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 GERADORES FOTOVOLTAICOS
POR EFEITO DE SUJIDADE

Dissertação 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 Corrigida

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

de Rezende, Vinícius Gouveia Scartezini.

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

140 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: REZENDE, Vinícius Gouveia Scartezini

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

Dissertação 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: _____

DEDICATÓRIA

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

AGRADECIMENTOS

A 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 e colaboradores, do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP): professora Fedrizzi, professor Pinho, professor Lorenzo, Aurélio, André, Teddy, Givaldo, Lorival, Tadeu, Roberto, Marcelo, Gilberto, Cesar, Maurício, Kaue, Alex e Arianne, 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.

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

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

Rezende, Vinícius Gouveia Scartezini. **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.

Dentre as diferentes fontes conhecidas identifica-se a energia solar fotovoltaica 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. Apesar da 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, o que abre espaço para a busca e pesquisa de 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. Nesta dissertação, apresenta-se uma breve revisão de literatura sobre o tema e apresenta-se um estudo que analisa perdas de produtividade de energia, ao longo de 12 meses, em geradores fotovoltaicos situados em uma localidade propensa ao efeito da sujidade, quantificando perdas de energia da ordem de 0,6 % ao mês, 3,0 % em seis meses e 6,0 % ao ano, bem como, saturação de sujidade em 8 meses, custos de limpeza, mão-de-obra, consumo de água e tempo de limpeza. Este estudo também apresenta recomendações em relação a procedimentos de limpeza em sistemas fotovoltaicos.

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

ABSTRACT

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

Among the different known sources, photovoltaic solar energy is identified 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 interesting evolution related to the use of these systems in an urban environment and also grid-connected. Despite having a high technical reliability, photovoltaic systems still have doubts related to their operational performance in environments with high pollution level, and/or which present an expressive quantity of particulate matter, which opens space to research and investigation of many information's associated to the soiling field, costs and benefits of cleaning schedule, as well as water consumption index, making possible support the system operability. In this dissertation, shows up a brief literature review about the theme and displays a study which analyzes the energy productivity losses, along 12 months, in photovoltaic generators located in a region prone to the soiling effect, quantifying energy losses in the order of 0.6 % per month, 3.0 % in six months and 6.0 % in one year, as well as soiling saturation in 8 months, cleaning costs, labor, water consumption and cleaning time. This study also shows recommendations regarding cleaning procedures in photovoltaic systems.

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.....	37
Figura 0.2 - Número de conexões à rede desde janeiro de 2012 até dezembro de 2017. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018.....	37
Figura 0.3 - Potência total instalada anualmente de energia fotovoltaica no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018.....	38
Figura 0.4 – Componentes utilizados na fabricação de um módulo solar fotovoltaico. Fonte: Adaptado de PORTALSOLAR, 2017.	38
Figura 0.5 - Sujidade em painéis de plantas solares. Fonte: COBB, 2014.....	40
Figura 1.1 -- Evolução da tecnologia fotovoltaica e suas eficiências atuais. Fonte: NREL, 2016.	44
Figura 1.2 - Resposta espectral para diferentes tecnologias fotovoltaica sendo na esquerda respostas relacionadas ao comprimento de onda e na direita atrelada a diferentes densidades de sujeira. Fonte: HICKEL <i>et al.</i> , 2016.....	45
Figura 1.3 - Relação da frequência com o comprimento de onda eletromagnética. Fonte: Adaptado de BONITO, 2011.....	46
Figura 1.4 - Intensidade da sujidade ao redor do globo (Material Particulado - PM10 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Fonte: MAGHAMI <i>et al.</i> , 2016.....	47
Figura 1.5 - Potencial de sujeira ao redor do globo. Fonte: SISSAKIAN <i>et al.</i> , 2013... 48	
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.....	50
Figura 1.7 - Módulo com presença de microrganismos e locais, indicados por setas, com menor concentração de sujidades após coleta de material para análise laboratorial. Fonte: SHIRAKAWA <i>et al.</i> , 2012.....	52
Figura 1.8 - Usina fotovoltaica presente no IEE - USP. Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.	55
Figura 1.9 - Diagrama unifilar do subsistema CTPV. Fonte: Adaptado de ALMEIDA <i>et al.</i> , 2016.	57
Figura 1.10 - Gerador fotovoltaico (esquerda) e eletrocentro (direita) do subsistema CTPV. Fonte: ALMEIDA <i>et al.</i> , 2016.....	58

Figura 2.1 - Equipamento SOLAR I-Vw utilizado para obtenção de curvas IxV. Fonte: HT Instruments, 2016.	63
Figura 2.2 - Simulador <i>HighLIGHT tester LMT</i> utilizado para obtenção de curvas IxV de módulos sujos e limpos.....	64
Figura 2.3 - Medidor de vazão e materiais do conjunto.	65
Figura 2.4 - Outros materiais necessários para limpeza em módulos.	65
Figura 2.5 - Pontos quentes ocorrentes em módulos fotovoltaicos. Fonte: MORETÓN <i>et al.</i> , 2015.	69
Figura 2.6 - Interface do <i>software</i> WEG com função SCADA com dados variados.	71
Figura 2.7 - Interface do <i>software</i> WEG com função SCADA com dados de corrente, tensão e potência para cada mesa CTPV.	72
Figura 2.8 – (a) Subsistema CTPV em campo; (b) Esquematização da rotina de limpeza nas mesas fotovoltaicas da central solar.	74
Figura 2.9 - Curva IxV, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade.	79
Figura 2.10 - Curva de potência, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade.....	80
Figura 2.11 - Comparação de dados de produção de energia em dia de céu claro e nublado e potência medida das mesas, com linhas de tendência.....	81
Figura 3.1 - Limpezas anteriores ao período de 21 de dezembro de 2016, considerado tempo zero do estudo.	83
Figura 3.2 - Consumo de água da primeira limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	85
Figura 3.3 - Módulos da mesa 7 no dia 20 de janeiro de 2017.....	85
Figura 3.4 - Comparação entre módulos limpos e sujos com mais de 30 meses de sujidade acumulada.	86
Figura 3.5 - Limpeza de uma mesa com mais de 30 meses de sujidade acumulada e <i>mop</i> impregnado de sujeira, após limpar 3 módulos FV.	86
Figura 3.6 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).	88
Figura 3.7 - Consumo de água da 2ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	90

Figura 3.8 - 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.....	90
Figura 3.9 - Dados de produtividade de cada mesa para o 2º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês).	91
Figura 3.10 - Consumo de água na limpeza das mesas 7 e 8, registrado no medidor de vazão.	92
Figura 3.11 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7 e 8, no dia 20 de março de 2017.	93
Figura 3.12 - Dados de produtividade de cada mesa para o 3º mês de análise (*Limpeza somete das mesas 7 e 8 para este mês).	94
Figura 3.13 - Consumo de água da 4ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	95
Figura 3.14 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de abril de 2017.	95
Figura 3.15 - Dados de produtividade de cada mesa para o 4º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês).	96
Figura 3.16 - Consumo de água da na 5ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	97
Figura 3.17 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de maio de 2017.	98
Figura 3.18 - Dados de produtividade de cada mesa para o 5º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês).	99
Figura 3.19 - Consumo de água da limpeza das mesas 7, 8 e 3, respectivamente da esquerda para a direita, registrado no medidor de vazão.	100
Figura 3.20 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7, 8 e 3 no dia 20 de junho de 2017.	100
Figura 3.21 - Dados de produtividade de cada mesa para o 6º mês de análise (*Limpeza somete das mesas 7, 8 e 3 para este mês.).	101
Figura 3.22 - Consumo de água da 7ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	103
Figura 3.23 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de julho de 2017.	103
Figura 3.24 - Dados de produtividade de cada mesa para o 7º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês.).	104
Figura 3.25 - Consumo de água da 8ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	105

Figura 3.26 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de agosto de 2017....	106
Figura 3.27 - Dados de produtividade de cada mesa para o 8º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês).	107
Figura 3.28 - Consumo de água da segunda limpeza das mesas 7, 8 e 9, respectivamente da esquerda para a direita, registrado no medidor de vazão.	108
Figura 3.29 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7, 8 e 9 no dia 20 de setembro de 2017 e comparação de sujidade da mesa 8 em relação a mesa 7 limpa.....	108
Figura 3.30 - Dados de produtividade de cada mesa para o 9º mês de análise (*Limpeza somete das mesas 7, 8 e 9 para este mês.).	110
Figura 3.31 - Consumo de água da 10ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	111
Figura 3.32 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de outubro de 2017..	111
Figura 3.33 - Dados de produtividade de cada mesa para o 10º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês).	112
Figura 3.34 - Consumo de água da 11ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.	113
Figura 3.35 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de novembro de 2017 a esquerda e a mesa 7 parcialmente molhada com a chuva a direita.....	114
Figura 3.36 - Dados de produtividade de cada mesa para o 11º mês de análise (*Limpeza somete da mesa 7 para este mês).	115
Figura 3.37 - Consumo de água da 12ª limpeza das mesas 7, 8, 3 e 2, registrado no medidor de vazão.	116
Figura 3.38 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7, 8, 3 e 2 no dia 20 de dezembro de 2017.....	116
Figura 3.39 - Dados de produtividade de cada mesa para o 12º mês de análise (*Limpeza somete das mesas 7, 8, 3 e 2 para este mês).	117
Figura 3.40 - Dados de produção mensal de energia em MWh dos 12 meses de estudo.	119
Figura 3.41 - Somatório dos dados de produção mensal de energia em MWh dos 12 meses de estudo.	119
Figura 3.42 - Dados de produtividade mensal de energia em kWh/kWp dos 12 meses de estudo.	120
Figura 3.43 - Somatório dos dados de produtividade mensal de energia em kWh/kWp dos 12 meses de estudo.	120

