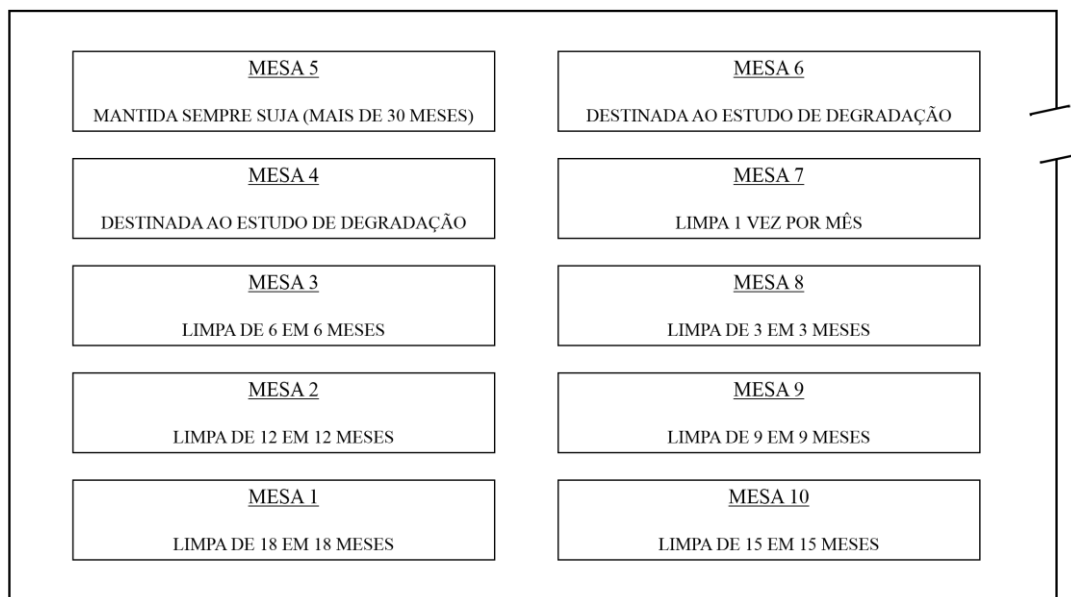


Figura 3.8 - Esquematização da rotina de limpeza nas mesas fotovoltaicas da central solar. Fonte: Acervo do Autor, 2017.

De forma geral, empresas do ramo informam que a degradação da potência de módulos FV de silício cristalino instalados em campo é entre 0,5 % e 1,0 % ao ano. Os módulos de silício cristalino, tem garantia de defeitos de fabricação de 3 a 5 anos e com estabilidade conhecida de 25 a 30 anos, sendo a garantida a potência de pico mínima de 90% de potência nominal nos 10 primeiros anos de funcionamento e 80 % no período de 20 a 25 anos (PINHO e GALDINO, 2014).

A usina fotovoltaica foco deste estudo possui módulos fotovoltaicos fornecidos pela empresa YINGLI e são caracterizados como PANDA YL260C-30b de silício monocristalino tipo-n, com potência de saída de 260 W. Segundo a empresa fabricante os módulos PANDA possuem degradação inicial baixa e alta performance tanto em baixa quanto em alta temperatura (YINGLI, 2013).

Os módulos da central solar vêm apresentando considerável degradação desde o momento da implementação da usina no Instituto de Energia em Ambiente da Universidade de São Paulo no ano de 2012. Sendo assim, alguns módulos foram escolhidos como amostras representativas de toda a central solar e submetidos a testes e medições com uso do simulador High^{LIGHT} da PASAN e do equipamento SOLAR I-Vw da HT Instruments.

No dia 04 de novembro de 2016, três módulos com acúmulo de sujidade de 30 meses foram submetidos ao teste com o simulador High^{LIGHT} da PASAN, posteriormente os mesmos foram totalmente limpos e submetidos ao mesmo teste. Como resultado foi possível verificar uma degradação alta de aproximadamente 10%, bem como as curvas de potência corrente e tensão para os 3 módulos fotovoltaicos em condição limpo e sujo, conforme gráficos encontrados no material anexo à esta pesquisa de mestrado.

Ao se comparar a condição padrão de 260W de potência com um módulo em condição limpa e suja, obtém-se respectivamente perdas de aproximadamente 7% e 16% em potência, logo ao se comparar a condição padrão com a condição limpa é possível verificar que de 2012 até 2016 ocorreram perdas de aproximadamente 1,75% ao ano, em detrimento da degradação existente nos módulos. Já ao se comparar um módulo limpo com um módulo sujo é possível verificar perdas em torno de 10%. A Tabela 2.1 visa mostrar um resumo de informações das perdas de potência dos módulos em diferentes condições a partir dos resultados do simulador High^{LIGHT} da PASAN.

Tabela 3.1 - Dados de perdas de potência devido à degradação existente. Fonte: INMET, 2016.

Módulo Fotovoltaico	Número de Série	Condição	Potência (W)	Perda em Relação ao Padrão 260W (%)	Perda em Relação à Condição (%)
Yingli Panda 260 W	125002055097	Limpo	242,46	6,75	--
Yingli Panda 260 W	125002055097	Sujo	217,48	16,35	10,30
Yingli Panda 260 W	125002055253	Limpo	239,64	7,83	--
Yingli Panda 260 W	125002055253	Sujo	217,18	16,47	9,37
Yingli Panda 260 W	125002055255	Limpo	242,20	6,85	--
Yingli Panda 260 W	125002055255	Sujo	219,65	15,52	9,31

A ocorrência de degradação nos módulos da central solar possibilitou o surgimento de um estudo paralelo, utilizando as mesas 4 e 6, visando descobrir a causa da degradação existente e se a mesma é uniforme em todos os módulos. Para verificar a

uniformidade da degradação nos módulos foi necessário medições reais em campo com uso do equipamento SOLAR I-Vw da HT Instruments, possibilitando compilar os dados em curvas IxV e extrapolá-los para as condições de teste padrão. As curvas foram compiladas e extrapoladas de acordo com as normas IEC, utilizando valores α e β de catálogo, que são medidas percentuais; valores de irradiância e temperatura no momento da medição; e dados operacionais de tensão e corrente de cada fileira no momento da medição para extrapolação.

A Tabela 2.2 mostra os dados compilados de potência por fileira e potência por mesa, possibilitando verificar que existe uma diferença de aproximadamente 8% em potência ao se comparar as fileiras de maior e menor potência; e uma diferença de aproximadamente 6% ao se comparar as mesas de maior e menor potência. Não obstante, ao se comparar um valor médio das potências das fileiras com a fileira de maior potência, verifica-se uma diferença de aproximadamente 4%.

Tabela 3.2 - Dados de potência por fileira e por mesa. Fonte: Autor, 2017.

Mesa	Fileira	Potência Fileira (W)	Potência Mesa (kW)
10	1	4394,01	13,28
	2	4507,75	
	3	4378,90	
9	1	4306,05	13,34
	2	4526,79	
	3	4504,61	
8	1	4254,82	12,89
	2	4299,95	
	3	4330,28	
7	1	4412,93	13,36
	2	4467,15	
	3	4483,99	
3	1	4358,17	13,07
	2	4365,36	
	3	4350,31	
2	1	4296,61	13,03
	2	4413,04	
	3	4322,12	
1	1	4527,67	13,70
	2	4536,21	
	3	4634,55	

Em uma comparação do valor médio da potência das mesas e a mesa de maior potência observa-se uma diferença de aproximadamente 3%. Sendo assim, dentro da

faixa de incerteza aceitável para que não seja necessário a realização de ponderações nas análises do estudo de sujidade e perdas de produtividade.

As Figuras 2.9 e 2.10 mostram, respectivamente os gráficos de corrente/tensão e potência/tensão para cada fileira de cada mesa destinada ao estudo de sujidade, com exceção da mesa 5, visto que esta deve ser mantida sempre suja e não pode ser desligada enquanto o estudo de sujidade não terminar. Desse modo, ao final do estudo se sujidade é pensado em se efetuar uma limpeza em todas as 8 mesas e efetuar novas medições com o equipamento SOLAR I-Vw da HT Instruments, permitindo uma comparação do antes e depois do estudo.

Os gráficos mostram que as correntes em momento de tensão igual a zero são bem próximas, variando entre 8,6 e 9 amperes ao se comparar fileiras de maior e menor corrente, ou seja, uma diferença de aproximadamente 4,4% e de 2,2% ao se comparar um valor médio das correntes com a fileira de maior corrente, estando então dentro de uma faixa aceitável para que exista uma certa uniformidade de degradação entre as fileiras de módulos. Já no âmbito das tensões, uma similaridade também é possível ser verificada, uma vez que as tensões em momento de corrente zero variam entre 740 e 750 volts ao se comparar fileiras de maior e menor tensão, ou seja uma diferença de aproximadamente 1,33% e de 0,67% ao se comparar um valor médio das tensões com a fileira de maior tensão. Não obstante, a visualização das curvas IxV indica uma uniformidade com pouca variação entre correntes e tensões, o que de certo modo sugere uma uniformidade na degradação dos módulos. Analogamente o mesmo é verificado no gráfico de potência por tensão para cada fileira.

Outra abordagem que auxilia no entendimento da degradação uniforme dos módulos da central solar, é a comparação da produtividade de energia mensal, conforme a Tabela 3.3 (presente no capítulo de resultados) com a potência das mesas existentes nas Tabela 2.2. Sendo assim, ao se comparar a produtividade mensal e potência das mesas, por exemplo, mesa 2 com 1,89 MWh mensal de energia e 13,03 kW de potência e mesa 7 com 1,95 MWh mensal de energia e 13,36 kW de potência, verificam-se variações em torno de 3% em termos de energia e 2,5% em termos de potência, ou seja dentro da mesma faixa de erro de 3% encontrada nos dados compilados das curvas IxV.

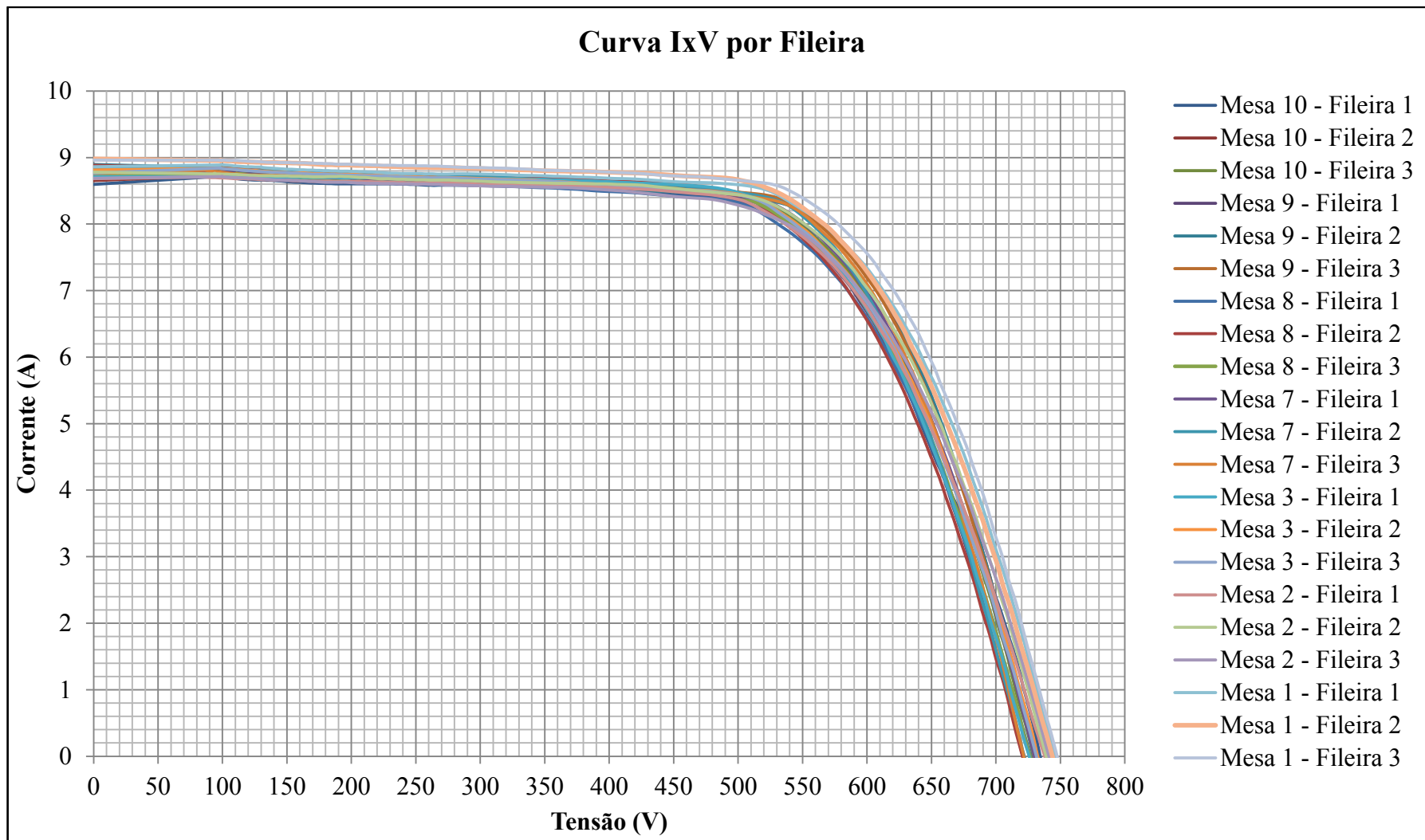


Figura 3.9 - Curva IxV, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade. Fonte: Autor, 2017.