Figura 3.44 -Dados de percentual de perda de produtividade mensal de cada mês em comparação com o padrão limpo da mesa 7.	121
Figura 3.45 - Dados de percentual de perda do somatório da produtividade mensal de cada mês em comparação com o padrão limpo da mesa 7.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dados climatológicos representativos da estação do verão para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.	59
Tabela 1.2 - Dados climatológicos representativos da estação do outono para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.	59
Tabela 1.3 - Dados climatológicos representativos da estação do inverno para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (Mirante de Santana). Fonte: INMET, 2016.	60
Tabela 1.4 - Dados climatológicos representativos da estação da primavera para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (Mirante de Santana), incluindo média anual das estações do ano. Fonte: INMET, 2016.	60
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.	61
Tabela 2.1 - Dados de perdas de potência devido degradação nos módulos. Fonte: INMET, 2016.....	76
Tabela 2.2 - Dados de potência referentes ao lado c.c. por fileira e por mesa.	77
Tabela 3.1 - Dados climatológicos para o dia 20 de janeiro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	84
Tabela 3.2 - Dados de consumo de água e tempo para a 1ª limpeza das mesas CTPV..	85
Tabela 3.3 - Fatores de correção utilizados para equiparar as potências de cada mesa.	87
Tabela 3.4 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 1º mês de análise*.....	88
Tabela 3.5 - Dados climatológicos para o dia 20 de fevereiro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	89
Tabela 3.6 - Dados de consumo de água e tempo para a 2ª limpeza das mesas CTPV..	89
Tabela 3.7 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 2º mês de análise.....	91
Tabela 3.8 - Dados climatológicos para o dia 20 de março de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	92
Tabela 3.9 - Dados de consumo de água e tempo para a 3ª limpeza das mesas CTPV..	92
Tabela 3.10 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 3º mês de análise.....	93

Tabela 3.11 - Dados climatológicos para o dia 20 de abril de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	94
Tabela 3.12 - Dados de consumo de água e tempo para a 4ª limpeza das mesas CTPV.	95
Tabela 3.13 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 4º mês de análise.	96
Tabela 3.14 - Dados climatológicos para o dia 20 de maio de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	97
Tabela 3.15 - Dados de consumo de água e tempo para a 5ª limpeza das mesas CTPV.	97
Tabela 3.16 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 5º mês de análise.	98
Tabela 3.17 - Dados climatológicos para o dia 20 de junho de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	99
Tabela 3.18 - Dados de consumo de água e tempo para a 6ª limpeza das mesas CTPV.	100
Tabela 3.19 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 6º mês de análise.	101
Tabela 3.20 - Dados climatológicos para o dia 20 de julho de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	102
Tabela 3.21 - Dados de consumo de água e tempo para a 7ª limpeza das mesas CTPV.	102
Tabela 3.22 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 7º mês de análise.	104
Tabela 3.23 - Dados climatológicos para o dia 20 de agosto de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	105
Tabela 3.24 - Dados de consumo de água e tempo para a 8ª limpeza das mesas CTPV.	105
Tabela 3.25 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 8º mês de análise.	106
Tabela 3.26 - Dados climatológicos para o dia 20 de setembro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	107
Tabela 3.27 - Dados de consumo de água e tempo para a 9ª limpeza das mesas CTPV.	108
Tabela 3.28 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 9º mês de análise.	109

Tabela 3.29 - Dados climatológicos para o dia 20 de outubro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	110
Tabela 3.30 - Dados de consumo de água e tempo para a 10ª limpeza das mesas CTPV.	111
Tabela 3.31 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 10º mês de análise.	112
Tabela 3.32 - Dados climatológicos para o dia 20 de novembro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	113
Tabela 3.33 - Dados de consumo de água e tempo para a 11ª limpeza das mesas CTPV.	113
Tabela 3.34 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 11º mês de análise.	114
Tabela 3.35 - Dados climatológicos para o dia 20 de dezembro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.	115
Tabela 3.36 - Dados de consumo de água e tempo para a 12ª limpeza das mesas CTPV.	116
Tabela 3.37 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 12º mês de análise.	117
Tabela 3.38 - Percentual de perdas médias de energia ao longo dos 12 meses, comparado com o padrão limpo mesa 7.	122
Tabela 4.1 - Tarifas de água para a unidade de negócio MO da SABESP. Fonte: SABESP, 2017.	128
Tabela 4.2 - Dados de custos para consumo de água e mão-de-obra, referentes ao estudo de sujidade.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAPV	<i>Building-Adapted Photovoltaics</i>
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para o Ensino e Pesquisa
BIPV	<i>Building-Integrated Photovoltaics</i>
CER	Contratos de Energia de Reserva
CESP	Companhia 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 vinila
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
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	<i>Potential-Induced Degradation</i>
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

λ	comprimento de onda
I	corrente
c.a.	corrente alternada
c.c.	corrente contínua
Isc	corrente de curto-circuito
ν	frequência
Voc	tensão de circuito aberto

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	35
Caracterização do Problema	38
Objetivos.....	41
Metodologia Utilizada	42
1 CAPÍTULO 1 - IMPACTO DA SUJIDADE EM SISTEMAS	
   FOTOVOLTAICOS	43
1.1 Sujidade e suas consequências	43
1.2 Metodologias de análise de sujidade.....	52
1.3 Caracterização da região e local do estudo.....	55
2 CAPÍTULO 2 - EQUIPAMENTOS, OBTENÇÃO DE DADOS,	
   MONITORAMENTO E LIMPEZA	63
2.1 Equipamentos utilizados	63
2.2 Análise de dados.....	70
2.3 Monitoramento dos sistemas.....	70
2.4 Atividade de limpeza	73
3 CAPÍTULO 3 - DADOS ADQUIRIDOS E RESULTADOS	83
3.1 Dados referentes ao 1º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	83
3.2 Dados referentes ao 2º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	89
3.3 Dados referentes ao 3º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	91
3.4 Dados referentes ao 4º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	94
3.5 Dados referentes ao 5º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	96
3.6 Dados referentes ao 6º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	99

3.7	Dados referentes ao 7º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	102
3.8	Dados referentes ao 8º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	104
3.9	Dados referentes ao 9º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	107
3.10	Dados referentes ao 10º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	110
3.11	Dados referentes ao 11º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	112
3.12	Dados referentes ao 12º mês de estudo na Central Solar do IEE.....	115
3.13	Análise global dos dados referentes aos 12 meses de estudo na Central Solar do IEE	118
4	CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE LIMPEZA EFICIENTE E CUSTOS ASSOCIADOS	125
4.1	Metodologia eficiente de limpeza.....	125
4.2	Custos associados ao estudo de sujidade.....	126
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
	Sugestões para trabalhos futuros	132
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA	135

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° 482/2012¹, Resolução Normativa n° 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 publicada portaria do Ministério de Minas e Energia - MME n° 236, promovendo o Leilão de Energia de Reserva - LER do mesmo ano, em que se previam negociações de Contratos de Energia de Reserva - CER 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 de energia fotovoltaica 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 de energia fotovoltaica cadastrados e habilitados 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 representando 20.953 MWp de potência instalada, sendo contratados 245,3 MW_{med} (EPE, 2015).

No ano de 2016 não foi verificada 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.

---

¹ Estabelece diretrizes para o acesso de micro e mini geração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e sistema de compensação da energia distribuída.

² 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 necessária nos locais de inserção das tecnologias (NASCIMENTO; MENDONÇA; CUNHA, 2012; ESTEVES; PEREIRA, 2016; COSTA, 2006).

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 o aumento da potência instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil de forma crescente. Segundo os dados da ANEEL, em relação à geração distribuída fotovoltaica, ocorreu um aumento aproximado de 50 % em novas conexões no sistema elétrico brasileiro de 2016 para 2017, conforme verificado na Figura 0.2, totalizando uma potência de 113,50 MW em 2017, conforme apresentado pela Figura 0.3 (ANEEL, 2018).

Apesar da 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 necessária 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 desde janeiro de 2012 até dezembro de 2017. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018.

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

Figura 0.3 - Potência total instalada anualmente de energia fotovoltaica no Brasil. Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018.

Caracterização do Problema

Os módulos fotovoltaicos são confeccionados de 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 componentes normalmente utilizados na fabricação de módulos, onde as células são revestidas de uma película de etileno-acetato de vinila (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).

Figura 0.4 – Componentes utilizados na fabricação de um módulo solar fotovoltaico. Fonte: Adaptado de PORTALSOLAR, 2017⁴.

⁴ Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 04 de abril de 2017.

Existem dificuldades relacionadas à permeabilidade de luz na célula fotovoltaica, em situações de sombreamento e sujeidade, ocasionando 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, dentre 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, justificando 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 sujeidade⁵ em sistemas de geração fotovoltaica, situação que retrata a importância do estudo sobre os efeitos da sujeidade na produtividade de sistemas fotovoltaicos.