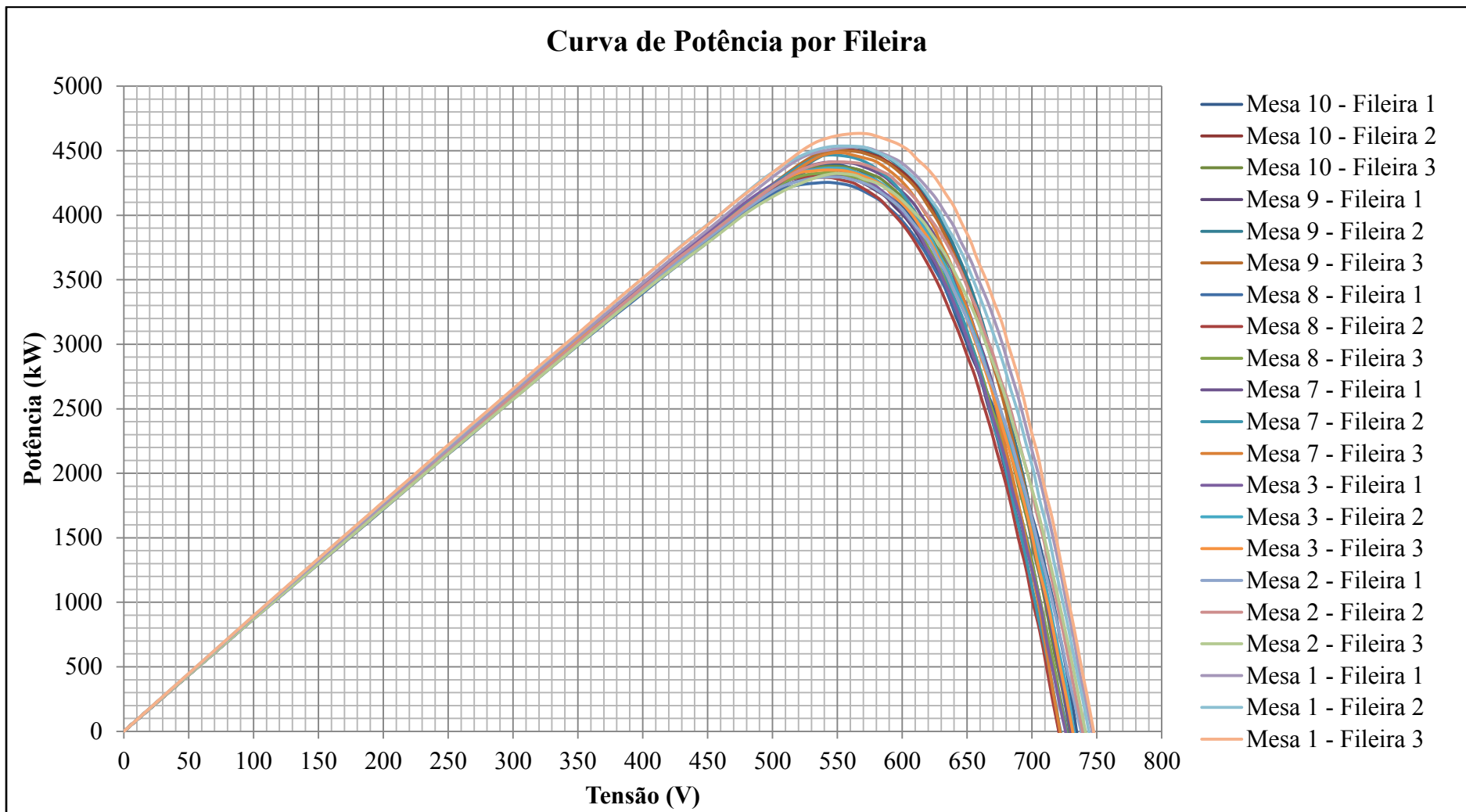


Figura 3.10 - Curva de potência, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade. Fonte: Autor, 2017.

Além da abordagem com uso de produtividade mensal, pode-se utilizar por exemplo a produtividade diária em um dia de céu claro, um dia de céu nublado e potência das mesas adquiridas em medição de campo, conforme os dados das Tabelas 2.2 e 3.3 e a Figura 2.11, a qual mostra as comparações de energia e potência, juntamente com as linhas de tendência, em relação as mesas da central solar. Pelas linhas de tendência é possível verificar que as variações de produtividade e de energia se encontram dentro da mesma faixa de erro de 3% encontrada nos dados compilados das curvas IxV.

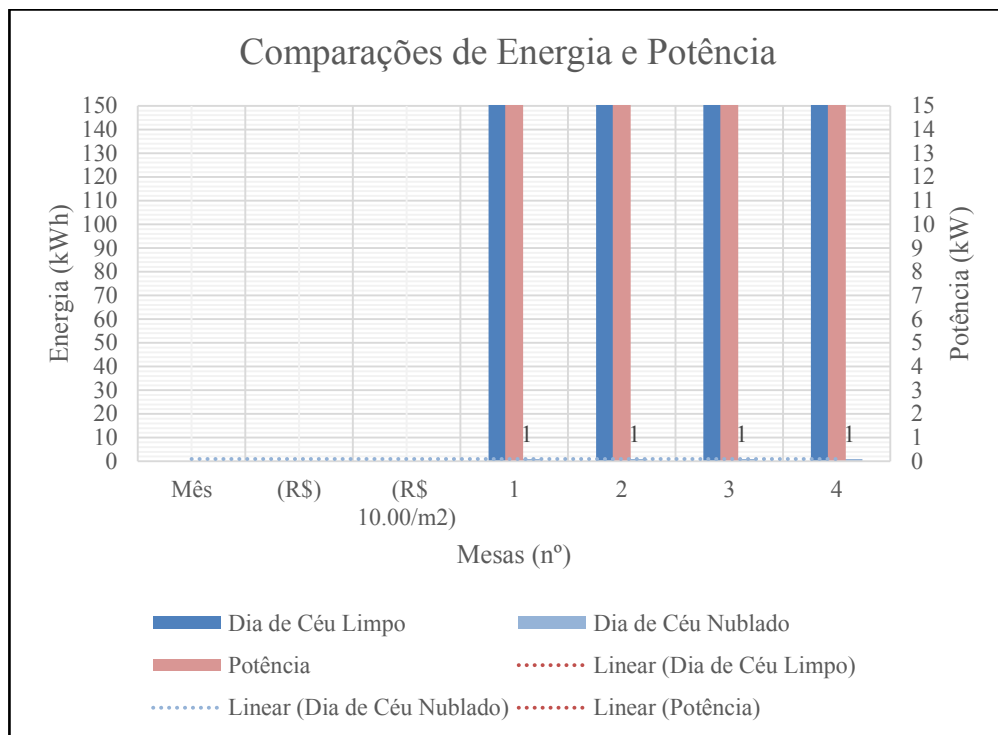


Figura 3.11 - Comparação de dados de produtividade em dia de céu claro e nublado e potência das mesas, com linhas de tendência. Fonte: Autor, 2017.

4 CAPÍTULO 3 – DADOS ADQUIRIDOS E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os dados adquiridos por meio do monitoramento do sistema fotovoltaico adotado como objeto de estudo. Os dados levantados e compilados são apresentados por meio de tabelas, gráficos e figuras, para melhor visualização dos resultados.

4.1 Dados referentes ao 1º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica para o estudo de sujidade foi necessário limpar todas as mesas. Sendo assim, entre os dias 12 e 14 de outubro de 2016 foi realizada a limpeza de todas as mesas do subsistema CTPV, excluindo a mesa 5, possibilitando ter o dia 15 de outubro de 2016 como sendo o tempo zero para análise do estudo. Entretanto, devido a ocorrência de problemas no *software* SCADA e a antena de comunicação, o início da análise da dados foi adiado para o dia 21 de dezembro de 2016.

No dia 20 de dezembro de 2016 foram lavadas novamente todas as mesas da central solar, excluindo a mesa 5, possibilitando ter o dia 21 de dezembro de 2016 como o tempo zero ou tempo inicial do presente estudo e das escalas de limpeza. A Figura 3.1 mostra momentos de limpeza ocorridos previamente ao dia considerado como tempo zero do estudo.



Figura 4.1 - Limpezas anteriores ao período de 21 de dezembro de 2016, considerado tempo zero do estudo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Após 1 mês, ou seja, no dia 21 de janeiro de 2017 foi constatado 1 mês de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da primeira limpeza oficial da

mesa 7. A limpeza ocorreu num momento pós chuva, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.1, adquiridos pelo INMET em relação a estação automática mirante de Santana em São Paulo e pela estação presente no IEE.

Tabela 4.1 - Dados climatológicos para o dia 21 de janeiro de 2017 para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana) e Estação IEE. Fonte: INMET, 2017

Precipitação	2,0 mm
Temperatura máxima	21,0 °C
Temperatura mínima	20,4 °C
Velocidade do vento	1,9 m/s
Direção vento	167°

Por ter ocorrido nessas condições e aliado à prática adquirida após várias limpezas prévias, verificou-se um consumo baixo de água, cerca de 29,4 litros. Logo, 0,46 litros por módulo com dimensões 0,99m x 1,65m, representando uma redução de 78,7% no consumo de água, quando comparado à metodologia de limpeza adotada para módulos com 30 meses de sujeira acumulada.

O tempo total de limpeza foi de 30 minutos, utilizado somente o cabo telescópico de alumínio, junto com a fibra abrasiva de limpeza leve e o Autor dessa pesquisa de mestrado como mão de obra. O procedimento foi molhar a superfície com água, posteriormente usar a fibra abrasiva e molhar a superfície do módulo novamente removendo a sujeira residual. Vale ressaltar que foi verificado início de chuva leve 2 minutos após o término da limpeza.

A Tabela 3.2 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da primeira limpeza da mesa 7 e as Figuras 3.2 e 3.3, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 21 de janeiro de 2017.

As Figura 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente a comparação de sujeira entre módulos limpos e módulos com mais de 30 meses de sujeira acumulada e a limpeza de uma mesa com módulos há mais de 30 meses sujos e um mop impregnado de sujeira, após limpar somente 3 módulos dos 60 que formam uma mesa.

Tabela 4.2 - Dados de consumo de água para a 1ª limpeza da mesa 7. Fonte: AUTOR, 2017.

1ª Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	29,4 L

Litros por módulo	0,46 L
-------------------	--------



Figura 4.2 - Consumo de água da primeira limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão. Fonte: Acervo do Autor, 2017.



Figura 4.3 - Módulos da mesa 7 no dia 21 de janeiro de 2017. Fonte: Acervo do Autor, 2017.



Figura 4.4 - Comparação entre módulos limpos e sujos com mais de 30 meses de sujidade acumulada.
Fonte: Acervo do Autor, 2016.

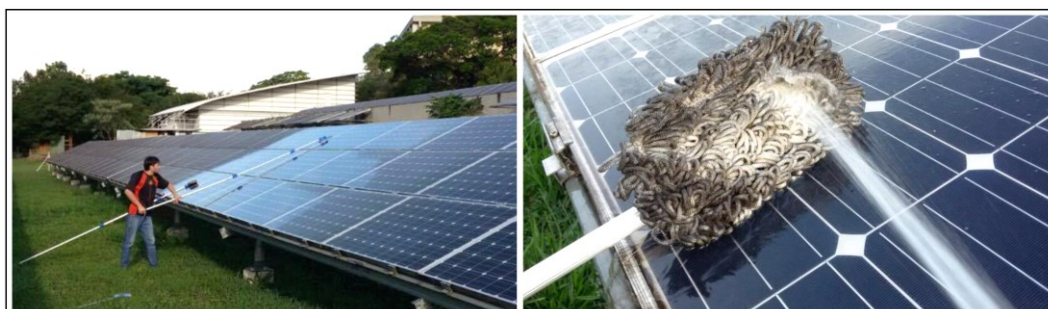


Figura 4.5 - Limpeza de uma mesa com mais de 30 meses de sujidade acumulada e mop impregnado de sujeira, após limpar 3 módulos FV. Fonte: Acervo do Autor, 2016.

O dados de produtividade do primeiro mês de estudo, ou seja do início do dia 21 de dezembro de 2016 até final do dia 20 de janeiro de 2017, foram adquiridos pelo *software* SCADA e compilados por meio de planilhas do *Microsoft Excel*, uma vez que os dados relacionados à central solar são adquiridos minuto à minutos e o programa SCADA os disponibiliza em formato `“.csv”`²⁴.

Para a contabilidade de produção mensal de energia foram utilizados dados das mesas 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 e 10, excluindo as mesas 4 e 6 destinadas a um estudo paralelo de degradação de módulos fotovoltaicos. Sendo assim, foi possível multiplicar os dados de tensão de cada *string-box* pelos respectivos dados de correntes, adquirindo dados de potência que foram somados ao longo do tempo para obtenção dos dados de energia. Desse modo foi verificado que a central solar produziu no primeiro mês aproximadamente 15,12 MWh.

²⁴ `“.csv”` é o código para *Comma Separated Values*, do português Valores Separados por Vírgula. Arquivos `“.csv”` podem ser inseridos em planilhas Excel e trabalhados de diferentes formas ao se transformar texto em colunas por meio da separação por vírgulas.

A mesa 5, considerada como o padrão de referência para uma mesa suja, produziu cerca de 1,74 MWh no primeiro mês. Já a mesa 7, limpa todo mês e avaliada como o padrão de referência para uma mesa limpa, produziu cerca de 1,95 MWh, aproximadamente 10,83% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

Com intuito de melhor entender os efeitos da sujidade foram analisados dados de produtividade relacionados a um dia de céu claro e a um dia de céu nublado. O dia 26 de dezembro de 2016 foi o único período da primeira análise em que se verificou um céu totalmente aberto, já para céu nublado foi escolhido o dia 16 de janeiro de 2017. As Figuras 3.6 e 3.7 visam apresentar um gráfico adquirido pelo programa SCADA com a curva de potência ativa em kW e irradiância em W/m^2 para os dias de céu claro e nublado.

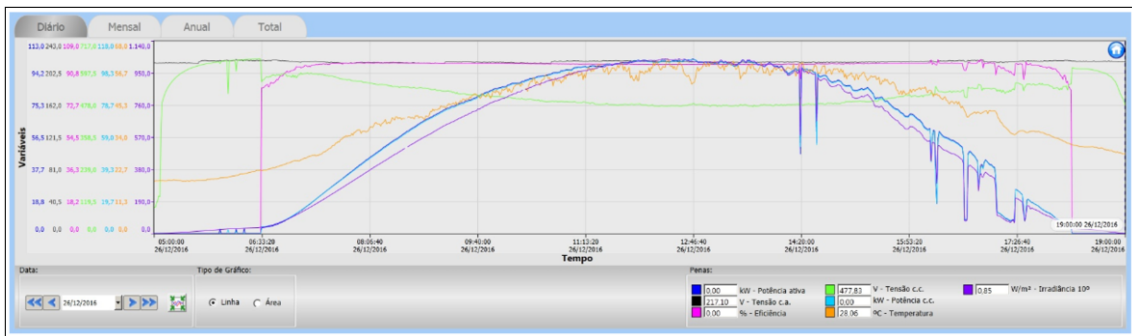


Figura 4.6 - Curvas de irradiância e potência pra uma dia de céu claro, 26 de dezembro de 2016. Fonte: SCADA, 2016.

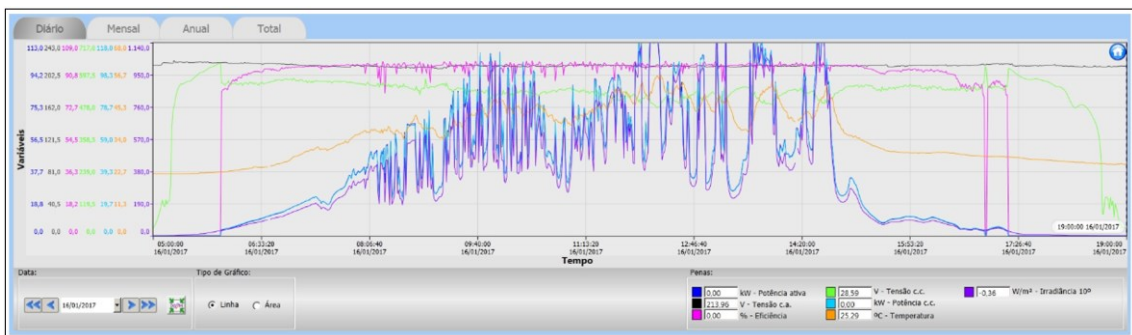


Figura 4.7 - Curvas de irradiância e potência pra uma dia de céu nublado, 16 de janeiro de 2017. Fonte: SCADA, 2017.

No dia adotado para **céu claro** a central solar produziu aproximadamente 710,07 kWh. A mesa 5, padrão de referência para uma mesa suja, produziu cerca de 81,89

kWh. Já a mesa 7, padrão de referência para uma mesa limpa, produziu cerca de 92,12 kWh, aproximadamente 11,10% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

No dia adotado para **céu nublado** a central solar produziu aproximadamente 449,81 kW. A mesa 5, padrão de referência para uma mesa suja, produziu cerca de 52,31 kWh. Já a mesa 7, padrão de referência para uma mesa limpa, produziu cerca de 57,91 kWh, aproximadamente 9,67% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

A Tabela 3.4 visa resumir as informações relacionadas aos dados de produtividade mensal, em dia de céu limpo e em dia de céu nublado para cada mesa utilizada no estudo. Já a figura 3.9, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa, tendo a referência para mesa suja em coloração vermelha e mesa limpa em coloração verde. A Figura 3.10 mostra dados de produtividade em um dia aleatório, sendo escolhido uma dia de céu limpo e um dia de céu nublado do primeiro mês de análise, tendo em tons vermelho e mesa limpa em tons verde.

Tabela 4.3 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produção em dia de Céu Limpo em 26/12/2016 (kWh)	Produção em dia de Céu Nublado em 16/01/2017 (kWh)
1	1,91	90,04	56,68
2	1,88	87,91	56,10
3	1,88	87,95	56,34
5	1,74	81,89	52,31
7	1,95	92,12	57,91
8	1,89	88,78	56,01
9	1,95	92,26	57,73
10	1,92	91,10	56,74

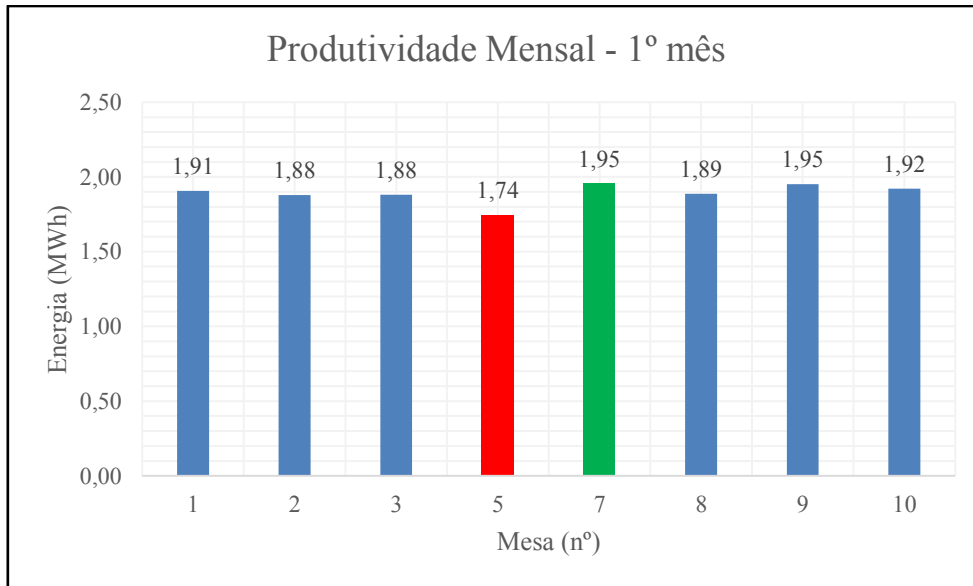


Figura 4.8 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.

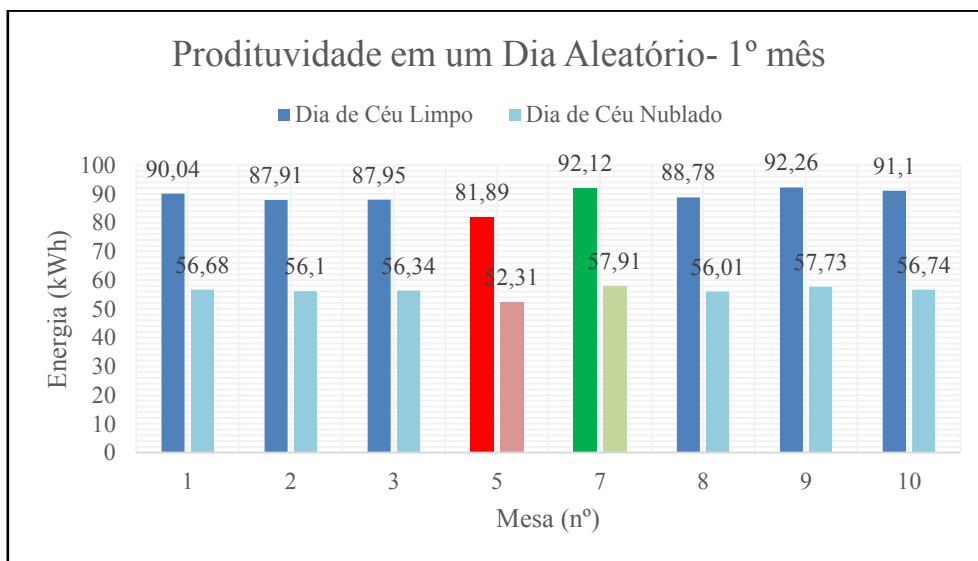


Figura 4.9 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.

Os dados dos gráficos auxiliam na visualização do impacto da sujeira na produtividade dos geradores fotovoltaicos, comprovando que é um assunto importante a se levar em consideração na manutenção e operação de sistemas fotovoltaicos diversos. Longos períodos sem uma limpeza eficiente pode resultar em perda de ganhos energéticos e diminuição do tempo de retorno do investimento aplicado em um empreendimento FV.

4.2 Dados referentes ao 2º mês de estudo na Central Solar do IEE

Após 2 mês, ou seja, no dia 21 de fevereiro de 2017 foi constatado 2 meses de acúmulo da sujeidade nas mesas da central e a necessidade da segunda limpeza oficial da mesa 7. A limpeza ocorreu durante chuva moderada, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.5, adquiridos pelo INMET em relação a estação automática mirante de Santana em São Paulo e pela estação presente no IEE.

Tabela 4.4 - Dados climatológicos para o dia 21 de fevereiro de 2017 para a cidade de São Paulo (Mirante de Santana) e Estação IEE. Fonte: INMET, 2017

Precipitação	3,0 mm
Temperatura máxima	29,7°C
Temperatura mínima	28,1°C
Velocidade do vento	3,0 m/s
Direção vento	310°

Por ter ocorrido nessas condições e aliado à prática adquirida após várias limpezas prévias, verificou-se um consumo baixo de água, cerca de 16,7 litros. Logo, 0,17 litros por módulo com dimensões 0,99m x 1,65m, representando uma redução de 92,13% no consumo de água, quando comparado à metodologia de limpeza adotada para módulos com 30 meses de sujeidade acumulada.

O tempo total de limpeza foi de 35 minutos, utilizado somente o cabo telescópico de alumínio, junto com a fibra abrasiva de limpeza leve e o Autor desse projeto de pesquisa como mão de obra. O procedimento foi molhar a superfície com água, posteriormente usar a fibra abrasiva e molhar a superfície do módulo novamente removendo a sujeira residual. Vale ressaltar que nos momentos em que ocorreu chuva moderada não foi necessário molhar previamente a superfície do módulo, fazendo com que o consumo de água fosse reduzido.

A Tabela 3.6 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da segunda limpeza da mesa 7 e as Figuras 3.11 e 3.12, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 21 de fevereiro de 2017.

Tabela 4.5 - Dados de consumo de água para a 2ª limpeza da mesa 7. Fonte: AUTOR, 2017.

2ª Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	16,7 L
Litros por módulo	0,17 L



Figura 4.10 - Consumo de água da segunda limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão. Fonte: Acervo do Autor, 2017.



Figura 4.11 - Módulos da mesa 7 no dia 21 de fevereiro de 2017, sendo a primeira imagem antes de iniciar o procedimento de limpeza e a segunda durante a limpeza em momentos de chuva moderada. Fonte: Acervo do Autor, 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produtividade, desse mês de estudo, segue o mesmo método relacionado ao primeiro mês de análise, tendo então o dia 21 do mês como o tempo inicial para a análise de produtividade do mesmo (Capítulo 3, item 3.1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no segundo mês aproximadamente 15,52 MWh, cerca de 2,62% a mais do que o mês anterior, provavelmente devido a um período de maior irradiância solar.

A mesa 5, considerada como o padrão de referência para uma mesa suja, produziu cerca de 1,83 MWh no segundo mês. Já a mesa 7, limpa todo mês e avaliada como o padrão de referência para uma mesa limpa, produziu cerca de 2,02 MWh, aproximadamente 10,38% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

Com intuito de melhor entender os efeitos da sujidade foram analisados dados de produtividade relacionados a um dia de céu claro e a um dia de céu nublado. O dia 20 de fevereiro de 2017 apresentou um céu limpo, já para céu nublado foi escolhido o dia 02 de fevereiro de 2017. As Figuras 3.13 e 3.14 visam apresentar um gráfico adquirido pelo programa SCADA com a curva de potência ativa em kW e irradiância em W/m^2 para os dias de céu claro e nublado.

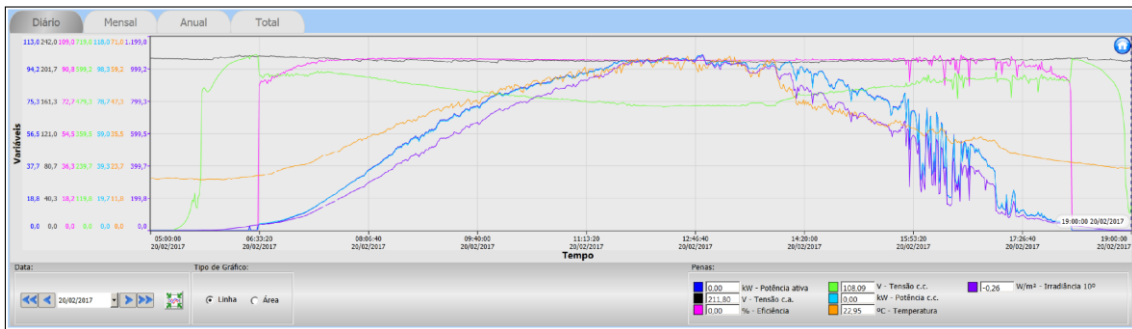


Figura 4.12 - Curvas de irradiância e potência para uma dia de céu claro, 20 de fevereiro de 2017. Fonte: SCADA, 2017.

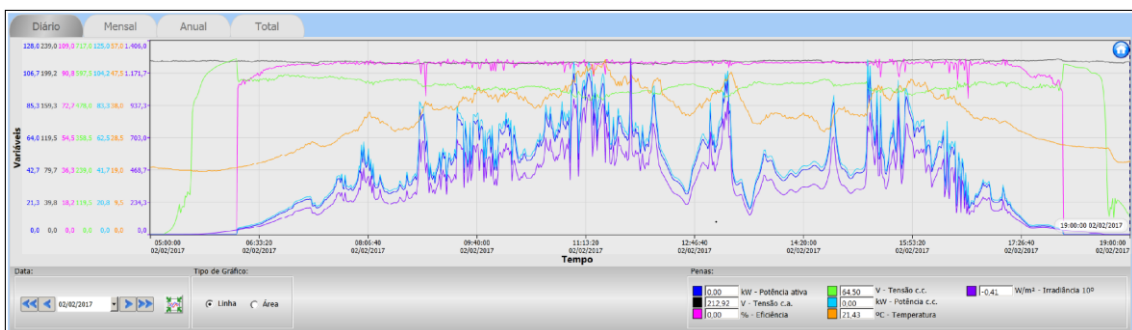


Figura 4.13 - Curvas de irradiância e potência para uma dia de céu nublado, 02 de fevereiro de 2017. Fonte: SCADA, 2017.

No dia adotado para **céu claro** a central solar produziu aproximadamente 658,52 kWh. A mesa 5, padrão de referência para uma mesa suja, produziu cerca de 78,29

kWh. Já a mesa 7, padrão de referência para uma mesa limpa, produziu cerca de 86,41 kWh, aproximadamente 9,40% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

No dia adotado para **céu nublado** a central solar produziu aproximadamente 478,79 kWh. A mesa 5, padrão de referência para uma mesa suja, produziu cerca de 55,90 kWh. Já a mesa 7, padrão de referência para uma mesa limpa, produziu cerca de 62,30 kWh, aproximadamente 10,28% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

A Tabela 3.7 visa resumir as informações relacionadas aos dados de produtividade mensal, em dia de céu limpo e em dia de céu nublado para cada mesa utilizada no estudo. Já a figura 3.15, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa, tendo a referência para mesa suja em coloração vermelha e mesa limpa em coloração verde. A Figura 3.16 mostra dados de produtividade em um dia aleatório, sendo escolhido uma dia de céu limpo e um dia de céu nublado do primeiro mês de análise, tendo em tons vermelho e mesa limpa em tons verde.

Tabela 4.6 - Dados de produtividade de cada mesa para o 2º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produção em dia de Céu Limpo em 20/02/2017 (kWh)	Produção em dia de Céu Nublado em 02/02/2017 (kWh)
1	1,95	82,56	60,05
2	1,92	80,60	59,75
3	1,92	80,76	59,93
5	1,83	78,29	55,90
7	2,02	86,42	62,30
8	1,92	81,11	59,60
9	2,00	85,02	61,25
10	1,96	83,75	60,00

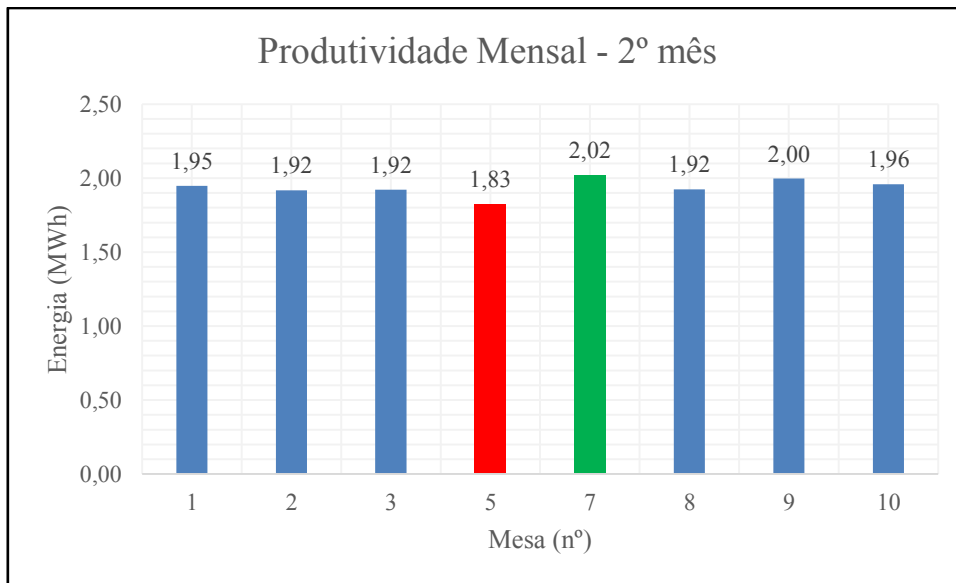


Figura 4.14 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.