Ambientes urbanos com elevado índice de poluição, atividade industrial e tráfego de veículos representam um grande potencial para estudos de sujeidade 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 referência para outras localidades do Globo, uma vez que apresentem características semelhantes. Desse modo, as pesquisas brasileiras podem contribuir positivamente para o setor fotovoltaico internacional.

Ainda existe uma carência de conhecimento no âmbito do efeito da sujeidade em diferentes localidades do globo. Os poucos estudos sistemáticos existentes na literatura

---

⁵ 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.

são em maior parte dedicados para usinas de grande porte em ambientes com alta concentração de poeira e areia. Tem-se 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 oferecem incremento de conhecimento para o setor, empreendedores e empresas, auxiliando em projetos e *software* da área fotovoltaica, possibilitando avaliar também ganhos e custos associados com implementação de rotinas de limpeza de diversos sistemas fotovoltaicos.

Em relação à descrição do problema surgem diretamente as seguintes perguntas:

1. Como o efeito da sujidade afeta a produtividade? Quais são os valores e comportamentos esperados de possíveis perdas de produtividade?
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.

Objetivos

O principal objetivo desta dissertação de mestrado consiste em quantificar as perdas de produtividade de energia de sistemas fotovoltaicos devido à sujidade acumulada nos módulos, em regiões urbanas e altamente propensas ao efeito. Não obstante, de forma secundária, têm-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;
2. Analisar o acúmulo da sujidade ao longo do tempo;
3. Coletar os dados de produtividade, kWh/kWp, relacionado ao impacto da sujidade 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 à limpeza, como, por exemplo, consumo de água e mão-de-obra.
6. Desenvolver escalas de rotina de limpeza preventiva;
7. 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 a 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.

1 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. Secundariamente, este capítulo informa a caracterização da região e local em que o estudo ocorreu, bem como os sistemas fotovoltaicos utilizados.

1.1 Sujidade e suas consequências

Ao se abordar o tema sujidade, deve-se 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, como folhas e galhos. Não obstante, outros elementos mais raros também podem ser encontrados, como metais pesados, neve 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 1.1 -- 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, 2016).

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 Telureto 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. Entende-se que existe uma atenuação maior para comprimentos de onda considerados menores e/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 1.2 - Resposta espectral para diferentes tecnologias fotovoltaica sendo na esquerda respostas relacionadas ao comprimento de onda e na direita atrelada a 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 radiação direta, como também abrange o percentual de irradiação difusa incidente, que pode ser entendido como a radiação solar que alcança a superfície da Terra a partir de todas as direções, após ter sido dispersada pelas moléculas e partículas presentes na atmosfera, 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 1.3 - 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 de 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.* chegaram 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; EL-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 do entorno (MAGHAMI; HIZAM; GOMES; RADZI; REZADAD; HAJIGHORBANI, 2016).

A Figura 1.4, retirada de MAGHAMI *et al.* (2016), ilustra a intensidade de sujeira ao redor do globo, em que foi possível categorizar o mapa em 4 zonas distintas, com 2 subcategorias para níveis sujeira em cada zona, expostas em medida de Material Particulado - PM10 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sendo assim, zonas mais escuras tendem a apresentar um maior grau de sujeira, 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 1.4 - Intensidade da sujeira ao redor do globo (Material Particulado - PM10 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 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 com potencial de sujidade muito alto. Já São Paulo se encontra numa região como potencial de sujidade moderado.

Os locais que apresentam considerável potencial de sujidade necessitam de uma maior atenção para com o efeito da sujidade nos sistemas e empreendimentos solares, forçando a implementação de ciclos eficientes de limpeza e manutenção, em resposta às condições ambientais variáveis.

Figura 1.5 - Potencial de sujeira ao redor do globo. Fonte: SISSAKIAN *et al.*, 2013.

Existem estudos vinculados ao desempenho da tecnologia fotovoltaica em diferentes localidades, como ambientes urbanos, rurais e desérticos, onde, dependendo de como um sistema fotovoltaico é instalado e da sua resposta de interação com o ambiente,

podem surgir variações de perda de eficiência por sujidade da ordem de 15 % ou mais, em diferentes períodos de análise, seja mensal, anual ou outro. Sendo que, perdas muito elevadas são mais comuns em ambientes desérticos com forte influência de tempestades de areia.

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. Válido ressaltar que, apesar dos valores implicarem em contradição no entendimento das perdas, deve-se levar em conta que não foi registrado no estudo um ano com 365 dias sem presença de chuvas e em ambiente seco, facilitando a compreensão dos dados. (MAGHAMI; HIZAM; GOMES; RADZI; REZADAD; HAJIGHORBANI, 2016).

Outro estudo em Los Angeles, Estados Unidos, efetuado em 2006 estudou perdas de geração por sujidade 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, nas quais 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/kWp (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 à 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 1.6 - 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 8,0 % e 10,0 %. 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 por Haberlin e Graf em 1998, 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 produtividade de 15 % em consequência das tempestades de areia frequentes, estas também ocorrentes em países do norte da África e oriente médio (SISSAKIAN; AL-ANSARI; KNUTSSON, 2013). A sujidade 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 a 22 g/m² de deposição de poeira (JIANG; LU; SUN, 2011). Em um estudo relacionado a poeira acumulada, foi constatada 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 arenoso⁶ 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 biofilmes⁷ na perda de potência, 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).

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).

---

⁶ 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.

⁷ 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.

Figura 1.7 - Módulo com presença de microrganismos e locais, indicados por setas, com menor concentração de sujidades após coleta de material para análise laboratorial. Fonte: SHIRAKAWA *et al.*, 2012.

1.2 Metodologias de análise de sujidade

Um dos aspectos mais importantes da manutenção relacionada aos módulos fotovoltaicos é a limpeza regular da superfície dos mesmos. Entretanto, para se estabelecer uma escala de limpeza, tem-se a necessidade de avaliar a intensidade de sujidade ocorrente nos geradores FV⁸.

Na literatura atual é possível encontrar algumas metodologias para determinação da intensidade da sujidade, em que se verifica 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 queima incompleta da combustão de hidrocarbonetos, de exaustão veicular e estações termoelétricas (KALDELLIS e FRAGOS, 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,

---

⁸ 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).

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 sujeidade, podendo ser de semanas até meses. Os conjuntos também podem ser submetidos à análises de variação de inclinação, direção de incidência de ventos e orientação geográfica, facilitando um maior ou menor acúmulo de sujeidade com o tempo (THANGARAJ e VELURY, 2016).

Para esta dissertação de mestrado, foi escolhido um *software* desenvolvido pela empresa WEG. O programa traz a função SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition* ou Controle Supervisório e Aquisição de Dados em português e apresenta confiabilidade e bom 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 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 *string*⁹ 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 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).

---

⁹ 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.

Após a definição do programa e aquisição de dados, inicia-se o processo de compilação e estruturação de dados, visando à 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 esta 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 e 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 1.000 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).

1.3 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, evidencia a usina utilizada nessa pesquisa.

Figura 1.8 - 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-Integrated*

Photovoltaics - BIPV¹⁰, *Building-Applied Photovoltaics* - BAPV¹¹, 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 POTÊNCIA¹²

A Central Fotovoltaica - CTPV, 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.

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 ligação em paralelo de três

---

¹⁰ 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.

¹¹ 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.

¹² 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.

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 1.9 - Diagrama unifilar do subsistema CTPV. Fonte: Adaptado de 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 em 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, 2017).

Figura 1.10 - 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 consequentemente 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, consequentemente 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 INMET, e a normal meteorológica de 1961-1990, uma vez que não foram encontrados dados mais recentes, 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 1.1); os meses Abril, Maio e Junho, como representativos da estação do outono (Tabela 1.2); os meses de Julho, Agosto e Setembro, como representativos do Inverno (Tabela 1.3); os meses Outubro, Novembro e Dezembro, como representativos da Primavera (Tabela 1.4). Vale ressaltar que, a Tabela 1.4 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 1.1 - Dados climatológicos representativos da estação do verão para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (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 1.2 - Dados climatológicos representativos da estação do outono para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (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 1.3 - Dados climatológicos representativos da estação do inverno para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (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 1.4 - Dados climatológicos representativos da estação da primavera para a cidade de São Paulo entre 1961-1990 (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 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 1.5, 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 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 *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 foi utilizado a 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.

2 CAPÍTULO 2 - EQUIPAMENTOS, OBTENÇÃO 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.

2.1 Equipamentos utilizados

O estudo de sujidade na central solar do IEE-USP, conta com uso de alguns equipamentos desenvolvidos para sistemas fotovoltaicos. 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 2.1 - Equipamento SOLAR I-Vw utilizado para obtenção de curvas IxV. Fonte: HT *Instruments*, 2016.

O aparelho possui código de fabricação 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 2.2 - Simulador *HighLIGHT tester LMT* utilizado para obtenção de curvas IxV de módulos sujos e limpos.

Para avaliar a sujidade, existe a necessidade de se 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 n°: 552059, 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 2.3 - Medidor de vazão e materiais do conjunto.

Outros materiais como, cabos de extensão telescópica fabricados em alumínio anodizado de 4,5 m, 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 2.4 - Outros materiais necessários para limpeza em módulos.

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 0,99 m x 1,65 m, com sujidade acumulada de 30 meses, registrando um consumo de água de 2,5 litros por módulo FV.

Em paralelo, outros 6 módulos semelhantes foram limpos utilizando detergente, registrando um consumo de água bem maior de 3,3 litros por módulo FV. Não obstante, a limpeza com detergente não apresentou diferenças sensíveis quando comparado à limpeza somente com água, descartando então o uso de detergente na limpeza dos módulos e possíveis danos oriundos de resquícios do produto químico na superfície dos mesmos.