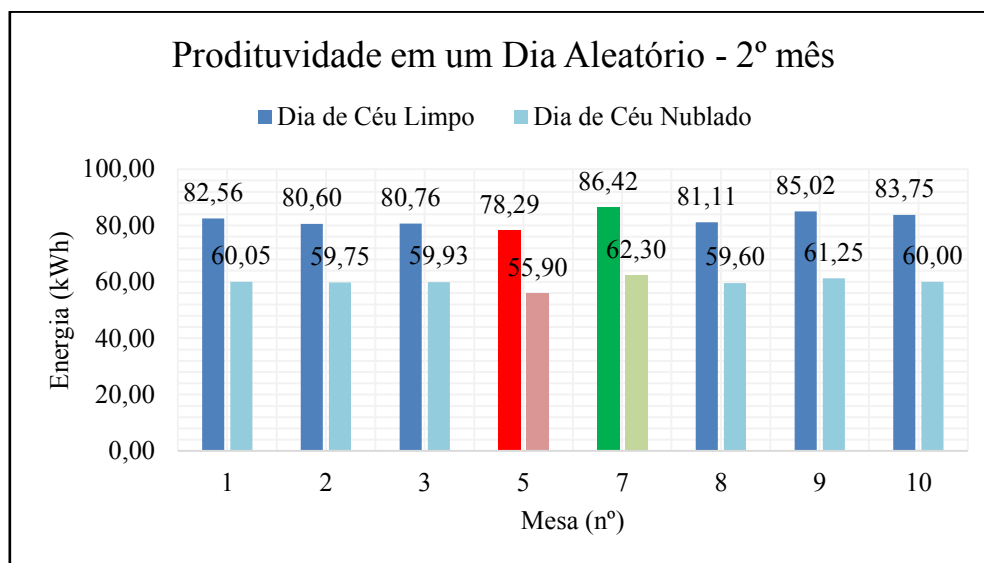


Figura 4.15 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise. Fonte: AUTOR, 2017.

Os dados dos gráficos auxiliam na visualização do impacto da sujeira na produtividade dos geradores fotovoltaicos, sendo um assunto a ser levado em consideração na gestão de um sistema FV. Decisões econômicas podem ser levadas em consideração ao se verificar elevados níveis de perda em produtividade, como, por exemplo, decisão entre efetuar uma limpeza no sistema ou aumentar a capacidade de geração por meio da inserção de mais módulos FV, mantendo o sistema sujo. Sendo

assim, se o custo de limpeza for muito alto em comparação ao custo do kW e houver disponibilidade de área livre para inserção de mais módulos no sistema FV, talvez seja mais atrativo aumentar a potência de todo o sistema ao invés de simplesmente limpá-lo e recuperar parte da perda existente em detrimento de sujidade acumulada por longos períodos de tempo.

4.3 Dados referentes ao 3º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.4 Dados referentes ao 4º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.5 Dados referentes ao 5º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.6 Dados referentes ao 6º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.7 Dados referentes ao 7º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.8 Dados referentes ao 8º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.9 Dados referentes ao 9º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.10 Dados referentes ao 10º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.11 Dados referentes ao 11º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.12 Dados referentes ao 12º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.13 Dados referentes ao 13º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.14 Dados referentes ao 14º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.15 Dados referentes ao 15º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.16 Dados referentes ao 16º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.17 Dados referentes ao 17º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

4.18 Dados referentes ao 18º mês de estudo na Central Solar do IEE

De forma a construir uma base metodológica científica sólida para o estudo de sujidade foi necessário deixar

5 CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE LIMPEZA EFICIENTE E CUSTOS ASSOCIADOS

Este capítulo apresenta uma metodologia eficiente para a limpeza de um sistema fotovoltaico, informando os custos associados ao estudo da sujidade, foco dessa dissertação, em termos de consumo de água e homem hora trabalhada por kW. Ao final são apresentados orientações de escalas de limpeza para módulos fotovoltaicos.

5.1 Metodologia eficiente de limpeza

O estudo a que se destina essa dissertação efetuou várias limpezas na central solar do IEE, sendo a primeira metodologia de limpeza executada com foco na obtenção de dados de consumo de água não utilizou os cabos de junta telescópica, fibra abrasivas de limpeza leve e mops, contando somente com um esfregão de pano, balde e uma esponja não abrasiva pequena. A limpeza foi realizada em 6 módulos de dimensões 0,99m x 1,65m, com sujidade acumulada de 30 meses, registrando um consumo de água de aproximadamente 2,5 litros por módulo FV. O procedimento adotado foi:

- 1) Inicie o procedimento preferencialmente ao final da tarde, onde a produtividade do sistema é menor e as temperaturas dos módulos não são elevadas, evitando evaporação precoce da água na superfície dos módulos;
- 2) Desligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando evitar problemas com os diodos e possível danificação dos circuitos existentes, uma vez que estará trabalhando com água;
- 3) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 4) Uso somente de água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de *hotspots* e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 5) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 6) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;

- 7) Em um balde coloque aproximadamente 8 litros de água limpa e comum de torneira, deixando o recipiente próximo ao local da atividade de trabalho;
- 8) Molhar uma vez a superfície do módulo sujo com o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o esfregão de pano, encharcado com água proveniente do balde, em toda a superfície do módulo para a remoção da parte mais grosseira da sujeira acumulada;
- 9) Molhar uma segunda vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o agora a esponja não abrasiva para uma limpeza mais fina;
- 10) Molhar uma terceira vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;
- 11) Deixe a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo;
- 12) Repetir o procedimento em outros módulos, levando em conta que a água do balde deve ser trocada somente quando estiver muito suja e escura, evitando assim desperdícios;
- 13) Ao término da limpeza, ligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando que o sistema volte a operar normalmente e guarde todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

O procedimento utilizado em módulos com 30 meses de acúmulo de sujeira se mostrou trabalhoso, negativo em termos ergonômicos e com alto consumo de água, apesar de ter limpado nitidamente os módulos. Certamente módulos mais impregnados tendem a apresentar um consumo maior de água.

Visando a redução de consumo de água, otimização do tempo e melhoria da ergonomia, uma segunda metodologia foi aplicada em outros 6 módulos semelhantes e com 30 meses de sujidade acumulada. Desta vez, utilizando os cabos de junta telescópica, fibras abrasivas de limpeza leve e mops para vidros, com movimentos mais precisos. O segundo procedimento adotado foi:

- 1) Inicie o procedimento preferencialmente ao final da tarde, em momentos com chuva leve ou pós-chuva, onde a produtividade do sistema é menor

e as temperaturas dos módulos não são elevadas, evitando evaporação precoce da água na superfície dos módulos;

- 2) Desligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando evitar problemas com os diodos e possível danificação dos circuitos existentes, uma vez que estará trabalhando com água;
- 3) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com o consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 4) Uso somente de água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de *hotspots* e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 5) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 6) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 7) Molhar uma vez a superfície do módulo sujo com o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o cabo com junta telescópica, em conjunto com um mop de pano para vidro encharcado com água, proveniente do esguicho, em toda a superfície do módulo para a remoção da parte mais grosseira da sujeira acumulada;
- 8) Molhar uma segunda vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o cabo com junta telescópica, em conjunto com fibra abrasiva de limpeza leve especial para vidros, em uma limpeza mais fina do módulo;
- 9) Molhar uma terceira vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;
- 10) Deixe a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rolos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo;
- 11) Repetir o procedimento em outros módulos;
- 12) Ao término da limpeza, ligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando que o sistema volte a operar

normalmente e guarde todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

O segundo procedimento de limpeza resultou no consumo de cerca de 2,160 litros de água por módulo com dimensões de 0,99m x 1,65m cada e 30 meses de sujidade acumulada, tendo então uma redução no consumo de aproximadamente 13,6% e apresentando uma limpeza mais rápida e mais confortável ao trabalhador. Certamente a diminuição do consumo de água é facilitada ao passo em que a prática da atividade é melhorada pelo trabalhador e uma menor concentração de sujeita é existente.

Em situações em que a sujidade existente é pouca, no caso em períodos entre 1 e 9 meses a limpeza pode ser somente utilizando os cabos de junta telescópica e fibras abrasivas de limpeza leve, seguindo o terceiro procedimento a seguir:

- 1) Inicie o procedimento preferencialmente ao final da tarde, em momentos com chuva leve ou pós-chuva, onde a produtividade do sistema é menor e as temperaturas dos módulos não são elevadas, evitando evaporação precoce da água na superfície dos módulos;
- 2) Desligue a chave elétrica e/ou geral relacionada ao módulo na *string-box*, possibilitando evitar problemas com os diodos e possível danificação dos circuitos existentes, uma vez que estará trabalhando com água;
- 3) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com o consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 4) Uso somente de água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de *hotspots* e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 5) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 6) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 7) Molhar uma vez a superfície do módulo sujo com o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o cabo com junta telescópica, em conjunto com fibras abrasivas de limpeza leve para vidro encharcado com água,

proveniente do esguicho, em toda a superfície do módulo para a remoção da parte mais grosseira da sujeira acumulada;

- 8) Molhar uma segunda vez a superfícies do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;
- 9) Deixe a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo;
- 10) Repetir o procedimento em outros módulos;
- 11) Ao término da limpeza, ligue a chave elétrica e/ou geral relacionada aos módulos na *string-box*, possibilitando que o sistema volte a operar normalmente e guarde todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

O terceiro procedimento de limpeza utiliza em média cerca de 0,500 litro de água por módulo com dimensões de 0,99m x 1,65m cada, para períodos entre 1 a 9 meses de sujeira acumulada, tendo então uma redução no consumo de água de aproximadamente 80,0%, quando comparado ao primeiro procedimento com módulos sujos a mais de 30 meses. Certamente para se reduzir o custo de água proveniente de empresas como a SABESB, um reservatório de com armazenamento de água da chuva se faz bastante atrativo.

5.2 Custos associados ao estudo de sujeira

Os custos desse estudo tiveram foco em consumo de água e homem hora trabalhada por kW, tendo a referência de custos oriunda de empresas que prestam serviços de limpeza e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESB, fornecedora de água para o estado de São Paulo. Não obstante os custos vinculados a este estudo serão contabilizados a partir do tempo inicial do dia 21 de dezembro de 2016.

O presente estudo consultou 10 empresas de serviços de limpeza, informando as características do subsistema CTPV e suas restrições, como painéis fotovoltaicos próximos ao solo, não exigindo execução de trabalho em altura; necessidade de uso somente de água para a limpeza, rejeitando o uso de qualquer produto químico. Sendo

assim, os custos levantados variaram numa faixa de R\$ 7,00/m² a R\$ 13,00/m², permitindo então adotar um valor médio de R\$ 10,00/m² para este estudo de sujidade.

Segundo a SABESB, a estrutura tarifária da empresa constitui-se de um conjunto de tarifas e regras aplicadas ao faturamento da Companhia em que os usuários são classificados nas categorias divididas em residencial, comercial, industrial e pública. Para as categorias mencionadas existem tabelas com os valores de consumo estabelecidos, variando entre: de até 10 m³, de 11 a 20 m³, de 21 a 50 m³ e acima de 50 m³. Vale ressaltar as tarifas residencial social e residencial favelas possuem 5 faixas de consumo, sendo: até 10 m³, de 11 a 20 m³, de 21 a 30 m³, 31 a 50 m³ e acima de 50 m³. Não obstante para os grandes consumidores e para os municípios em que a Sabesp fornece água ao atacado e disponibiliza tratamento dos esgotos por eles coletados, também há tabelas tarifárias próprias (SABESP, 2017).

A Companhia pode também cobrar o consumidor em relação a um consumo mínimo de água, sendo a prática apoiada pelo regulamento aprovado por meio do Decreto Estadual 41.446/1996, na legislação e normas regulatórias vigentes (SABESP, 2017).

Sendo assim, para o estudo de sujidade me questão foi adotado o valor para categoria residencial está vinculado o valor tabelado apresentado pela SABESP, segundo o comunicado 03/2016 de tabelas tarifárias com vigência a partir de 12/05/2016 para a região metropolitana de São Paulo, interior e litoral. O comunicado apresenta códigos para diferentes unidades de negócio, sendo eles:

- 1) RA - Unidade de Negócio Alto Paranapanema: Alvinlândia, Barão de Antonina, Bernardino de Campos, Bom Sucesso de Itararé, Buri, Campina do Monte Alegre, Coronel Macedo, Duartina, Fartura, Fernão, Guapiara, Guareí, Iaras, Itaberá, Itai, Itaporanga, Lucianópolis, Nova Campina, Óleo, Paranapanema, Paulistânia, Pilar do Sul, Ribeirão Branco, Ribeirão do Sul, Ribeirão Grande, Riversul, Sarapuí, Sarutaiá, Taguaí, Taquarituba, Taquarivaí, Timburi e Ubirajara;
- 2) RB - Unidade de Negócio Baixo Paranapanema: Alfredo Marcondes, Álvares Machado, Álvaro de Carvalho, Anhumas, Arco Íris, Bastos, Borá, Caiabu, Cruzália, Echaporã, Emilianópolis, Estrela do Norte, Euclides da Cunha Paulista, Flora Rica, Flórida Paulista, Florínea, Gabriel Monteiro, Iacri, Inúbia Paulista, Luiziana, Lutécia, Maracaí, Mariápolis, Mirante do Paranapanema, Narandiba, Oriente, Piacatu,

Piquerobi, Pirapozinho, Platina, Pracinha, Presidente Bernardes, Quatá, Queiróz, Quintana, Regente Feijó, Ribeirão dos Índios, Sagres, Salmourão, Sandovalina, Santa Mercedes, Santo Anastácio, Santo Expedito, Santópolis do Aguapeí, Tarabaí e Teodoro Sampaio;

- 3) RG - Unidade de Negócio Pardo e Grande: Águas da Prata, Altair, Buritizal, Cajuru, Cássia dos Coqueiros, Colômbia, Divinolândia, Guariba, Icém, Itobi, Jeriquara, Pedregulho, Ribeirão Corrente, Rifaina, Santa Cruz da Esperança, Santa Rosa do Viterbo, Santo Antonio do Jardim e Serra Azul;
- 4) RJ - Unidade de Negócio Capivari/Jundiaí: Jarinú, Mombuca e Morungaba;
- 5) RM - Unidade de Negócio Médio Tietê: Anhembi, Araçariguama, Arealva, Areiópolis, Bocaina, Boracéia, Capela do Alto, Cesário Lange, Charqueada, Itatinga, Pardinho, Porangaba, Pratânia, Quadra, Santa Maria da Serra, Torre de Pedra e Torrinha;
- 6) RR - Unidade de Negócio Vale do Ribeira: Barra do Turvo, Cananéia, Eldorado, Iporanga, Itaóca, Itapirapuã Paulista, Itariri, Juquiá, Miracatu, Pariquera-Açu, Pedro de Toledo, Ribeira, Sete Barras e Tapiraí;
- 7) RT - Unidade de Negócio Baixo Tietê e Grande: Adolfo, Alto Alegre, Aparecida d'Oeste, Aspásia, Auriflama, Avaí, Balbinos, Brejo Alegre, Cardoso, Catiguá, Coroados, Dirce Reis, Dolcinópolis, Estrela d'Oeste, Fernando Prestes, Floreal, Gastão Vidigal, General Salgado, Glicério, Guarani d'Oeste, Guzolândia, Indiaporã, Irapuã, Lourdes, Macedônia, Marinópolis, Meridiano, Mesópolis, Mira Estrela, Monte Aprazível, Nhandeara, Nipoã, Nova Canaã Paulista, Nova Granada, Nova Luzitânia, Onda Verde, Ouroeste, Palmares Paulista, Palmeira d'Oeste, Paranapuã, Paulo de Faria, Pedranópolis, Planalto, Poloni, Pongaí, Pontalinda, Pontes Gestal, Populina, Presidente Alves, Riolândia, Rubiácea, Rubinéia, Santa Albertina, Santa Clara d'Oeste, Santa Salete, Santana da Ponte Pensa, São Francisco, São João das Duas Pontes, Sebastianópolis do Sul, Sud Menucci, Três Fronteiras, Turiúba, Turmalina, União Paulista, Urânia, Uru, Valentim Gentil, Vitória Brasil e Zacarias;

- 8) RV - Unidade de Negócio Vale do Paraíba: Bananal, Igaratá, Jambeiro, Lagoinha, Monteiro Lobato, Redenção da Serra, Santo Antonio do Pinhal, São Bento do Sapucaí e Silveiras;
- 9) RS - Unidade de Negócio Baixada Santista: Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos e São Vicente;
- 10) RN - Unidade de Negócio Litoral Norte: Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba;
- 11) RR - Unidade de Negócio Vale do Ribeira: Apiaí, Barra do Chapéu, Barra do Turvo, Cajati, Cananéia, Eldorado, Iguape, Ilha Comprida, Iporanga, Itaóca, Itapirapuã Paulista, Itariri, Jacupiranga, Juquiá, Juquitiba, Miracatu, Pariquera-Açu, Pedro de Toledo, Registro, Ribeira, São Lourenço da Serra, Sete Barras e Tapiraí;
- 12) MC - Unidade de Negócio Centro: São Paulo;
- 13) MN - Unidade de Negócio Norte: São Paulo, Bragança Paulista, Caieiras, Cajamar, Francisco Morato, Franco da Rocha, Joanópolis, Mairiporã, Nazaré Paulista, Pedra Bela, Pinhalzinho, Piracaia, Socorro e Vargem;
- 14) MS - Unidade de Negócio Sul: São Paulo, Diadema, Embu das Artes, Embu-Guaçu, Itapeverica da Serra, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra e São Bernardo do Campo;
- 15) ML - Unidade de Negócio Leste: São Paulo, Arujá, Biritiba Mirim, Ferraz de Vasconcelos, Itaquaquecetuba, Poá, Salesópolis e Suzano;
- 16) MO - Unidade de Negócio Oeste: São Paulo, Barueri, Carapicuíba, Cotia, Itapevi, Jandira, Osasco, Pirapora do Bom Jesus, Santana de Parnaíba, Taboão da Serra e Vargem Grande Paulista.