O procedimento adotado foi:

- 1) Iniciar 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) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 3) Usar somente água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de pontos quentes e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 4) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 5) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 6) Em um balde colocar aproximadamente 8 litros de água limpa e comum de torneira, deixando o recipiente próximo ao local da atividade de trabalho;
- 7) 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;
- 8) Molhar uma segunda vez a superfície do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão e utilizar o agora a esponja não abrasiva para uma limpeza mais fina;
- 9) Molhar uma terceira vez a superfície do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;

- 10) Utilizar pano seco para facilitar a remoção de gotículas de água e evitar deposição de materiais particulados na superfície úmida ou, na ausência de pano, deixar a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo devido ao material do rodo.
- 11) 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;
- 12) Ao término da limpeza, limpar, secar e guardar todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

O procedimento utilizado em módulos com 30 meses de acúmulo de sujeira mostra-se trabalhoso, cansativo, negativo em termos ergonômicos e com alto consumo de água. A qualidade da água utilizada no estudo segue o padrão da SABESP, e deve ser levada em consideração, uma vez que, existem variações na concentração dos elementos existentes no corpos hídricos do território brasileiro, como, por exemplo, teor de sais, ferro e entre outros, que podem ficar depositados na superfície dos módulos e gerar algum impacto negativo.

Visando à 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 uniformes e retilíneos ao longo dos módulos. O segundo procedimento adotado foi:

- 1) Iniciar 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) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 3) Usar somente água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de pontos quentes e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;

- 4) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 5) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 6) 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;
- 7) Molhar uma segunda vez a superfície 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;
- 8) Molhar uma terceira vez a superfície do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;
- 9) Utilizar pano seco para facilitar a remoção de gotículas de água e evitar deposição de materiais particulados na superfície úmida ou, na ausência de pano, deixar a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo devido ao material do rodo;
- 10) Repetir o procedimento em outros módulos;
- 11) Ao término da limpeza, limpar, secar e guardar 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 0,99 m x 1,65 m cada e 30 meses de sujidade acumulada, tendo então uma redução no consumo de aproximadamente 16,0 % e apresentando uma limpeza mais rápida e mais confortável ao trabalhador.

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 o uso da 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 sujeira terão consumos menores em litros de água por módulo ou por metro quadrado.

Uma observação levantada nos procedimentos de limpeza foi em relação aos pontos quentes em um módulo FV, que podem 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. Pontos quentes 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 2.5 - Pontos quentes ocorrentes em módulos fotovoltaicos. Fonte: MORETÓN *et al.*, 2015.

Internamente aos módulos o surgimento de pontos quentes pode provir 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 consequentemente pontos quentes (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; BOTTCHEER; UKAR; LEERS; GRUNOW, 2013; VASKO; VIJH; KARPOV, 2014).

2.2 Análise de dados

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

Diferentes abordagens podem 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 sujeidade; utilização de dados de produtividade adquiridos minuto a minuto pelo *software* com função 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 sujeidade, produtividade de energia e custos envolvidos.

2.3 Monitoramento dos sistemas

O monitoramento do sistema CTPV se dá em tempo real e conta com ajuda do *software* WEG com função SCADA, o qual apresenta confiabilidade e traz 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.

A Figura 2.6 e a Figura 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 2.6 - Interface do *software* WEG com função SCADA com dados variados.

Figura 2.7 - Interface do *software* WEG com função SCADA com dados de corrente, tensão e potência para cada mesa CTPV.

2.4 Atividade de limpeza

O presente estudo possui como um dos objetivos adquirir dados de produtividade em relação ao acúmulo de sujeira no decorrer do tempo em condições de campo. 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 o subsistema CTPV em campo e um diagrama esquemático da usina, com as mesas numeradas de 1 a 10 e suas respectivas rotinas de limpeza definidas de acordo com a proximidade da fonte de água utilizada na limpeza.

Das 10 mesas existentes, 8 foram selecionadas para o estudo de análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujeira 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 sujeira 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 degradação¹³ 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 consequentemente o retorno do investimento acaba sendo reduzido, podendo gerar riscos financeiros. Vale ressaltar no âmbito do estudo de sujeira, que apesar de escalas

---

¹³ 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.

programadas para os meses posteriores ao 12º mês, esta dissertação não contempla em seu texto dados a partir do mês 13 devido ao cronograma definido para o estudo e dados adquiridos previamente.

Figura 2.8 – (a) Subsistema CTPV em campo; (b) Esquematização da rotina de limpeza nas mesas fotovoltaicas da central solar.

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 têm 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 alto desempenho 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 2014. 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 4 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 %.

Ao se comparar a condição padrão de 260 W de potência nominal 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 2014 até 2016 ocorreram perdas de aproximadamente 2,3 % 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 mostra um resumo de informações das perdas de potência dos módulos em diferentes condições a partir dos resultados do simulador *High^{LIGHT}* da PASAN.

Tabela 2.1 - Dados de perdas de potência devido degradação nos módulos. Fonte: INMET, 2016.

Módulo Fotovoltaico	Número de Série	Condição	Potência (W)	Perda em Relação ao Padrão 260 W (%)	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 foram necessárias 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 a fileira 3 da mesa 10 de maior potência, com a fileira 1 da mesa 8 de menor potência; e uma diferença de aproximadamente 6% ao se comparar a mesa 1 de maior potência e a mesa 8 de menor potência.

Ao se comparar um valor médio das potências das fileiras com a fileira de maior potência, verifica-se uma diferença de aproximadamente 4%. Já em uma comparação do valor médio da potência das mesas e a mesa de maior potência observa-se uma diferença de aproximadamente 3%.

Os valores das medidas apresentadas na Tabela 2.2 são referentes ao lado c.c. (corrente contínua) do subsistema CTPV, adquiridos imediatamente após a limpeza das mesas e em um momento de céu limpo e ensolarado. Sendo assim, as mesas se encontravam em condições semelhantes para execução das medições.

Tabela 2.2 - Dados de potência referentes ao lado c.c. por fileira e por mesa.

Mesa	Fileira	Potência Medida Fileira (W)	Potência Medida Mesa (kWp)	Potência Nominal Mesa (kWp)
10	1	4.394,01	13,28	15,6
	2	4.507,75		
	3	4.378,90		
9	1	4.306,05	13,34	15,6
	2	4.526,79		
	3	4.504,61		
8	1	4.254,82	12,89	15,6
	2	4.299,95		
	3	4.330,28		
7	1	4.412,93	13,36	15,6
	2	4.467,15		
	3	4.483,99		
3	1	4.358,17	13,07	15,6
	2	4.365,36		
	3	4.350,31		
2	1	4.296,61	13,03	15,6
	2	4.413,04		
	3	4.322,12		
1	1	4.527,67	13,70	15,6
	2	4.536,21		
	3	4.634,55		

A Figura 2.9 e a Figura 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 de 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, no lado c.c. e 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 em valores próximos que geram um entendimento de 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 $I \times V$ 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 3.4 (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 kWp de potência e mesa 7 com 1,95 MWh mensal de energia e 13,36 kWp 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 $I \times V$.

Figura 2.9 - Curva IxV, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade.

Figura 2.10 - Curva de potência, para cada fileira com 20 módulos, das mesas utilizadas no estudo de sujidade.

Além da abordagem com uso de produtividade mensal, pode-se utilizar por exemplo a produção diária em um dia de céu claro, um dia de céu nublado e energia das mesas adquiridas em medição de campo, conforme os dados da Tabela 2.2 e da Tabela 3.4 (Capítulo 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 produção e de energia são inferiores a 3 % ao se comparar diferentes mesas, possibilitando entender que a degradação existente nas mesas é uniforme.

Figura 2.11 - Comparação de dados de produção de energia em dia de céu claro e nublado e potência medida das mesas, com linhas de tendência.

3 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.

3.1 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, no dia 20 de dezembro de 2016 foram lavadas todas as mesas do subsistema CTPV, 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 3.1 - Limpezas anteriores ao período de 21 de dezembro de 2016, considerado tempo zero do estudo.

Após 1 mês, ou seja, no dia 20 de janeiro de 2017 foi constatado acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da primeira limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu num momento pós-chuva, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.1, adquiridos pela estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG/USP.

Tabela 3.1 - Dados climatológicos para o dia 20 de janeiro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	26,4 mm
Precipitação do mês	48,7 mm
Temperatura máxima	25,4 °C
Temperatura mínima	18,5 °C
Velocidade do vento	2,3 km/h
Direção vento	ENE

Por ter ocorrido nessas condições e aliado à prática adquirida após limpezas prévias, verificou-se um consumo baixo de água, cerca de 29,4 litros. Logo, 0,46 litros por módulo com dimensões 0,99 m x 1,65 m ou 0,30 L/m², representando uma redução de 78,70 % no consumo de água, quando comparado à metodologia de limpeza adotada para módulos com 30 meses de sujidade 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 especial para vidros 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, o que contribuiu para remoção de algum resquício de sujeira despercebida.

A Tabela 3.2 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da primeira limpeza da mesa 7 e a Figura 3.2 e a Figura 3.3, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de janeiro de 2017.

A Figura 3.4 e a Figura 3.5 mostram, respectivamente a comparação de sujidade entre módulos limpos e módulos com mais de 30 meses de sujidade 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 3.2 - Dados de consumo de água e tempo para a 1ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	29,4 L
Litros por área	0,30 L/m ²
Tempo de limpeza	30 min

Figura 3.2 - Consumo de água da primeira limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.3 - Módulos da mesa 7 no dia 20 de janeiro de 2017.

Figura 3.4 - Comparação entre módulos limpos e sujos com mais de 30 meses de sujidade acumulada.

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.

Os dados de produção 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* WEG com função 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 os disponibiliza em formato ``.csv<sup>14</sup>``.

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 integrados ao longo do tempo para obtenção dos dados de energia.

¹⁴ ``.csv`` é o código para *Comma Separated Values*, em 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.

Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês aproximadamente 15,12 MWh.

A mesa 5, considerada como sendo o padrão sujo, produziu cerca de 1,74 MWh no mês, com produtividade de 130,48 kWh/kWp. Já a mesa 7, limpa todo mês e avaliada como o padrão de referência para uma mesa limpa, produziu 1,95 MWh, com produtividade de 146,32 kWh/kWp, aproximadamente 11% a mais de energia quando comparada ao padrão sujo.

Para obtenção dos dados de produtividade de cada mesa do estudo, foram divididos os dados de produção em kWh por potência medida de cada mesa em kWp e posteriormente multiplicados por um fator de correção, o que possibilita uma análise somente do fator sujidade e exclusão do fator degradação. A Tabela 3.3 informa o fator de correção utilizado para equiparar as produtividades de cada mesa, sendo adquirido à partir dos dados obtidos no primeiro mês de medição, dividindo o valor de produtividade de cada mesa pelo valor de produtividade de referência padrão limpo da mesa 7.

Tabela 3.3 - Fatores de correção utilizados para equiparar as potências de cada mesa.

Mesa	Fator de Correção
1	1,0514
2	1,0152
3	1,0168
5	1,0000
7	1,0000
8	0,9990
9	1,0000
10	1,0115

A Tabela 3.4 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.6, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.4 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 1º mês de análise*.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,91	146,32	0,00
2	1,88	146,32	0,00
3	1,88	146,32	0,00
5	1,74	130,48	10,83
7	1,95	146,32	0,00
8	1,89	146,32	0,00
9	1,95	146,32	0,00
10	1,92	146,32	0,00

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.6 - Dados de produtividade de cada mesa para o 1º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

Os dados referentes aos próximos meses de estudo foram registrados e adquiridos conforme o escopo do item 3.1, do capítulo 3 deste trabalho. Sendo assim, os itens de 3.2 até 3.12, deste capítulo somente irão apresentar tabelas e figuras referentes aos dados dos respectivos meses de estudo e após o item 3.12 um item agregando todos os dados do período de análise.

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

No dia 20 de fevereiro de 2017 foi constatado 2 meses de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da segunda limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante chuva moderada, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Dados climatológicos para o dia 20 de fevereiro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,0 mm
Precipitação do mês	215,2 mm
Temperatura máxima	33,2 °C
Temperatura mínima	18,8 °C
Velocidade do vento	6,3 km/h
Direção vento	SE

A Tabela 3.6 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da limpeza da mesa 7 e a Figura 3.7 e a Figura 3.8, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de fevereiro de 2017.

Tabela 3.6 - Dados de consumo de água e tempo para a 2ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	16,7 L
Litros por área	0,17 L/m ²
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.7 - Consumo de água da 2ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.8 - 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.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3.1).

A Tabela 3.7 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.9, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.7 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 2º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,95	149,44	1,24
2	1,92	149,53	1,18
3	1,92	149,54	1,18
5	1,81	135,54	10,42
7	2,02	151,32	0,00
8	1,93	149,77	1,03
9	2,00	149,65	1,10
10	1,96	149,62	1,12

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.9 - Dados de produtividade de cada mesa para o 2º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

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

No dia 20 de março de 2017 foi constatado 3 meses de acúmulo da sujidade nas mesas do subsistema CTPV e a necessidade de limpeza da mesa 7 e 8. A limpeza ocorreu num momento sem chuva, de céu com poucas nuvens, com brisa leve, momentos de sol e com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Dados climatológicos para o dia 20 de março de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,0 mm
Precipitação do mês	200,6 mm
Temperatura máxima	24,2 °C
Temperatura mínima	16,6 °C
Velocidade do vento	6,9 km/h
Direção vento	SE

A Tabela 3.9 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da terceira limpeza da mesa 7 e primeira limpeza da mesa 8 a Figura 3.10 e a Figura 3.11, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia da limpeza.

Tabela 3.9 - Dados de consumo de água e tempo para a 3ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Total	Mesa 7	Mesa 8
Consumo de água	127,2 L	45 L	82,2 L
Litros por área	0,65 L/m ²	0,46 L/m ²	0,83 L/m ²
Tempo de Limpeza	90 min	35 min	55min

Figura 3.10 - Consumo de água na limpeza das mesas 7 e 8, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.11 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7 e 8, no dia 20 de março de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3.1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 12,20 MWh.

A Tabela 3.10 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.12, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.10 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 3º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,52	116,90	2,96
2	1,50	116,97	2,90
3	1,51	117,09	2,80
5	1,44	107,63	10,65
7	1,61	120,47	0,00
8	1,51	117,11	2,78
9	1,56	116,93	2,94
10	1,53	116,91	2,95

*Limpeza somente das mesas 7 e 8 para este mês.

Figura 3.12 - Dados de produtividade de cada mesa para o 3º mês de análise (*Limpeza somente das mesas 7 e 8 para este mês).

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

No dia 20 de abril de 2017 foi constatado 4 meses de acúmulo da sujeira nas mesas da central e a necessidade da quarta limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante chuva leve e céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Dados climatológicos para o dia 20 de abril de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,0 mm
Precipitação do mês	84,0 mm
Temperatura máxima	27,9 °C
Temperatura mínima	15,7 °C
Velocidade do vento	7,8 km/h
Direção vento	NE

A Tabela 3.12 mostra as informações adquiridas no âmbito da quarta limpeza da mesa 7 e a Figura 3.13 e a Figura 3.14, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de abril de 2017.

Tabela 3.12 - Dados de consumo de água e tempo para a 4ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	30,8 L
Litros por área	0,31 L/m ²
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.13 - Consumo de água da 4ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.14 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de abril de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 14,13 MWh.

A Tabela 3.13 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.15, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.13 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 4º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,76	134,80	4,44
2	1,73	134,85	4,40
3	1,73	134,98	4,31
5	1,69	126,48	10,33
7	1,88	141,06	0,00
8	1,82	140,76	0,21
9	1,80	134,84	4,41
10	1,77	134,81	4,43

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.15 - Dados de produtividade de cada mesa para o 4º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

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

No dia 20 de maio de 2017 foi constatado 5 meses de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da quinta limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante brisa leve, de céu limpo, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Dados climatológicos para o dia 20 de maio de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,1 mm
Precipitação do mês	170,4 mm
Temperatura máxima	23,0 °C
Temperatura mínima	16,0 °C
Velocidade do vento	3,7 km/h
Direção vento	NE

A Tabela 3.15 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da quinta limpeza da mesa 7 e a Figura 3.16 e a Figura 3.17, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de maio de 2017.

Tabela 3.15 - Dados de consumo de água e tempo para a 5ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	42,6 L
Litros por área	0,44 L/m ²
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.16 - Consumo de água da na 5ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.17 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de maio de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 10,17 MWh.

A Tabela 3.16 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.18, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.16 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 5º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,26	96,68	6,21
2	1,24	96,78	6,12
3	1,24	96,77	6,13
5	1,24	92,59	10,18
7	1,38	103,09	0,00
8	1,31	101,76	1,29
9	1,29	96,55	6,34
10	1,27	96,54	6,35

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.18 - Dados de produtividade de cada mesa para o 5º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

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

No dia 20 de junho de 2017 foi constatado 6 meses de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade de limpeza da mesa 7, 8 e 3. A limpeza ocorreu durante brisa leve, de céu claro, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Dados climatológicos para o dia 20 de junho de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	1,3 mm
Precipitação do mês	55,2 mm
Temperatura máxima	17,4 °C
Temperatura mínima	13,4 °C
Velocidade do vento	5,5 km/h
Direção vento	SSE

A Tabela 3.18 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da limpeza das mesas 7, 8 e 3 e a Figura 3.19 e a Figura 3.20, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de junho de 2017.

Tabela 3.18 - Dados de consumo de água e tempo para a 6ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Total	Mesa 7	Mesa 8	Mesa 3
Consumo de água	174,1 L	40,2 L	61,9 L	70,0 L
Litros por área	0,59 L/m ²	0,41 L/m ²	0,63 L/m ²	0,71 L/m ²
Tempo de Limpeza	150 min	35 min	55 min	60 min

Figura 3.19 - Consumo de água da limpeza das mesas 7, 8 e 3, respectivamente da esquerda para a direita, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.20 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7, 8 e 3 no dia 20 de junho de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 7,77 MWh, 23,00% menos energia do que o mês anterior. Apesar de ter sido um mês com maior irradiação solar em comparação com o anterior, no mês de junho foi necessário efetuar manutenção na edificação em que o sistema de processamento de dados se encontra, desligando o sistema de energia elétrica predial e acarretando em perda de dados de alguns dias do mês 6. Entretanto, uma análise de sujidade por percentual de perdas minimiza o impacto negativo da ausência de dados dos dias em questão.