A central foi instalada na zona oeste de São Paulo, se enquadrando na unidade de negócio MO da SBAESP. A Tabela 6.2.1 apresenta dados de tarifas de consumo de água para diferentes categorias da unidade de negócio MO da SABESP. O estudo em questão irá considerar as atividades de limpeza na usina fotovoltaica do IEE como sendo de categoria residencial/normal e os custos associados ao estudo de sujidade se dará a partir do dia 21 de dezembro de 2016, considerado como tempo zero de estudo.

Tabela 5.1 - Tarifas de água para a unidade de negócio MO da SABESP. Fonte: SABESP, 2017.

Classes de consumo m ³ /mês		Tarifas de água R\$	Tarifas de esgoto R\$
Residencial / Social (i)	0 a 10	7,59 /mês	7,59 /mês
	11 a 20	1,31 /m ³	1,31 /m ³
	21 a 30	4,64 /m ³	4,64 /m ³
	31 a 50	6,62 /m ³	6,62 /m ³
	acima de 50	7,31 /m ³	7,31 /m ³
Residencial / Favelas	0 a 10	5,79 /mês	5,79 /mês
	11 a 20	0,66 /m ³	0,66 /m ³
	21 a 30	2,19 /m ³	2,19 /m ³
	31 a 50	6,62 /m ³	6,62 /m ³
	acima de 50	7,31 /m ³	7,31 /m ³
Residencial / Normal	0 a 10	22,38 /mês	22,38 /mês
	11 a 20	3,50 /m ³	3,50 /m ³
	21 a 50	8,75 /m ³	8,75 /m ³
	acima de 50	9,64 /m ³	9,64 /m ³
Comercial / Entidade de Assistência Social (ii)	0 a 10	22,47 /mês	22,47 /mês
	11 a 20	4,37 /m ³	4,37 /m ³
	21 a 50	8,42 /m ³	8,42 /m ³
	acima de 50	8,74 /m ³	8,74 /m ³
Comercial / Normal	0 a 10	44,95 /mês	44,95 /mês
	11 a 20	8,75 /m ³	8,75 /m ³
	21 a 50	16,76 /m ³	16,76 /m ³
	acima de 50	17,46 /m ³	17,46 /m ³
Industrial	0 a 10	44,95 /mês	44,95 /mês
	11 a 20	8,75 /m ³	8,75 /m ³
	21 a 50	16,76 /m ³	16,76 /m ³
	acima de 50	17,46 /m ³	17,46 /m ³
Pública com Contrato (iii)	0 a 10	33,68 /mês	33,68 /mês
	11 a 20	6,55 /m ³	6,55 /m ³
	21 a 50	12,61 /m ³	12,61 /m ³
	acima de 50	13,10 /m ³	13,10 /m ³
Pública sem Contrato	0 a 10	44,95 /mês	44,95 /mês
	11 a 20	8,75 /m ³	8,75 /m ³
	21 a 50	16,76 /m ³	16,76 /m ³
	acima de 50	17,46 /m ³	17,46 /m ³

Anteriormente a data inicial de estudo ocorreram 2 limpezas em 7 meses destinadas ao estudo de sujidade, em meses diferentes, e obtendo um consumo de água de 2,160 L por módulo de 0,99m x 1,65m em um tempo de 10 horas. Desse modo,

podemos dizer que as 7 mesas, compostas por 60 módulos cada, representam uma área de 686,07 m² ocupada por 420 módulos fotovoltaicos e vinculada a um consumo de 1.814,40 litros ou 1,81 m³ de água proveniente das duas limpezas realizadas em meses diferentes. Sendo assim se enquadrando na categoria de 0 a 10 m³ e gerando um custo de 22,38 R\$/mês em dois meses o que resulta em um custo de água de R\$ 44,76 e de trabalho de R\$ 13.721,40 de mão-de-obra para limpeza de uma área de 1372,14 m², relacionadas às duas limpezas anteriores ao início do estudo, no dia 21 de dezembro de 2016.

No primeiro mês de análise do estudo ocorreu a limpeza da mesa 7, gerando um consumo de água de 29,4 L ou 0,0294 m³ na limpeza de 60 módulos FV, tendo um custo de água de R\$ 22,38 e R\$ 980,10 para mão-de-obra de trabalho.

A Tabela 4.2 mostra resumidamente as informações relacionadas ao custos de consumo de água e mão de obra para a limpeza dos módulos fotovoltaicos. **fazer a referência por kWh em custos!!!?**

Tabela 5.2 - Dados de custos para consumo de água e mão-de-obra, referentes ao estudo de sujidade.
Fonte: Autor, 2017.

Mês	Consumo de Água (L)	Custo de Água - Residencial/Normal * (R\$)	Área de Limpeza (m²)	Custo de Mão-de-obra (R\$ 10,00/m²)
1	29,40	22,38	98,01	980,10
2		22,38	98,01	980,10
3		22,38	196,02	1960,20
4		22,38	98,01	980,10
5		22,38	98,01	980,10
6		22,38	294,03	2940,30
7		22,38	98,01	980,10
8		22,38	98,01	980,10
9		22,38	294,03	2940,30
10		22,38	98,01	980,10
11		22,38	98,01	980,10
12		22,38	392,04	3920,40
13		22,38	98,01	980,10
14		22,38	98,01	980,10
15		22,38	294,03	2940,30
16		22,38	98,01	980,10
17		22,38	98,01	980,10
18		22,38	490,05	4900,50
Soma	29,40	402,84	3.136,32	31.363,20
Total (R\$)				31.766,04

* Devido ao consumo de água ser baixo a SABESB efetua a cobrança por meio de um custo fixo de R\$ 22,38 para um consumo menor do que 10 m³ por mês.

6 CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta conclusões adquiridas em relação ao estudo de análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade, bem como recomendações para projetos futuros na área.

6.1 Conclusões

O

6.2 Recomendações

Em

7 BIBLIOGRAFIA

ABNT. NBR 10899:2013. **Energia solar fotovoltaica: terminologia**, 2013.

Al-hanai, T.; Hashim, R. B.; El-CHAAR, L.; LAMONT, L.A. **Environmental Effects on a Grid Connected 900 W Photovoltaic Thin-Film Amorphous Silicon SSystem**. *Renewable Energy*. 36, p. 2615-2622. 2011.

ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; RIBEIRO, C.; DEORIO, A. **Projeto "Desenvolvimento de competências e avaliação de arranjos técnicos e comerciais em geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede"**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte. Brasil. Abril 2016.

ANEEL. **Outorgas e registros de geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

ANEEL. **BIG – Banco de informações de geração**. Capacidade de geração do Brasil. Brasília: ANEEL, 2015.

ANEEL. **Resolução normativa n. 482**. Brasília: ANEEL, 2012.

ANEEL. **Resolução normativa n. 687**. Brasília: ANEEL, 2015.

BERGHOLD, J.; KOCH, S.; BOTTCHEER, A.; UKAR, A.; LEERS, M.; GRUNOW, P. **Potential-induced degradation (PID) and its correlation with experience in the field**. *Photovoltaics International*. 19th edition. 85-92. 2013.

BONITO, T. C. M. **Optimização do investimento em sistemas fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Coimbra. 2011.

BUEHOP, C.; SCHLEGEL, D.; NIESS, M.; VODERMAYER, C.; WEISSMANN, R.; BRABEC, C. J. **Reliability of IR-imaging of PV-plants under operating conditions**. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 107, 154-164. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.07.011. 2012.

COBB, K. **PV Reliability, Operations & Maintenance Workshop: SunPower Oasis Robotic Panel Cleaning System**. EPRI-Sandia PV Systems Symposium, 19 May. 2014.

COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L. L. **Dust soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 63, pp. 33-61. 2016.

DARWISH, Z. A.; KAZEM, H. A.; SOPIAN K.; AL-GOUL, M.; ALAWADHI, H. **Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 41, pp. 735-44. 2015.

ELMINIR, H. K.; GHITAS, A. E.; HAMID, R. H.; EL-HUSSAINY, F.; BEHEARY, M. M.; ABDEL-MONEIM, K. M. **Effect of dust on the transparent cover of solar collectors**. Energy Conversion and Management, v.47, pp. 3192–3203. 2006.

EPE. **Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral**. Leilão de Energia de Reserva de 2014. Empresa de Pesquisa Energética. 21 de novembro de 2014.

EPE. **Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral**. 1º Leilão de Energia de Reserva de 2015. Empresa de Pesquisa Energética. 24 de setembro de 2015.

FARKAS, K.; FRONTINI, F.; MATURI, L. **Solar Energy Systems in Architecture - Integration Criteria and Guidelines**. 2012.

GARCIA, A. 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 90(3), 329-340. 2003.

GOOGLE. **Google Earth software**. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 21 de novembro de 2016.

GUEYMARD, C. A. **SMARTS22, Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment**. Report FSEC-PF-270-95, Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL. 1995.

HAAG, R.; KRENZINGER, A. **Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar**. Laboratório de Energia Solar. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

HABERLIN, H.; GRAF, J. D. **Gradual Reduction of PV Generator Yield due to Pollution**. Proceedings of the 2nd World Congress on Photovoltaic Energy Conversion. Vienna, Austria, 1998.

HAMMON, R.; SRINIVASAN, D.; HARRIS, A.; WHITFIELD, K.; WOHLGEMUTH, J. **Effects of soiling on PV module and radiometer performance**. In: Proc. IEEE 26th Photovoltaic Specialists Conference, 29 September–03 October, Anaheim, USA, pp. 1121–1124. 1997.

HICKEL, B. M.; DESCHAMPS, E. M.; NASCIMENTO, L. R.; SIMÕES, G. C.; RUTHER, R. **Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos FV: Revisão e Medições de Campo**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte. Minas Gerais. Brasil. Abril 2016.

HT-INSTRUMENTS. **Instrumento multifuncional para verificação e monitoramento de instalações fotovoltaicas**. Catálogo de produto SOLAR I-Vw. HT Instruments. 2016.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=355030>>. Acesso em: 13 de janeiro de 2017.

INMET. **Estações automáticas INMET, São Paulo (Mir. De Santana)**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em 21 de janeiro de 2017.

INMET. **Consulta de dados da estação convencional: São Paulo (Mir. De Santana)**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/dspDadosCodigo.php?ODM3ODE=>>>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Insolação total (horas), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Insolacao-Total_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Número de dias com precipitação maior ou igual a 1 mm (dias), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Numero-Dias-Precipitacao-Maior-ou-Igual-1mm_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Precipitação acumulada mensal (mm), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Precipitacao-Acumulada_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Temperatura máxima (°C), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Temperatura-Maxima_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Temperatura média compensada (°C), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Temperatura-Media-Compensada_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Temperatura mínima (°C), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Temperatura-Minima_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

INMET. **Umidade relativa do ar média compensada (%), normais climatológicas históricas de 1961 a 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/planilhas/Umidade-Relativa-Mensal-Media-Compensada_NCB_1961-1990.xls>. Acesso em 15 de agosto de 2016.

JIANG, H.; LU, L.; SUN, K. **Experimental Investigation of the Impact of Airborne Dust Deposition on the Performance of Solar Photovoltaic (PV) Modules**. Atmospheric Environment. 45, p. 4299-4304. 2011.

KALDELLIS, J. K.; FRAGOS, P. **Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators**. Journal of Cleaner Production, v. 19, pp. 311-317. 2011.

KIMBER, A. **The Effect of Soiling on Photovoltaic Systems (sic) Located in Arid Climates**. Berkeley, California, USA, 2006.

KIMBER, A.; MITCHELL, A.; NOGRADI, S.; WENGER, H. **Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**. Waikoloa, Hawaii, USA; May 7-12, 2006.

KING, R.; LAW, D.; EDMONDSON, K. **Metamorphic and Lattice-Matched Solar Cells under Concentration, IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**. Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, HI, USA. May 2006.

LEAL, T. F. M.; FONTENELE, A. P. G.; PEDROTTI, J. J.; FORNARO, A. **Composição iônica majoritária de águas de chuva no centro da cidade de São Paulo**. Departamento de Ciências Atmosféricas. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 27 de julho de 2004.

LEITE, D. S. **Degradação Induzida pelo potencial (PID) em módulos Fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 28 de Fevereiro. 2012.

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 22(6), 666-670. 2014.

MAGHAMI, M. R.; HIZAM, H.; GOMES, C.; RADZI, M. A.; REZADAD, M. I.; HAJIGHORBANI, S. **Power loss due to soiling on solar panel: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 59 pp. 1307-1316, 30 Jan. 2016.

MANI, M.; PILLAIM, R. **Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 pp. 3124–3131. 2010.

MASSI, P. A.; MELLIT, A.; PIERI, D. **The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants**. Solar Energy. 85, p. 1128-1136. 2011.

MEYER-BURGER. **Simulador de módulos fotovoltaicos Hight^{LIGHT} LMT/VLMT**. Catálogo de produto. Meyer Burger Global AG. Fev. 2015.

MILLER, J. T. A.; JACKSON, J. **Impact of Soiling and Pollution on PV Generation Performance**. Technical Memorandum. Sandia National Laboratory. CH2M HILL. 8 Oct. 2009.

MOLENBROEK, E.; WADDINGTON, D. W.; EMERY, K. A. **Hot spot susceptibility and testing of PV modules**. In Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty Second IEEE, 547-552. 1991.