A Tabela 3.19 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.21, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.19 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 6º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	0,95	73,06	6,86
2	0,94	73,14	6,76
3	0,94	73,06	6,85
5	0,94	70,29	10,39
7	1,05	78,44	0,00
8	0,98	75,94	3,18
9	0,97	72,82	7,16
10	0,96	72,79	7,21

*Limpeza somente das mesas 7, 8 e 3 para este mês.

Figura 3.21 - Dados de produtividade de cada mesa para o 6º mês de análise (*Limpeza somente das mesas 7, 8 e 3 para este mês.).

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

No dia 20 de julho de 2017 foi constatado 7 meses de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da sétima limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante brisa leve, de céu com algumas nuvens, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Dados climatológicos para o dia 20 de julho de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,0 mm
Precipitação do mês	73,8 mm
Temperatura máxima	23,8 °C
Temperatura mínima	11,6 °C
Velocidade do vento	5,5 km/h
Direção vento	SE

A Tabela 3.21 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da sétima limpeza da mesa 7 e a Figura 3.22 e a Figura 3.23, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de julho de 2017.

Tabela 3.21 - Dados de consumo de água e tempo para a 7ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	38,3 L
Litros por área	0,39 L
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.22 - Consumo de água da 7ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.23 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de julho de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 12,60 MWh.

A Tabela 3.22 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.24, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.22 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 7º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,51	115,66	9,68
2	1,49	116,04	9,39
3	1,64	127,83	0,18
5	1,54	114,93	10,25
7	1,71	128,05	0,00
8	1,65	127,67	0,30
9	1,55	116,04	9,38
10	1,52	115,85	9,53

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.24 - Dados de produtividade de cada mesa para o 7º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.).

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

No dia 20 de agosto de 2017 foi constatado 8 meses de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da oitava limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante chuva moderada, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.23.

Tabela 3.23 - Dados climatológicos para o dia 20 de agosto de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	31,5 mm
Precipitação do mês	0,0 mm
Temperatura máxima	20,7 °C
Temperatura mínima	14,0 °C
Velocidade do vento	6,3 km/h
Direção vento	N

A Tabela 3.24 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da oitava limpeza da mesa 7 e a Figura 3.25 e a Figura 3.26, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de agosto de 2017.

Tabela 3.24 - Dados de consumo de água e tempo para a 8ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	48,8 L
Litros por área	0,49 L/m ²
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.25 - Consumo de água da 8ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.26 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de agosto de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 6,95 MWh. Apesar de ter sido um mês com maior irradiação solar em comparação com o anterior, no mês de outubro foi necessário efetuar manutenção na edificação em que o sistema de processamento de dados se encontra, desligando o sistema de energia elétrica predial e acarretando em perda de dados de alguns dias do mês 8. Entretanto, uma análise de sujidade por percentual de perdas minimiza o impacto negativo da ausência de dados dos dias em questão.

A Tabela 3.25 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.27, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.25 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 8º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	0,85	65,04	10,50
2	0,84	65,18	10,31
3	0,92	71,73	1,29
5	0,87	65,09	10,43
7	0,97	72,67	0,00
8	0,92	71,40	1,75

9	0,87	65,06	10,47
10	0,85	64,93	10,65

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.27 - Dados de produtividade de cada mesa para o 8º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

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

No dia 20 de setembro de 2017 foi constatado 9 meses de acúmulo da sujeira nas mesas da central e a necessidade da segunda limpeza da mesa 7, 8 e 9. A limpeza ocorreu durante brisa leve, de céu totalmente limpo, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.26.

Tabela 3.26 - Dados climatológicos para o dia 20 de setembro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,0 mm
Precipitação do mês	67,0 mm
Temperatura máxima	26,0 °C
Temperatura mínima	12,6 °C
Velocidade do vento	4,0 km/h
Direção vento	E

A Tabela 3.27 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da limpeza das mesas 7, 8 e 9. A Figura 3.28 e a Figura 3.29, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de setembro de 2017.

Tabela 3.27 - Dados de consumo de água e tempo para a 9ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Total	Mesa 7	Mesa 8	Mesa 9
Consumo de água	119,3 L	36,6 L	39,7 L	43,0 L
Litros por área	0,41 L/m ²	0,37 L/m ²	0,41 L/m ²	0,44 L/m ²
Tempo de Limpeza	150 min	35 min	55 min	60 min

Figura 3.28 - Consumo de água da segunda limpeza das mesas 7, 8 e 9, respectivamente da esquerda para a direita, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.29 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7, 8 e 9 no dia 20 de setembro de 2017 e comparação de sujidade da mesa 8 em relação a mesa 7 limpa.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 9,35 MWh. Apesar de ter sido um mês com maior irradiação solar em comparação com o anterior, no mês de setembro foi necessário efetuar manutenção na edificação em que o sistema de processamento de dados se encontra, desligando o sistema de energia elétrica predial e acarretando em perda de dados de alguns dias do mês 9. Entretanto, uma análise de sujidade por percentual de perdas minimiza o impacto negativo da ausência de dados dos dias em questão.

A Tabela 3.28 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.30, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.28 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 9º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,14	87,72	10,57
2	1,13	87,83	10,46
3	1,23	95,32	2,82
5	1,17	87,65	10,64
7	1,31	98,09	0,00
8	1,22	94,82	3,33
9	1,17	87,71	10,58
10	1,15	87,58	10,71

*Limpeza somente das mesas 7, 8 e 9 para este mês.

Figura 3.30 - Dados de produtividade de cada mesa para o 9º mês de análise (*Limpeza somente das mesas 7, 8 e 9 para este mês.).

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

No dia 20 de outubro de 2017 foi constatado 10 meses de acúmulo da sujeira nas mesas da central e a necessidade da décima limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante chuva leve, de céu nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.29.

Tabela 3.29 - Dados climatológicos para o dia 20 de outubro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	0,0 mm
Precipitação do mês	174,9 mm
Temperatura máxima	25,0 °C
Temperatura mínima	18,0 °C
Velocidade do vento	5,6 km/h
Direção vento	SSE

A Tabela 3.30 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da décima limpeza da mesa 7 e a Figura 3.31 e a Figura 3.32, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de outubro de 2017.

Tabela 3.30 - Dados de consumo de água e tempo para a 10ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	38,0 L
Litros por área	0,39 L
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.31 - Consumo de água da 10ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.32 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de outubro de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 13,82 MWh.

A Tabela 3.31 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.33, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.31 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 10º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,67	128,55	10,61
2	1,65	128,62	10,56
3	1,77	137,39	4,46
5	1,72	128,75	10,47
7	1,92	143,80	0,00
8	1,85	143,30	0,35
9	1,91	143,51	0,21
10	1,69	128,40	10,71

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.33 - Dados de produtividade de cada mesa para o 10º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

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

No dia 20 de novembro de 2017 foi constatado 11 meses de acúmulo da sujidade nas mesas da central e a necessidade da décima primeira limpeza da mesa 7. A limpeza ocorreu durante chuva leve, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.32.

Tabela 3.32 - Dados climatológicos para o dia 20 de novembro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	1,6 mm
Precipitação do mês	105,6 mm
Temperatura máxima	22,2 °C
Temperatura mínima	15,5 °C
Velocidade do vento	6,2 km/h
Direção vento	E

A Tabela 3.33 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da décima primeira limpeza da mesa 7 e a Figura 3.34 e a Figura 3.35, evidenciam o consumo de água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 21 de outubro de 2017.

Tabela 3.33 - Dados de consumo de água e tempo para a 11ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Mesa 7
Consumo de água	35,8 L
Litros por área	0,37 L/m ²
Tempo de Limpeza	35 min

Figura 3.34 - Consumo de água da 11ª limpeza da mesa 7, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.35 - Dia da limpeza nos módulos da mesa 7 no dia 20 de novembro de 2017 a esquerda e a mesa 7 parcialmente molhada com a chuva a direita.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 11,93 MWh.

A Tabela 3.34 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.36 expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.34 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 11º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,43	109,95	10,79
2	1,41	110,16	10,62
3	1,48	115,46	6,32
5	1,47	110,04	10,72
7	1,65	123,25	0,00
8	1,56	120,70	2,07
9	1,62	121,72	1,24
10	1,44	109,65	11,03

*Limpeza somente da mesa 7 para este mês.

Figura 3.36 - Dados de produtividade de cada mesa para o 11º mês de análise (*Limpeza somente da mesa 7 para este mês).

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

No dia 20 de dezembro de 2017 foi constatado 12 meses de acúmulo da sujeira nas mesas da central e a necessidade da limpeza das mesas 7, 8, 3 e 2. A limpeza ocorreu durante chuva leve, de céu totalmente nublado, com os dados climatológicos fornecidos pela Tabela 3.35.

Tabela 3.35 - Dados climatológicos para o dia 20 de dezembro de 2017, segundo a estação meteorológica da USP. Fonte: IAG, 2017.

Precipitação do dia	26,7 mm
Precipitação do mês	65,2 mm
Temperatura máxima	30,9 °C
Temperatura mínima	18,6 °C
Velocidade do vento	5,2 km/h
Direção vento	ENE

A Tabela 3.36 visa resumir as informações adquiridas no âmbito da décima segunda limpeza da mesa 7 e a Figura 3.37 e a Figura 3.38, evidenciam o consumo de

água registrado no medidor de vazão e os módulos nas condições climáticas do dia 20 de dezembro de 2017.