MORETÓN, R.; LORENZO, E.; NARVATE, L. **Experimental observations on hot-spots and derived acceptance/rejection criteria**. Scientific Journal. Solar Energy. Elsevier. 2015

NDIAYE, A.; CHARKI, A.; KOBI, A.; KÉBÉ, C.; NDIAYE, P.; SAMBOU, V. **Degradation of silicon photovoltaic modules: A literature review**. Solar Energy. 96 140-151. 2013.

NREL. **NREL demonstrates 45.7% efficiency for concentrator solar cell**. 2014. Disponível em: <<http://phys.org/news/2014-12-nrel-efficiency-solar-cell.html>>. Acesso em 21 de novembro de 2016.

PARK, N. C.; JOENG, J. S.; KANG, B. J.; KIM, D. H. **The effect of encapsulant discoloration and delamination on the electrical characteristics of photovoltaic module**. Microelectronics Reliability. 53 1818-1822. 2013.

PORTALSOLAR. **Fabricação do Painel Solar - Passo a Passo**. 2017. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 04 de abril de 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL – CRESESB, edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro. Março de 2014.

RYAN, C.P.; VIGNOLA, F.; McDANIELS, D.K. **Solar cell arrays: degradation due to dirt**. Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc., 1989, pp. 234–237.

SABESP. **Tarifas da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo**. SABESP. 2017. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=183>>. Acesso em 03 de fevereiro de 2017.

SAMPLE, T.; GARCIA, J. L.; POZZA, A. **Long-term soiling in a moderate subtropical climate**. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Renewables and Energy Efficiency Unit. Italy. 2016.

SHARMA, S.; JAIN, K. K.; SHARMA, A. **Solar Cells: In Research and Applications - A Review**. Materials Science and Engineering. University of Seoul. South Korea, 2015.

SHIRAKAWA, M. A.; JOHN, V. M.; SANTOS, R.; MOCELIN, A.; ZILLES, R. **Avaliação da influência de biofilmes (fungos e fototróficos) na eficiência energética de módulos fotovoltaicos**. IN: IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino Americana de ISES. São Paulo. 2012.

SHIRAKAWA, M. A.; ZILLES, R.; MOCELIN, A.; GAYLARDE, C. C.; GORBUSHINA, A.; HEIDRICH, G.; GIUDICE M. C.; NEGRO, G. M. B. D.; JHON V. M. **Microbial colonization affects the efficiency of photovoltaic panels in a tropical environment**. Journal of Environment Management. v. 157, p. 160-167. 2015.

SISSAKIAN, V. K.; AL-ANSARI, N.; KNUTSSON, S. **Sand and dust storm events in Iraq**. Natural Science. Vol.5 no 10. 7 Oct. 2013.

SOLARGIS. **iMaps software, global overview on DNI map**. Disponível em: <<http://solargis.com/products/imaps/overview/>>. Acesso em: 21 de novembro de 2016.

THANGARAJ, S.; VELURY, M. **Soiling Losses for Different Solar PV technologies in a Rooftop of a Metropolitan City**. International Journal for Scientific Research & Development. Vol.4. Jan 2016.

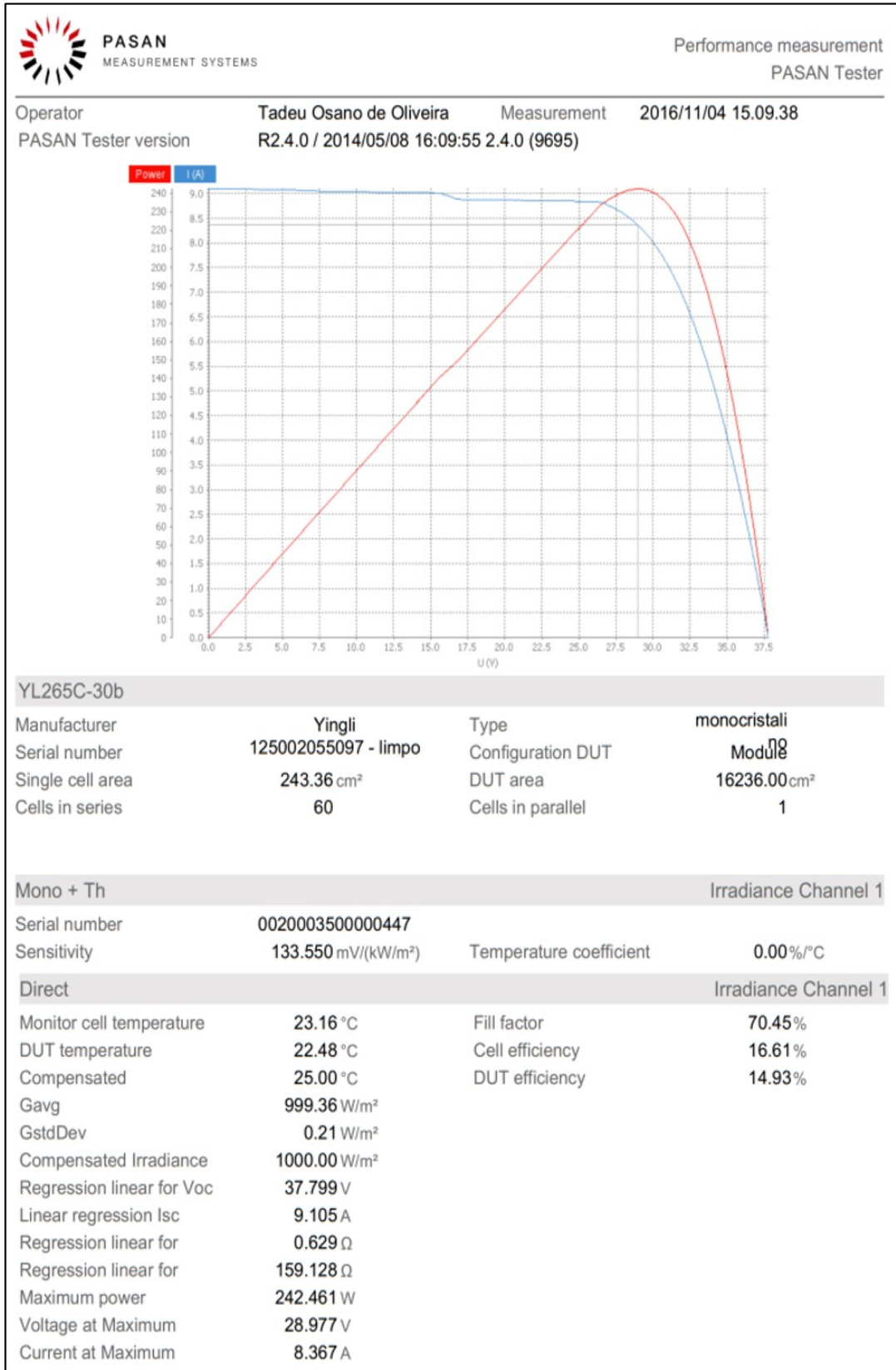
VAN, D. E. E.; CHAMEL, J. B.; GXASHEKA, A. R. **Investigation od delamination in an edge-defined film-fed growth photovoltaic module**. Solar Energy Materials & Solar Cells. 88 403-411. 2005.

VASKO, A. C.; VIJH, A.; KARPOV, V. G. **Hot spots spontaneously emerging in thin film photovoltaics**. Solar Energy. 108, 264-273. 2014.

WEG. **Soluções para Automação de Sistemas**. Grupo WEG, Unidade Automação. Jaraguá do Sul. Santa Catarina. Brasil. Revisão 3. Novembro 2016.

YINGLI. **Catálogo de produto PANDA 60 cell 40mm series**. Yingli Green Energy Holding Co. Revisão 2. Março 2013.

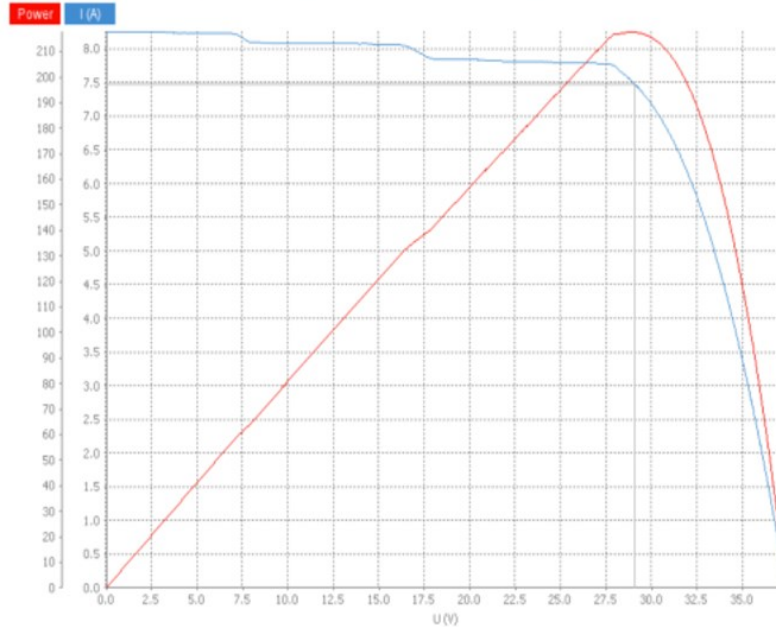
8 ANEXOS



Resultados do Simulador High^{LIGHT} da PASAN, para o módulo Yingli Panda 260, de número de série 125002055097, em condição limpo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.



Operator **Tadeu Osano de Oliveira** Measurement **2016/11/04 14.46.02**
PASAN Tester version **R2.4.0 / 2014/05/08 16:09:55 2.4.0 (9695)**



YL265C-30b

Manufacturer	Yingli	Type	monocristali
Serial number	125002055097 - sujo	Configuration DUT	Module
Single cell area	243.36 cm²	DUT area	16236.00 cm²
Cells in series	60	Cells in parallel	1

Mono + Th Irradiance Channel 1

Serial number	0020003500000447		
Sensitivity	133.550 mV/(kW/m²)	Temperature coefficient	0.00 %/°C

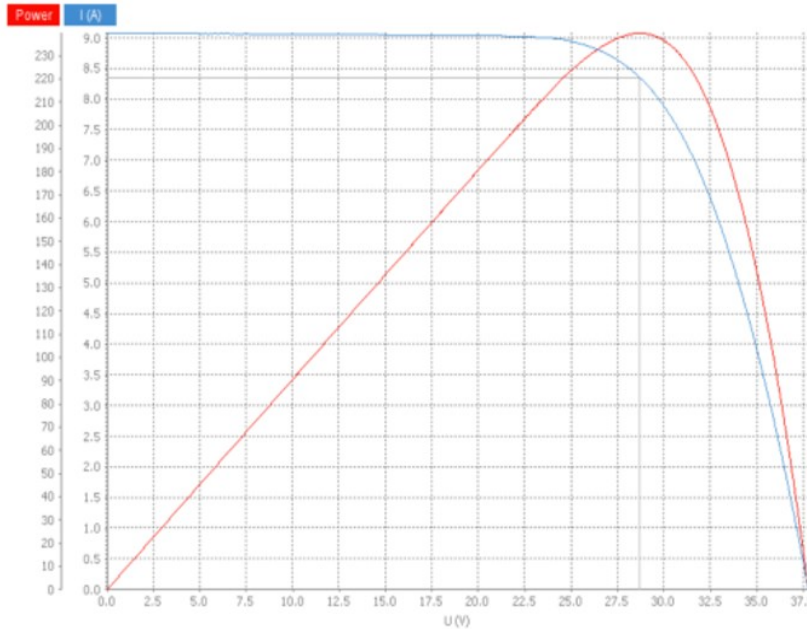
Direct Irradiance Channel 1

Monitor cell temperature	23.25 °C	Fill factor	70.05 %
DUT temperature	24.09 °C	Cell efficiency	14.89 %
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	13.40 %
Gavg	999.37 W/m²		
GstdDev	0.22 W/m²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m²		
Regression linear for Voc	37.425 V		
Linear regression Isc	8.296 A		
Regression linear for	0.670 Ω		
Regression linear for	56.672 Ω		
Maximum power	217.486 W		
Voltage at Maximum	29.078 V		
Current at Maximum	7.479 A		

Resultados do Simulador High^{LIGHT} da PASAN, para o módulo Yingli Panda 260, de número de série 125002055097, em condição sujo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.



Operator **Tadeu Osano de Oliveira** Measurement **2016/11/04 14.57.47**
PASAN Tester version **R2.4.0 / 2014/05/08 16:09:55 2.4.0 (9695)**



YL265C-30b

Manufacturer	Yingli	Type	monocristali
Serial number	125002055253 - limpo	Configuration DUT	Module
Single cell area	243.36 cm²	DUT area	16236.00 cm²
Cells in series	60	Cells in parallel	1

Mono + Th

Irradiance Channel 1

Serial number	0020003500000447		
Sensitivity	133.550 mV/(kW/m²)	Temperature coefficient	0.00%/°C

Direct

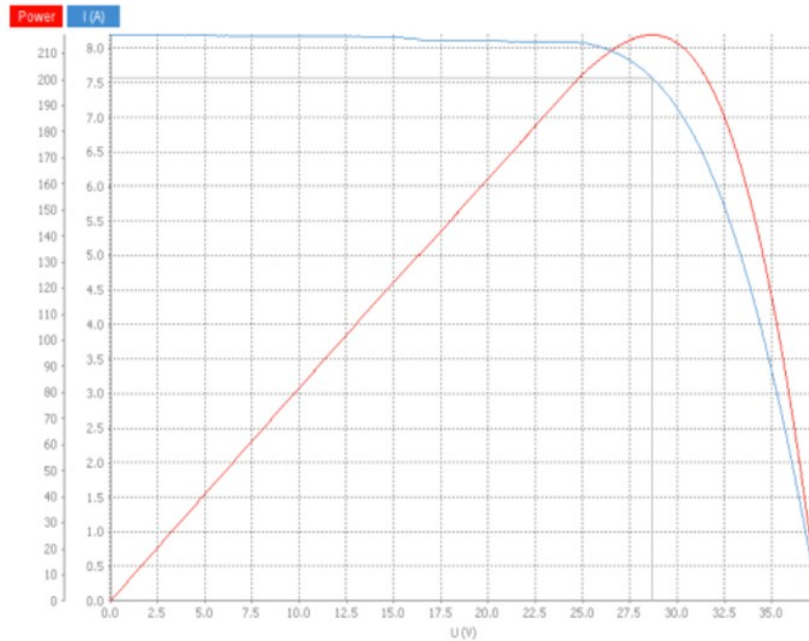
Irradiance Channel 1

Monitor cell temperature	22.98 °C	Fill factor	69.88%
DUT temperature	22.48 °C	Cell efficiency	16.41%
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	14.76%
Gavg	999.11 W/m²		
GstdDev	0.22 W/m²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m²		
Regression linear for Voc	37.785 V		
Linear regression Isc	9.076 A		
Regression linear for	0.654 Ω		
Regression linear for	743.296 Ω		
Maximum power	239.642 W		
Voltage at Maximum	28.681 V		
Current at Maximum	8.355 A		

Resultados do Simulador High^{LIGHT} da PASAN, para o módulo Yingli Panda 260, de número de série 125002055253, em condição limpo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.