Tabela 3.36 - Dados de consumo de água e tempo para a 12ª limpeza das mesas CTPV.

Limpeza	Total	Mesa 7	Mesa 8	Mesa 3	Mesa 2
Consumo de água	234,0 L	50,0 L	54,6 L	63,2 L	66,2 L
Litros por área	0,59 L/m ²	0,51 L/m ²	0,55 L/m ²	0,64 L/m ²	0,67 L/m ²
Tempo de Limpeza	210 min	35 min	55 min	60 min	60 min

Figura 3.37 - Consumo de água da 12ª limpeza das mesas 7, 8, 3 e 2, registrado no medidor de vazão.

Figura 3.38 - Dia da limpeza nos módulos das mesas 7, 8, 3 e 2 no dia 20 de dezembro de 2017.

O procedimento de aquisição e compilação dos dados de produção e produtividade segue análogo ao primeiro mês de análise (Capítulo 3, item 3,1). Desse modo foi verificado que a central solar produziu no mês 13,55 MWh.

A Tabela 3.37 resume as informações relacionadas aos dados de produção, produtividade mensal e percentual das perdas em termos de produtividade mensal, para

cada mesa utilizada no estudo em relação ao padrão limpo da mesa 7. Já a Figura 3.39, expõe somente dados de produtividade mensal por mesa.

Tabela 3.37 - Dados de Produção, Produtividade e Perdas de produtividade em relação ao padrão limpo da mesa 7, para o 12º mês de análise.

Mesa	Produção Mensal (MWh)	Produtividade mensal (kWh/kWp)	Perdas de Produtividade Mensal (%)
1	1,62	124,57	10,83
2	1,60	124,78	10,68
3	1,67	129,56	7,26
5	1,66	124,53	10,86
7	1,87	139,70	0,00
8	1,74	134,93	3,42
9	1,81	135,39	3,08
10	1,63	124,16	11,13

*Limpeza somente das mesas 7, 8, 3 e 2 para este mês.

Figura 3.39 - Dados de produtividade de cada mesa para o 12º mês de análise (*Limpeza somente das mesas 7, 8, 3 e 2 para este mês).

3.13 Análise global dos dados referentes aos 12 meses de estudo na Central Solar do IEE

Uma análise global em relação aos dados adquiridos ao longo dos 12 meses do estudo auxilia na melhor compreensão do efeito da sujidade no decorrer do ano, possibilitando por meio do somatório dos dados entender as perdas cumulativas de energia por efeito da sujidade. Vale ressaltar que a partir dos resultados obtidos, as rotinas de limpeza não foram realizadas para os períodos de 15 e 18 meses.

A Figura 3.40 mostra os dados de produção mensal de energia em MWh, dos 12 meses de estudo, a Figura 3.41 mostra o somatório dos dados de produção mensal em MWh dos 12 meses de estudo.

Figura 3.42 mostra os dados de produtividade mensal de energia em kWh/kWp dos 12 meses de estudo, a Figura 3.43 mostra o somatório dos dados de produtividade mensal de energia em kWh/kWp dos 12 meses de estudo.

A Figura 3.44 mostra os dados de percentual de perdas de produtividades mensal de cada mês comparado ao padrão limpo da mesa 7, já a Figura 3.45 mostra o somatório do percentual de perdas de produtividade ao longo dos 12 meses de estudo em comparação com o padrão limpo da mesa 7.

Figura 3.40 - Dados de produção mensal de energia em MWh dos 12 meses de estudo.

Figura 3.41 - Somatório dos dados de produção mensal de energia em MWh dos 12 meses de estudo.

Figura 3.42 - Dados de produtividade mensal de energia em kWh/kWp dos 12 meses de estudo.

Figura 3.43 - Somatório dos dados de produtividade mensal de energia em kWh/kWp dos 12 meses de estudo.

Figura 3.44 -Dados de percentual de perda de produtividade mensal de cada mês em comparação com o padrão limpo da mesa 7.

Figura 3.45 - Dados de percentual de perda do somatório da produtividade mensal de cada mês em comparação com o padrão limpo da mesa 7.

Ao analisar as perdas de forma individual verifica-se que as mesas 1, 2, e 10, que acumularam sujidade durante 12 meses, e a mesa 9, que acumulou 9 meses de sujidade, apresentaram nos 8 primeiros meses perdas de produtividade semelhantes ao padrão sujo mesa 5, em torno de 10,5 %, evidenciando que a partir de 8 meses de acumulo de sujidades as perdas não evoluem de forma significativa e se mantém na ordem de 11 %. Sendo assim, a cada 8 meses pode ser feita uma limpeza nas mesas da central solar ou em tempo inferior, caso a administração do subsistema CTPV almeje ter perdas inferiores aos valores em torno de 11 %.

Ao analisar as perdas em somatório, verifica-se que o estudo no subsistema CTPV do IEE aponta perdas médias de energia de todo o subsistema em torno de 0,6 % ao mês, chegando até 3,17 % em 6 meses e 5,90 % no ano, conforme o percentual de perdas médias de energia ao longo dos 12 meses apresentados na Tabela 3.38.

Vale ressaltar que, as perdas encontradas neste estudo se mostram próximas aos resultados encontrados por Maghami *et al.* (2016) e Kimber *et al.* (2006), os quais também estudaram perdas de sujidade regiões metropolitanas semelhantes a cidade de São Paulo, como a Califórnia e Los Angeles nos Estados Unidos, tendo encontrado perdas anuais que chegam a ordem de 6 %.

Tabela 3.38 - Percentual de perdas médias de energia ao longo dos 12 meses, comparado com o padrão limpo mesa 7.

Mesa	Percentual de Perdas Médias Comparado com o Padrão Limpo											
	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,00	0,63	1,30	2,09	2,73	3,17	4,13	4,62	5,18	5,84	6,31	6,75
2	0,00	0,60	1,26	2,06	2,69	3,12	4,04	4,53	5,09	5,75	6,21	6,64
3	0,00	0,60	1,23	2,01	2,65	3,10	2,67	2,56	2,58	2,81	3,14	3,54
5	10,8	10,6	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,52	1,17	0,93	0,99	1,22	1,08	1,13	1,34	1,22	1,30	1,51
9	0,00	0,56	1,24	2,04	2,71	3,18	4,10	4,59	5,16	4,55	4,24	4,13
10	0,00	0,57	1,26	2,06	2,73	3,20	4,13	4,64	5,21	5,88	6,36	6,82
Média	0,00	0,58	1,26	1,87	2,42	3,17	3,36	3,68	4,52	4,34	4,60	5,90

*A Média na tabela está relacionada ao subsistema CTPV como um todo, avaliando somente momentos em que não ocorreram limpezas e excluindo a mesa 5 (padrão sujo). As células em amarelo representam os momentos em que ocorreram limpezas.

Em relação a Tabela 3.38, ao analisar as perdas médias de cada mesa até o momento de sua primeira limpeza, verifica-se que as perdas médias mensais são da ordem de 0,6 %, sendo que as mesas 1, 2 e 10, as quais acumularam sujidade por 12 meses, apresentaram perder médias mensais respectivamente de 0,61 %, 0,60 % e 0,62 %; a mesa 9, que acumulou sujidade por nove meses, apresentou perdas médias mensais de 0,64 %; a mesa 3, que acumulou sujidade por seis meses, apresentou perdas médias mensais de 0,62 % e a mesa 8, que acumulou sujidade por 3 meses, apresentou perdas médias mensais de 0,59 %.

Os dados das figuras e tabelas deste capítulo auxiliam na visualização do impacto da sujidade 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 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 kWp. Ao final são apresentadas orientações de escalas de limpeza para módulos fotovoltaicos.

4.1 Metodologia eficiente de limpeza

O estudo efetuou várias limpezas na central solar do IEE e foram registrados dados de consumo de água em média de 0,480 L/m². As limpezas necessitaram do uso de cabos de junta telescópica, fibras abrasivas de limpeza leve e *mops* por meio do procedimento a seguir:

- 1) Iniciar 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) Utilizar mentalidade consciente para uso racional da água, evitando desperdícios e custos elevados com o consumo de água e hora trabalhada na atividade;
- 3) Usar somente água comum de torneira para a limpeza, sem nenhum detergente ou outro químico, possibilitando evitar a geração futura de *pontos quentes* e manchas nos módulos que impactem a produtividade do sistema;
- 4) Não utilizar máquinas de jato de água e/ou água sobre grande pressão, evitando problemas futuros de infiltração e degradação nos módulos;
- 5) Iniciar a limpeza pelo módulo de maior altitude, usufruindo da força da gravidade no processo de limpeza;
- 6) 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 e *mops* encharcados com água, proveniente do esguicho, em toda a superfície do módulo para a remoção da parte mais grosseira da sujeira acumulada;

- 7) Molhar uma segunda vez a superfície do módulo, utilizando o esguicho acoplado ao medidor de vazão, com a finalidade de remover qualquer residual de sujeira existente;
- 8) Utilizar pano seco para facilitar a remoção de gotículas de água e evitar deposição de materiais particulados na superfície úmida ou, na ausência de pano, deixar a superfície do módulo secar naturalmente, sem a utilização de rodos, evitando ocorrência de manchas na superfície do módulo devido ao material do rodo;
- 9) Repetir o procedimento em outros módulos;
- 10) Ao término da limpeza, limpar, secar e guardar todos os materiais utilizados para uma futura limpeza.

4.2 Custos associados ao estudo de sujidade

Os custos desse estudo tiveram foco em consumo de água e homem-hora trabalhada por kWp, tendo a referência de custos oriunda de empresas que prestam serviços de limpeza e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP, 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.

De forma geral, os custos de limpeza são consideravelmente gerenciáveis para quem possui instalações fotovoltaicas, sejam grandes operadoras ou indivíduos que possuem a tecnologia em seus lares. Válido ressaltar que os custos de limpeza variam de região para região, sendo em média US\$ 0,2/kWp incluindo a mão de obra (JONES; BARAS; AL SAEERI, 2016).

Durante este estudo não foi encontrada nenhuma empresa brasileira especializada em limpeza de empreendimentos fotovoltaicos, somente empresas especializadas em limpeza de fachada de edificações, as quais apresentaram orçamentos extremamente caros, em torno de R\$ 10,00 (dez reais) para cada metro quadrado do subsistema CTPV a ser limpo. O valor exorbitante deve ser considerado como algo isolado e não um valor de referência, uma vez que está relacionado à prestação de serviço em uma universidade pública, na qual para executar determinadas atividades se faz necessário a participação de empresas em licitações que envolvem uma grande burocracia e dificuldade de recebimento financeiro por parte das empresas em curtos períodos de tempo. Não

obstante, o alto valor para execução de limpeza tem vínculo com o tamanho pequeno do subsistema e o deslocamento, por parte das empresas e de mão-de-obra.

Segundo a SABESP, 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 em questão, foi adotado o valor para categoria residencial que 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.

A central foi instalada na zona oeste de São Paulo, se enquadrando na unidade de negócio MO da SBAESP. A Tabela 4.1 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 4.1 - 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

A Tabela 4.2 mostra resumidamente as informações relacionadas aos custos de limpeza e consumo de água nos módulos fotovoltaicos.

Tabela 4.2 - Dados de custos para consumo de água e mão-de-obra, referentes ao estudo de sujidade.

Mês	Consumo de Água (L)	Custo de Água - Residencial/Normal *	Potência de Limpeza (kWp)	Custo de Mão-de-obra (US\$ 0,2 /kWp)
1	29,40	22,38	13,36	2,67
2	16,17	22,38	13,36	2,67
3	127,20	22,38	26,25	5,25
4	30,80	22,38	13,36	2,67
5	42,60	22,38	13,36	2,67
6	174,10	22,38	39,32	7,86
7	38,30	22,38	13,36	2,67
8	48,80	22,38	13,36	2,67
9	119,30	22,38	39,59	7,92
10	38,00	22,38	13,36	2,67
11	35,80	22,38	13,36	2,67
12	234,00	22,38	52,35	10,47
Soma	934,47 L	R\$ 268,56	264,39 kWp	US\$ 52,88 (R\$ 172,39)
Total	R\$ 440,95			

* Devido ao consumo de água ser baixo a SABESP efetua a cobrança por meio de um custo fixo de R\$ 22,38 para um consumo menor do que 10 m³ por mês. Vale ressaltar que, para esta tabela foi utilizada a cotação do dólar para o dia 21 de novembro de 2017, sendo R\$ 3,26 equivalente a US\$ 1,00.

Segundo as escalas de limpeza definidas para este estudo, no 12º mês ocorreram 20 limpezas. Sendo assim, levando em consideração a potência medida de cada mesa, um comparativo de custos de limpeza dos 12 primeiros meses do estudo, para um orçamento de US\$ 0,2/kWp, conforme informado por Jones *et al.*, 2016, acarretaria em um custo de US\$ 52,88 ou R\$ 172,39, relativamente barato quando comparado com o cenário extremamente caro das empresas brasileiras, promovendo o entendimento de executar preferencialmente uma limpeza periódica ao invés de instalar mais potência na área em que o sistema fotovoltaico se encontra.

O custo de R\$ 440,95 abrange os custos da SABESP e mão-de-obra convertido em reais para um valor de US\$ 0,2/kWp, segundo a cotação do dólar informada na Tabela 4.2.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do estudo foi possível aprender e registrar lições que permitem sugerir procedimentos para a manutenção do impacto da sujidade em sistemas de fotovoltaicos, como forma de minimizar as perdas de energia nesses sistemas. Sendo assim, se faz necessário elucidar algumas questões, como:

1. Conhecimento do problema:
  - a. Sempre que possível, visitar o local onde o sistema fotovoltaico está inserido e verificar a existência de acúmulo de sujidade e as condições do ambiente;
  - b. Verificar e quantificar as perdas existentes, utilizando um sistema de monitoramento constante das variáveis do sistema FV e da produtividade de energia elétrica do sistema em análise.
2. Disponibilidade de água, equipe, materiais e equipamentos:
  - a. Verificar a disponibilidade de fonte água para limpeza, equipe, materiais e equipamentos para que a limpeza seja efetuada;
  - b. Válido ressaltar que em grandes empreendimentos uma limpeza manual se torna muito difícil de ser executada, possibilitando o uso de uma limpeza automatizada disponível no mercado em uma grande variedade de equipamentos e configurações.
3. Definir escala de limpeza:
  - a. Escolher a melhor rotina de limpeza para o sistema FV, levando em consideração as condições locais, os custos de produção de energia e o ponto ótimo em relação ao quanto é aceitável perder de energia e o quanto é aceitável em gastar com limpeza.

Ao longo do estudo, verificou-se que a sujidade existente em um sistema fotovoltaico sofre variações em relação ao local em que o sistema está inserido, dificultando a comparação entre diferentes estudos sobre sujidade. Entretanto, podem existir comparações entre estudos que são feitos em localidades com aspectos semelhantes, como por exemplo São Paulo, Brasil e Califórnia, Estados Unidos onde foi verificado perdas anuais de energia em torno de 6% em ambos.

No subsistema CTPV do IEE ocorrem perdas médias de energia da ordem de 0,6 % ao mês, 3,0 % em seis meses e 6,0 % ao ano, bem como, saturação de sujeidade no 8º mês, quando se efetua uma análise de somatório de perdas. Entretanto, ao se analisar os meses separadamente foi possível verificar que no mês 8 algumas mesas apresentaram perdas semelhantes ao padrão sujo, mesa 5, que está há mais de 30 meses acumulando sujeidade. Sendo assim, após 8 meses as perdas não são tão significativas, possibilitando ao administrador tomar a decisão de limpar o sistema e recuperar parte das perdas ou manter o sistema sujo.

Uma recomendação em relação a limpeza do sistema seria efetuar a mesma juntamente com momentos de manutenção preventiva, de 3 em 3 meses ou 6 em 6 meses, uma vez que o custo de limpeza é baixo e sendo efetuado juntamente com um momento de manutenção, possibilita otimizar tempo e equipe, facilitando vistorias constantes no local onde o sistema está inserido.

Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões relacionadas a este estudo de sujeidade visam propostas para estudos futuros vinculados ao tema desta dissertação, como, por exemplo, estudar a comparação entre uma limpeza manual e uma limpeza automatizada, com projeção de custos e tempo de retorno de investimento para empreendimentos de pequeno e grande porte e comparação dos diferentes equipamentos de limpeza automatizada.

Outra recomendação para estudos futuros seria estudar o impacto da sujeidade em diferentes inclinações de módulos fotovoltaicos para uma mesma latitude, buscando encontrar um ponto ótimo entre produção de energia elétrica e acúmulo de sujeidade, com máxima redução em custos de manutenção e limpeza.

Um estudo comparativo de diferentes tecnologias FV e suas respostas ao impacto da sujeidade em uma mesma inclinação e/ou em inclinações diferentes.

O desenvolvimento de um *software* intuitivo, que auxilie um empreendimento FV em analisar a variável sujeidade, definindo um coeficiente de sujeidade que indica o melhor momento para se efetuar uma limpeza, certamente seria muito útil para empresas e empreendedores da área.

Realizar estudo semelhante em localidade com alta densidade de tráfego de veículos e realizar comparação de resultados obtidos com este estudo.

6 REFERÊNCIAS 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 2018.
- ANEEL. **BIG - Banco de informações de geração**. Capacidade de geração do Brasil. Brasília: ANEEL. 2018.
- 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.
- COBB, K. **PV Reliability. Operations & Maintenance Workshop: SunPower Oasis Robotic Panel Cleaning System**. EPRI-Sandia PV Systems Symposium. 19 May. 2014.
- COSTA, C. V. **Políticas de Promoção de Fontes Novas e Renováveis para Geração de Energia Elétrica: Lições da experiência Européia para o caso brasileiro**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.
- 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.

ESTEVES, R. A.; PEREIRA, R. G. **Análise sobre a Evolução do Biodiesel no Brasil**. Espacios. Vol. 37 (Nº 02). Pág. 5. 2016.

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.

HAMMOND, 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.

IAG. **Estação meteorológica.** Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG/USP. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br>>. Acesso em 20 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.

JONES, R. K.; BARAS, A.; AL SAEERI, A. **Optimized cleaning cost and schedule based on observed soiling conditions for photovoltaic plants in central saudi arabia.** IEEE Journal of Photovoltaics. Volume: 6 Issue: 3. pp 730 - 738. 11 Mar. 2016.

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.

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.; PILLAI, 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.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. K. **Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil.** Cad. EBAPE.BR. v. 10. Nº 3. Artigo 9. p.630-651. Rio de Janeiro. Set. 2012

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

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.

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.