Operator **Tadeu Osano de Oliveira** Measurement **2016/11/04 14.40.23**
PASAN Tester version **R2.4.0 / 2014/05/08 16:09:55 2.4.0 (9695)**



YL265C-30b

Manufacturer	Yingli	Type	monocristali
Serial number	125002055253 - sujo	Configuration DUT	Module
Single cell area	243.36 cm²	DUT area	16236.00 cm²
Cells in series	60	Cells in parallel	1

Mono + Th

Irradiance Channel 1

Serial number	0020003500000447		
Sensitivity	133.550 mV/(kW/m²)	Temperature coefficient	0.00 %/°C

Direct

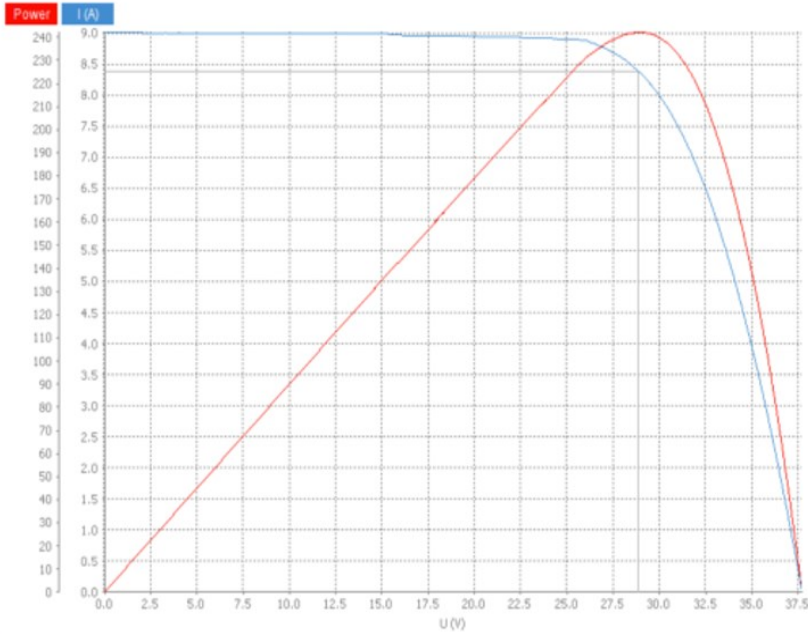
Irradiance Channel 1

Monitor cell temperature	23.16 °C	Fill factor	70.71 %
DUT temperature	23.73 °C	Cell efficiency	14.87 %
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	13.38 %
Gavg	999.79 W/m²		
GstdDev	0.20 W/m²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m²		
Regression linear for Voc	37.471 V		
Linear regression Isc	8.197 A		
Regression linear for	0.695 Ω		
Regression linear for	583.594 Ω		
Maximum power	217.177 W		
Voltage at Maximum	28.648 V		
Current at Maximum	7.581 A		

Resultados do Simulador High^{LIGHT} da PASAN, para o módulo Yingli Panda 260, de número de série 125002055253, em condição sujo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.



Operator **Tadeu Osano de Oliveira** Measurement **2016/11/04 15.04.17**
 PASAN Tester version **R2.4.0 / 2014/05/08 16:09:55 2.4.0 (9695)**



YL265C-30b

Manufacturer	Yingli	Type	monocristali
Serial number	125002055255 - limpo	Configuration DUT	Module
Single cell area	243.36 cm²	DUT area	16236.00 cm²
Cells in series	60	Cells in parallel	1

Mono + Th Irradiance Channel 1

Serial number	0020003500000447		
Sensitivity	133.550 mV/(kW/m²)	Temperature coefficient	0.00%/°C

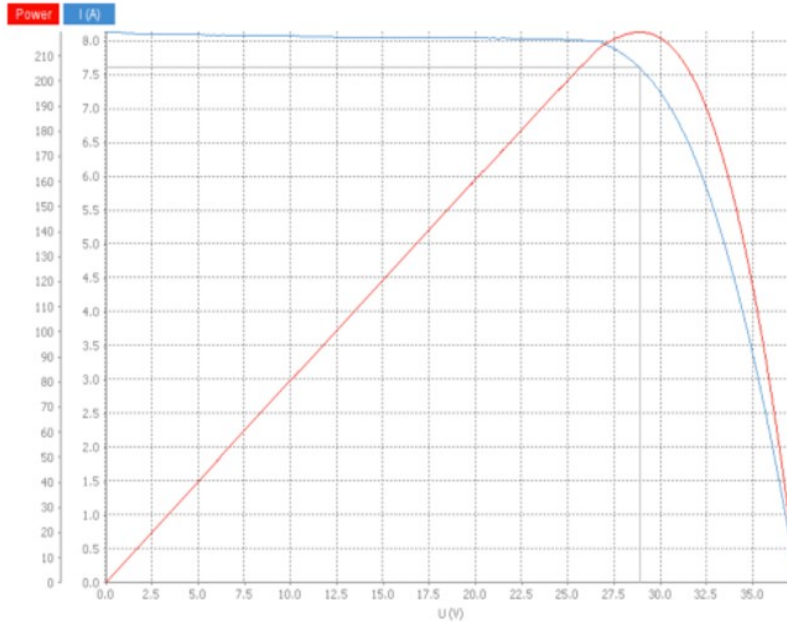
Direct Irradiance Channel 1

Monitor cell temperature	22.98 °C	Fill factor	71.27%
DUT temperature	22.04 °C	Cell efficiency	16.59%
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	14.92%
Gavg	999.33 W/m²		
GstdDev	0.20 W/m²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m²		
Regression linear for Voc	37.719 V		
Linear regression Isc	9.010 A		
Regression linear for	0.636 Ω		
Regression linear for	951.604 Ω		
Maximum power	242.200 W		
Voltage at Maximum	28.874 V		
Current at Maximum	8.388 A		

Resultados do Simulador High^{LIGHT} da PASAN, para o módulo Yingli Panda 260, de número de série 125002055255, em condição limpo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.



Operator **Tadeu Osano de Oliveira** Measurement **2016/11/04 14.43.53**
PASAN Tester version **R2.4.0 / 2014/05/08 16:09:55 2.4.0 (9695)**



YL265C-30b

Manufacturer	Yingli	Type	monocristali
Serial number	125002055255 - sujo	Configuration DUT	Module
Single cell area	243.36 cm²	DUT area	16236.00 cm²
Cells in series	60	Cells in parallel	1

Mono + Th Irradiance Channel 1

Serial number	0020003500000447	Temperature coefficient	0.00%/°C
Sensitivity	133.550 mV/(kW/m²)		

Direct Irradiance Channel 1

Monitor cell temperature	23.25 °C	Fill factor	72.32%
DUT temperature	23.91 °C	Cell efficiency	15.04%
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	13.53%
Gavg	999.68 W/m²		
GstdDev	0.18 W/m²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m²		
Regression linear for Voc	37.416 V		
Linear regression Isc	8.117 A		
Regression linear for	0.674 Ω		
Regression linear for	220.519 Ω		
Maximum power	219.651 W		
Voltage at Maximum	28.870 V		
Current at Maximum	7.608 A		

Resultados do Simulador High^{LIGHT} da PASAN, para o módulo Yingli Panda 260, de número de série 125002055255, em condição sujo. Fonte: Acervo do Autor, 2016.



10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

10.1. CARACTERÍSTICAS CONEXIÓN INSTACIONES FV (SÓLO SOLAR I-VW)

Incertidumbre calculada como [%lectura+(número dgt)*resolución] a 23°C ± 5°C, <80%HR

Tensión CC

Campo [V]	Resolución [V]	Incertidumbre
15.0 ÷ 999.9	0.1	±(0.5%lectura + 2dig.)

Tensión CA TRMS

Campo [V]	Resolución [V]	Incertidumbre
50.0 ÷ 265.0	0.1	±(0.5%lectura + 2dig.)

Max factor de cresta: 1,5

Corriente CC (a través de transductor de pinza externo)

Campo [mV]	Resolución [mV]	Incertidumbre
-1100 ÷ -5 5 ÷ 1100	0.1	±(0.5%lectura + 0.6mV)

El valor de la corriente es visualizado SIEMPRE con signo positivo : El valor de corriente traducido en tensión inferior a 5mV es cero

Corriente CA TRMS (a través de transductor a pinza externo)

Campo [mV]	Resolución [mV]	Frecuencia [Hz]	Incertidumbre
1 ÷ 1200	0.1	47.5 ÷ 63.0	±(0.5%lectura + 0.6mV)

Max factor de cresta: 2.0 ; El valor de corriente traducido en tensión inferior a 5mV es cero

FE pinzas CC y CA [A]	Resolución [A]	Valor mínimo leído [A]	
		CC	CA
1 < FE ≤ 10	0.001	0.05	0.01
10 < FE ≤ 100	0.01	0.5	0.1
100 < FE ≤ 1000	0.1	5A	1

Potencia CC (Vmed > 150V)

FE pinza [A]	Campo [W]	Resolución [W]	Incertidumbre
1 < FE ≤ 10	0.000k ÷ 9.999k	0.001k	±(0.7%lectura + 3dig.) (Imed <10%FE)
	10.00k ÷ 99.99k	0.01k	
10 < FE ≤ 100	0.000k ÷ 9.999k	0.001k	±(0.7%lectura) (Imed ≥10%FE)
	10.00k ÷ 99.99k	0.01k	
100 < FE ≤ 1000	0.00k ÷ 99.99k	0.01k	
	100.0k ÷ 999.9k	0.1k	

Vmed = Tensión la cual a medido la Potencia ; Imed = corriente In medida

Potencia ACC (Vmed > 200V, PF=1)

FE pinza [A]	Campo [W]	Resolución [W]	Incertidumbre
1 < FE ≤ 10	0.000k ÷ 9.999k	0.001k	±(0.7%lectura + 3dig.) (Imed <10%FE)
	10.00k ÷ 99.99k	0.01k	
10 < FE ≤ 100	0.000k ÷ 9.999k	0.001k	±(0.7%lectura) (Imed ≥10%FE)
	10.00k ÷ 99.99k	0.01k	
100 < FE ≤ 1000	0.00k ÷ 99.99k	0.01k	
	100.0k ÷ 999.9k	0.1k	

Vmed = Tensión la cual a medido la Potencia ; Imed = corriente In medida

Frecuencia

Campo [Hz]	Resolución [Hz]	Incertidumbre
47.5 ÷ 63.0	0.1	±(0.2%lectura + 1cifra)

Irradiación (con célula de referencia)

Campo [mV]	Resolución [mV]	Incertidumbre
1.0 ÷ 100.0	0.1	±(1.0%lectura + 5dig.)

Temperatura (con sonda auxiliar)

Campo [°C]	Resolución [°C]	Incertidumbre
-20.0 ÷ 100.0	0.1	±(1.0%lectura + 1°C)

10.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MEDIDA CURVA I-V E IVCK

Tensión VCC I-V @ OPC

Campo [V] (***)	Resolución [V]	Incertidumbre (***)
5.0 ÷ 999.9	0.1	±(1.0%lectura + 2dig.)

(*) La medida de la característica I-V y de Rs parte de VCC > 15V con incertidumbre definida por VCC > 20V

Corriente CC: I-V @ OPC

Campo [A]	Resolución [A]	Incertidumbre
0.10 ÷ 15.00	0.01	±(1.0%lectura + 2dig.)

Potencia CC: I-V @ OPC Vmpp > 30V, Impp > 2A

Campo [W] (*, **)	Resolución [W]	Incertidumbre
50 ÷ 9999	1	±(1.0%lectura + 6dig.)

Vmpp = tensión en el punto de máxima potencia ; Impp = corriente en el punto de máxima potencia

(*) El valor de Potencia max medible debe tener en cuenta también el FF max de aprox. 0.7 → Pmax= 1000V x 15A x 0.7 = 7000W

(**) El instrumento bloquea la prueba y visualiza el mensaje "Inestabilidad Térmica" si durante la medida el instrumento detecta un Tensión > 700V y una corriente tal que $I > 3A$ y $I > -0.038V + 37.24 - 0.5$

(***) Las medidas de la característica I-V y de Rs parten para VCC > 15V con incertidumbre definida para VCC > 20V

Tensión VCC: I-V @ STC(*), IVCK @ OPC e IVCK @ STC(*)

Campo [V]	Resolución [V]	Incertidumbre (*, **)
5.0 ÷ 999.9	0.1	±4.0% lectura + 2cifras)

Corriente IDC: I-V @ STC(*), IVCK @ OPC e IVCK @ STC(*)

Campo [A]	Resolución [A]	Incertidumbre (**)
0.10 ÷ 15.00	0.01	±(4.0% lectura + 2cifras)

Potencia: I-V @ STC, Vmpp > 30V, Impp > 2A

Campo [W]	Resolución [W]	Incertidumbre total (**)
50 ÷ 9999	1	±(5.0%lectura + 1cifra)

Vmpp = tensión en el punto de máxima potencia ; Impp = corriente en el punto de máxima potencia

(*) Las medidas de la característica I-V y de Rs parten para VCC > 15V con incertidumbre definida para VCC > 20V

(**) En las condiciones:

> Irrad. estable $\geq 700W/m^2$, espectro AM 1.5, Incidencia rayos solares respecto a la per $\leq \pm 25^\circ$, Temp. Celas [15..65°C]

> La incertidumbre declarada incluye ya la incertidumbre del transductor de irradiación y relativa al circuito de medida

Irradiación (con célula de referencia)

Campo [mV]	Resolución [mV]	Incertidumbre
1.0 ÷ 100.0	0.1	±(1.0%lectura + 5dig.)

Temperatura (con sonda auxiliar)

Campo [°C]	Resolución [°C]	Incertidumbre
-20.0 ÷ 100.0	0.1	±(1.0%lectura + 1°C)

10.3. NORMAS DE SEGURIDAD

10.3.1. Generalidades

Seguridad instrumento:	IEC/EN61010-1
EMC:	IEC/EN61326-1
Documentación técnica:	IEC/EN61187
Seguridad accesorios de medida:	IEC/EN61010-031
Medidas:	IEC/EN60891(curva I-V) IEC/EN 60904-5 (medida de Temperatura)
Aislamiento:	doble aislamiento
Grado de polución:	2
Categoría de medida:	CAT II 1000V DC, CAT III 300V respecto a tierra Max 1000V entre las entradas P1, P2, C1, C2

10.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Visualizador y memoria

Tipo visualizador:	LCD custom, 128x128 pxl, retroiluminado
Capacidad de memoria:	256kbytes
Datos memorizables:	Max 99 pruebas ; 249 curvas (característica I-V),
Interfaz PC:	óptica/USB y WiFi



Pruebas instalaciones FV (sólo SOLAR I-Vw)

Periodo de integración:	5, 10, 30, 60, 120, 300, 600, 900, 1800, 3600s
Capacidad de memoria SOLAR-02:	aprox. 1.5 horas (@ PI = 5s) Aprox. 8 días (@ PI = 600s)
Distancia max conexionado RF:	1m

Alimentación

Tipo pilas:	6x1.5V alcalina tipo AA LR06
Consumo:	1W
Indicación pilas descargadas:	símbolo mostrado en el visualizador
Duración pilas:	aprox. 120 horas (pruebas FV) 249 pruebas (medidas característica I-V) 999 medidas IV Check
Autoapagado:	después de 5 minutos sin uso

Características mecánicas

Dimensiones:	235 (L) x 165 (an) x 75 (H) mm
Peso (pilas incluidas):	1.2kg

10.5. CONDICIONES AMBIENTALES DE USO

Temperatura de referencia:	23° ± 5°C
Temperatura de uso:	0 + 40°C
Humedad relativa admitida:	<80%HR
Temperatura almacenamiento:	-10 + 60°C
Humedad almacenamiento:	<80%HR
Máx. altitud de uso:	2000m (*)



ATENCIÓN

(*) Prescripción para el uso del instrumento en altitudes entre 2000 y 5000 metros. El instrumento, entre las entradas P1, P2, C1, C2, considerando el uso en categoría de sobretensión CAT I 1000V DC y o bien CAT II 300V respecto a Tierra máx. 1000V entre las entradas. El marcaje y los símbolos utilizados sobre el instrumento deben considerarse válidos sólo con uso del instrumento en altitudes < 2000m

Este instrumento es conforme a los requisitos de la Directiva Europea sobre baja tensión 2006/95/CE (LVD) y de la directiva EMC 2004/108/CE
Este instrumento es conforme a los requisitos de la Directiva Europea 2011/65/EU (RoHS) y de la directiva 2012/19/EU (WEEE)

10.6. ACCESORIOS

Utilice sólo los accesorios estándar y opcionales presentes en la lista de embalaje adjunta

Catálogo do simulador HighLIGHT tester, da empresa Meyer Burger.



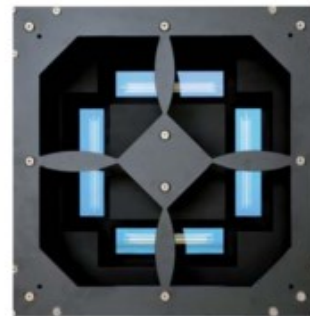
High^{LIGHT} LMT/VLMT

Module Tester for Laboratories

The measurement you rely on

The latest developments added to our unequalled light source quality allows the new generation HighLIGHT tester for laboratories to perform measurements with the lowest overall uncertainty.

- Established quality reference : most of leading certification bodies and test institutes worldwide rely on Pasan (i.e. Fraunhofer ISE, TÜV Rheinland, ESTI, SUPSI)
- A+A+A+ light source TÜV certified, with extended spectrum range (300–1200 nm)
- Low irradiance and spectral response measurements over the full module area as option



Setting the standard for uncertainty control

Pasan turnkey solar simulator system certified by TÜV Rheinland in a class of our own: A+A+A+ (twice better than class AAA)

IEC 60904-9	Pasan A+A+A+	AAA	BBB
Spectral Match	< ± 12.5 %	± 25 %	± 40 %
Non-uniformity	< 1.0 %	2 %	5 %
Instability	< 1.0 %	2 %	5 %

Uncertainty on P _{max} *	Pasan A+A+A+	AAA	Accuracy gain
Spectral Match	2.4 %	3.5 %	1.1 %
Non-uniformity	3.1 %	4.1 %	1 %

*Uncertainty calculation (k=2) according to ISO/IEC GUIDE 98-3:2008(E). Please refer to publication 4AV.1.38 at 26th EU-PVSEC



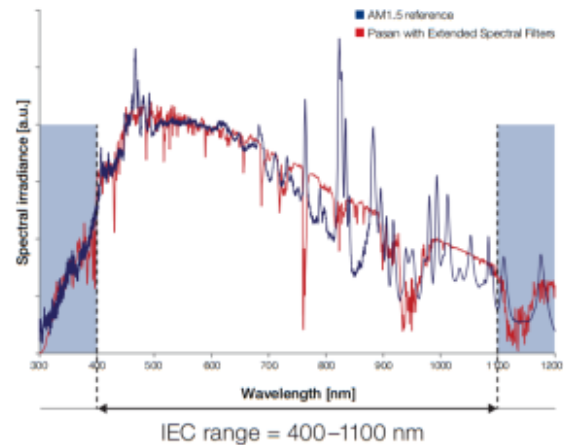
premium
technology
standard
by pasan



Best in class system

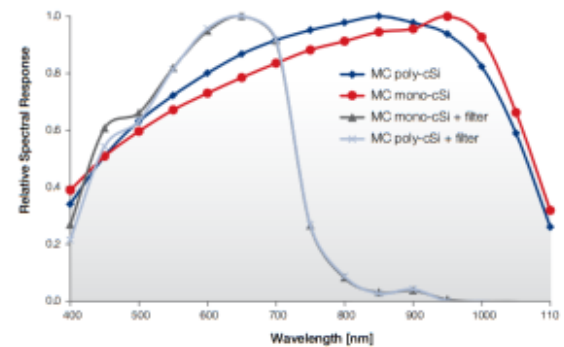
Worldwide reference technology constantly improving

- Exceeds the IEC standards in terms of classification and spectral range (300–1200 nm)
- New electronic load's design increases the measurement accuracy by thermally stabilizing the measurement shunts and increasing the precision of the acquisition channels
- Up to 4 irradiance channels can be measured and displayed simultaneously
- Established quality reference: most of leading certification bodies and manufacturers worldwide rely on Pasan

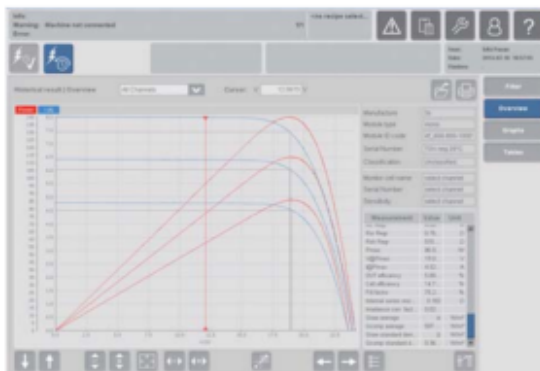


Powerful features for a complete evaluation of module characteristics

- The set of spectral filters enables relative measurements of the spectral response (quantum efficiency) of any solar module over the full area
- The light attenuation masks enable IV-curve measurement of PV modules at reduced irradiance levels. Their unique design ensures we keep the A+A+A+ light quality from 100 to 1200 W/m²
- The WPVS interface allows to use a World PV Scale (WPVS) reference cell as monitor cell or as reference DUT to decrease the overall uncertainty of the measurement



Spectral response measurement



Low irradiance measurement



Flexible laboratory interface

Software especially designed to fulfill your needs

The software interface has been fully redesigned, taking into account the numerous years of experience gained by working with PV institutes.

- Highly configurable interface
- Customized sets of measurements can be predefined and played
- Display of multiple curves simultaneously
- Ability to input custom voltage ramps
- Zoom on display feature on compensated and raw data



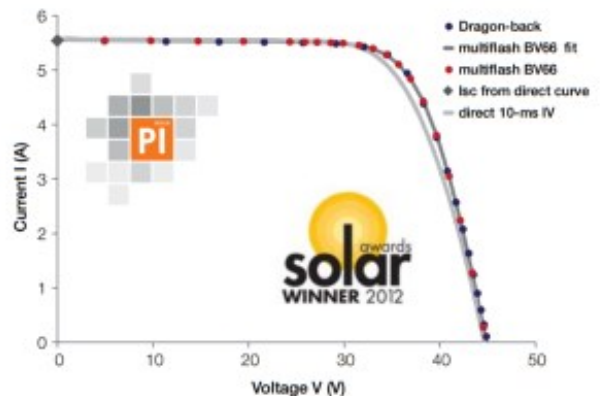
Pasan software interface

DragonBack® method:

Speeding up the measurement of high efficiency modules

The Pasan DragonBack® dynamic sweep methodology combined with our unequalled testers' quality allows high accurate measurements of any high efficiency technology

- Measurement method validated by PI Berlin institute
- Short pulse flash for highest light quality without any heating of the module
- Suited for actual and future high performance technologies
- Deviation of the Pmax between multi-flash and DragonBack® measurements <0.3 %



DragonBack® measurement



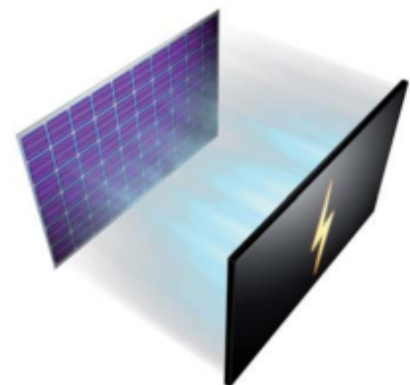
Options & Accessories

Technical specifications

- Module dimensions :
 - Up to 2.0 x 2.0 meters with High^{LIGHT} LMT Module Tester
 - Up to 3.0 x 3.0 meters with High^{LIGHT} VLMT Module Tester
- Active Electronic Load
 - Enables 4 quadrants sweep; IV and dark measurements
 - Manages up to 4 irradiance and temperature channels (InfraRed sensor, Pt100 / Pt1000 probes)
 - Measurement ranges up to 420V and 50A
 - Guaranteed accuracy (I, V, Irradiance) $\leq 0.1\%$ for $k = 2$
 - Calibration report provided with each system
- Module types: Standard Si, thin films, high efficiency module (for example HJT)
- Environment: 25 ± 10 °C

Options and integration

- Simple upgrade pack that turns your SunSim to our new High^{LIGHT} tester generation
- Light attenuation masks for low irradiance measurements
- Spectral filters for spectral response evaluation
- Infra-red sensor, Pt100, Pt1000 temperature probes
- WPVS reference cell interface
- ISO17025 calibration service
- Horizontal tunnel and vertical tower setups
- Spectrometer for evaluation of the Module Tester spectrum



For production environments, refer to High^{LIGHT} Prod documentation

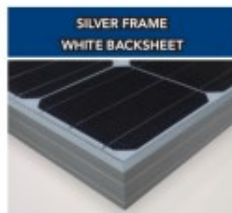
Catálogo dos módulos FV PANDA YL260C-30b da empresa YINGLI.

PANDA 60 Cell 40mm SERIES

YL280C-30b
YL275C-30b
YL270C-30b
YL265C-30b
YL260C-30b
YL255C-30b
YL250C-30b



BLACK FRAME
BLACK BACKSHEET



SILVER FRAME
WHITE BACKSHEET

ABOUT YINGLI GREEN ENERGY

Yingli Green Energy Holding Company Limited (NYSE: YGE) is one of the world's largest fully vertically integrated PV manufacturers, which markets its products under the brand "Yingli Solar". With over 4.5GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance. We are the first renewable energy company and the first Chinese company to sponsor the FIFA World Cup™.

PERFORMANCE

- Yingli Solar PANDA is a new monocrystalline silicon module technology with n-type solar cells that have average efficiencies higher than 19.5%. Combined with high transmission glass, module efficiencies are up to 17.1%.
- Compared to traditional modules with p-type solar cells, PANDA modules have lower initial degradation and higher performance under both high temperature and low irradiation conditions.
- Tight positive power tolerance of 0W to +5W ensures you receive modules at or above nameplate power and contributes to minimizing module mismatch losses leading to improved system yield.
- Top ranking in the "TÜV Rheinland Energy Yield Test" demonstrates high performance and annual energy production.

RELIABILITY

- Tests by independent laboratories prove that Yingli Solar modules:
 - ✓ Fully conform with certification and regulatory standards.
 - ✓ Withstand wind loads of up to 2.4kPa and snow loads of up to 5.4kPa, confirming mechanical stability.
 - ✓ Successfully endure ammonia and salt-mist exposure at the highest severity level, ensuring their performance in adverse conditions.
- Manufacturing facility certified by TÜV Rheinland to ISO 9001:2008, ISO 14001:2004 and BS OHSAS 18001:2007.

WARRANTIES

- 10-year limited product warranty¹.
 - Limited power warranty¹: 1 year at 98% of the minimal rated power output, 10 years at 92% of the minimal rated power output, 25 years at 82% of the minimal rated power output.
- ¹In compliance with our Warranty Terms and Conditions.

QUALIFICATIONS & CERTIFICATES

IEC 61215, IEC 61730, MCS, CE, ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, BS OHSAS 18001:2007, SA 8000, PV Cycle



PANDA 60 Cell 40mm SERIES

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module type	YLxxxC-30b (xxx=P _{max})								
			280	275	270	265	260	255	250
Power output	P _{max}	W	280	275	270	265	260	255	250
Power output tolerances	ΔP _{max}	W	0 / 5						
Module efficiency	η _m	%	17.1	16.8	16.5	16.2	15.9	15.6	15.3
Voltage at P _{max}	V _{MPP}	V	31.1	30.8	31.1	31.0	30.8	30.6	30.5
Current at P _{max}	I _{MPP}	A	9.01	8.94	8.68	8.55	8.46	8.33	8.20
Open-circuit voltage	V _{oc}	V	38.9	38.6	39.0	39.0	38.6	38.3	38.1
Short-circuit current	I _{sc}	A	9.61	9.55	9.06	8.93	8.91	8.85	8.71

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3. Average relative efficiency reduction of 3.5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Module type	YLxxxC-30b (xxx=P _{max})								
			280	275	270	265	260	255	250
Power output	P _{max}	W	202.2	198.6	194.7	192.4	188.8	185.2	181.6
Voltage at P _{max}	V _{MPP}	V	28.3	28.3	28.2	28.1	27.8	27.7	27.6
Current at P _{max}	I _{MPP}	A	7.14	7.02	6.91	6.86	6.79	6.68	6.58
Open-circuit voltage	V _{oc}	V	37.1	36.7	36.2	35.9	35.5	35.2	35.1
Short-circuit current	I _{sc}	A	7.27	7.23	7.21	7.20	7.18	7.13	7.02

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Parameter	NOCT	°C	46 +/- 2
Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of P _{max}	γ	%/°C	-0.42
Temperature coefficient of V _{oc}	β _{Voc}	%/°C	-0.31
Temperature coefficient of I _{sc}	α _{Isc}	%/°C	0.04
Temperature coefficient of V _{MPP}	β _{Vmp}	%/°C	-0.41

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1000V _{DC}
Max. series fuse rating	20A
Limiting reverse current	20A
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	5400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Backsheet (color)	white or black
Cell (quantity / material / dimensions)	60 / monocrystalline silicon / 156mm x 156mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver or black / clear
Junction box (protection degree)	≥ IP65
Cable (length / cross-sectional area)	1100mm / 4mm ²
Plug connector (type / protection degree)	MCA / IP67 or YT08-1 / IP67 or Amphenol H4 / IP68

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.

service@yinglisolar.com

Tel: 0086-312-8929802

YINGLISOLAR.COM

© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | DS_PANDA60Cell-30b_40mm_EU_EN_201303_v02.20.4

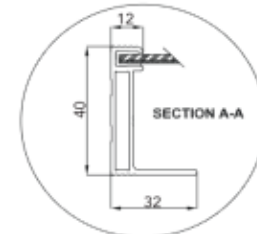
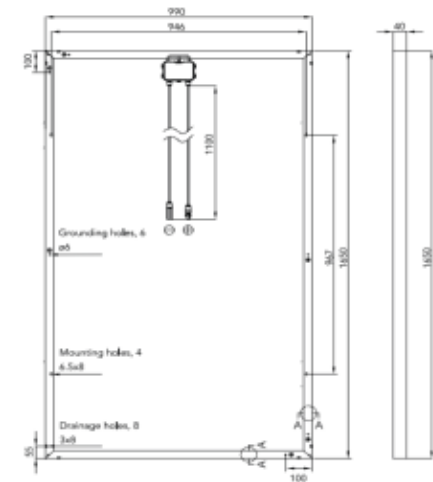
GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1650mm / 990mm / 40mm
Weight	19.1kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per pallet	26
Number of pallets per 40' container	28
Packaging box dimensions (L / W / H)	1700mm / 1150mm / 1190mm
Box weight	534kg

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User Manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:

