

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO NICOLAU GAIO
KLEVERSON MOISÉS APOLINÁRIO DE CAMPOS

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO PARA LIMPEZA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS PARA OBTENÇÃO DA MELHOR
PRODUTIVIDADE - ESTUDO DE CASO DOS SFVCR's
IMPLANTADOS NA UTFPR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

JOÃO NICOLAU GAIO
KLEVERSON MOISÉS APOLINÁRIO DE CAMPOS

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO PARA LIMPEZA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS PARA OBTENÇÃO DA MELHOR
PRODUTIVIDADE - ESTUDO DE CASO DOS SFVCR's
IMPLANTADOS NA UTFPR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Gerson Máximo Tiepolo.

CURITIBA
2017

João Nicolau Gaio
Kleverson Moisés Apolinário de Campos

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO PARA LIMPEZA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS PARA OBTENÇÃO DA MELHOR
PRODUTIVIDADE - ESTUDO DE CASO DOS SFVCR's
IMPLANTADOS NA UTFPR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de junho de 2017.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso de Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos trabalhos de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Gerson Máximo Tiepolo, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gerson Máximo Tiepolo, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Jair Urbanetz Junior, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Jorge Assade Leludak, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ana e Dalton, que me incentivaram a realizar esse curso e me tornar engenheiro. Aos meus irmãos, Daiana, Daniel e Luiz, que me deram todo o apoio necessário para a minha formação quando foi preciso. À minha avó, Joana, que sempre esteve presente e me auxiliou quando ocorreu alguma dificuldade. E aos meus amigos que também passaram ou estão passando por esse curso e me auxiliaram a deixar o tempo de permanência no curso de uma maneira mais leve.

João Nicolau Gaio

A toda minha família, que me apoiou na realização deste sonho de ser engenheiro. Em especial ao meu pai, Subtenente Kleber, o principal contribuinte neste sonho, que sempre acreditou no meu potencial e me aconselhou nas diferentes fases da minha jornada acadêmica e profissional. Em memória de minha irmã Kelly, exemplo de superação e conquistas, uma inspiração que deixa eternas saudades. Aos meus amigos, por me proporcionarem momentos felizes e me apoiar em árdios momentos.

Kleverson Moisés Apolinário de Campos

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pela disponibilidade que nos deu para que conseguíssemos ingressar em uma universidade e concluir um curso superior, pelas pessoas que colocou em nossas vidas que porventura auxiliaram de alguma maneira no nosso desenvolvimento, sendo esse acadêmico, profissional ou pessoal, pela saúde dada e a alegria de poder desfrutar de todos os momentos na universidade.

Aos nossos pais, pelo incentivo e suporte na realização dos nossos objetivos, pelo carinho e afeto sempre presente, também como os auxílios quando necessários para a nossa formação.

Às nossas famílias, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos de nossas vidas.

Aos nossos colegas e amigos que passaram tempo conosco, sendo durante as disciplinas, como também nos momentos de lazer, levando alguns desses como melhores amigos para a vida toda.

Aos nossos professores que nos ensinaram os conteúdos, disciplinas e métodos para que devêssemos agir de uma maneira mais adequada perante um trabalho.

Ao nosso orientador Gerson por toda a paciência que teve conosco durante esse período de realização do projeto e de todo o tempo que disponibilizou para resolver nossos questionamentos, sendo eles com relação ao trabalho ou auxiliando quando foi necessário. Sabemos que nosso orientador não será apenas mais um professor que tivemos durante o curso, mas sim, uma pessoa a qual podemos chamar de amigo.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Spencer "Charlie" Chaplin)

RESUMO

GAIO, J. N.; CAMPOS, K. M. A. "Determinação do Tempo Ótimo para Limpeza de Painéis Fotovoltaicos para Obtenção da Melhor Produtividade - Estudo de Caso dos SFVCR's Implantados na UTFPR". 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Tendo em vista que novas tecnologias estão sendo implementadas no setor de geração de energia elétrica, como por exemplo, a proveniente de energia solar fotovoltaica, alguns estudos se fazem necessários para a obtenção do melhor desempenho dos sistemas que comportam tal tecnologia. Esse modo de geração contempla painéis fotovoltaicos, os quais ficam expostos a características climáticas e recebem influência da sujeidade, de acordo com o ambiente ao qual estão localizados. Com o avanço da tecnologia também há a presença de inovações nos ramos das limpezas que podem ser utilizadas nos painéis fotovoltaicos, a fim de amenizar as perdas de produtividade ocasionadas pela sujeidade. Este trabalho tem como objetivo determinar qual o tempo ótimo para limpeza de painéis fotovoltaicos, visando alta produtividade do sistema, tendo como objeto de estudo os painéis fotovoltaicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Curitiba, sede Centro, localizado no Escritório Verde (EV) e sede Neville. Para a avaliação do desempenho desses painéis fotovoltaicos foi necessário verificar seus índices de mérito, que são parâmetros de comparação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR). Diante desses aspectos e da sujeidade à qual implica na perda de produtividade dos painéis fotovoltaicos, este trabalho fez a análise dos diversos meios de limpeza e um estudo para descobrir qual é o melhor intervalo de tempo para que sejam realizadas as limpezas, com o intuito de manter o sistema com elevada produtividade dos painéis fotovoltaicos estudados.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos. Energia Solar Fotovoltaica. Sujidade. Índices de Mérito.

ABSTRACT

GAIO, J. N.; CAMPOS, K. M. A. "Determination of Optimum Time for Cleaning Photovoltaic Panels to Obtain the Best Productivity - Case Study on Grid-Connected Photovoltaic Systems in UTFPR". 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Considering that new technologies are being implemented in the electricity generation sector, such as solar photovoltaic, some studies are necessary for obtaining the best performance of these systems. This generation source contemplates photovoltaic panels, which are exposed to climatic characteristics and receive influence of the dirtiness, according to the environment to which they are located. With the technology advancement, there is also the presence of innovations in the branches of the cleanings that can be used in photovoltaic panels, in order to soften the productivity losses caused by dirtiness. This work's objective is to determine the optimal time for cleaning photovoltaic panels, aiming high system productivity, having as study's objects the photovoltaic panels of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) in Curitiba, located at Green Office and Neville headquarters. In order to evaluate the performance of these photovoltaic panels, it was necessary to verify their merit indices, which are parameters for the comparison about grid-connected photovoltaic systems. Facing these aspects and the dirtiness that implies in the productivity loss of photovoltaic panels, this work made the analysis of several cleaning agents and a study to find out the best interval for the cleaning to maintain the system with high productivity in the photovoltaic panels studied.

Keywords: Photovoltaic Systems. Photovoltaic Solar Energy. Dirtiness. Performance Parameters.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

BIG – Banco de Informações de Geração;

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica;

COFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social;

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária;

COV – Compostos Orgânicos Voláteis;

CPV – Sistema Óptico Concentrado;

EDS – Telas Eletrodinâmicas;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética;

ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços;

MME – Ministério de Minas e Energia;

PASEP - Programa de Formação do Patrimônio o Servidor Público;

PIS – Programa de Integração Social;

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century;

SFVCR – Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica;

TiO₂ – Dióxido de Titânio;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

UV – Ultra Violeta;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de radiação solar global horizontal média diária anual do Brasil.....	20
Figura 2 - Movimento elíptico de translação da Terra.	25
Figura 3 - Espessura da massa de ar que é atravessada pelos raios solares.	26
Figura 4 - Componentes da Radiação Solar.	27
Figura 5 - Piranômetro termoelétrico.....	29
Figura 6 - Piranômetro Fotovoltaico.	30
Figura 7 – Pireliômetro.	30
Figura 8 - Diagrama de um SFVCR.	32
Figura 9 - Painel “Clean me!”.	37
Figura 10 - Agentes de Limpeza de painéis fotovoltaicos.	40
Figura 11 – Seção transversal da tela eletrodinâmica (EDS).....	43
Figura 12 – Fotografias de um painel EDS, inicialmente coberto por uma camada de poeira, sendo limpo pelo EDS.	44
Figura 13 – Recobrimento autolimpante (a)super-hidrofílico e (b)super-hidrofóbico.	46
Figura 14 – Diagrama de gotas sobre superfícies com diferentes graus de molhabilidade e correspondentes valores de ângulos de contato.	47
Figura 15 – Efeito autolimpante através da folha de lótus.....	48
Figura 16 - Painel Fotovoltaico do Escritório Verde.	51
Figura 17 - Painel Fotovoltaico da Sede Neville.....	52
Figura 18 - Detalhe da sujidade nos módulos do Escritório Verde antes da limpeza.	53
Figura 19 - Sujidade no Módulo Fotovoltaico do Neville.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens Associadas aos Diferentes Métodos de Limpeza.....	50
Tabela 2 - Escritório Verde – 2012.....	62
Tabela 3 - Escritório Verde – 2013.....	62
Tabela 4 - Escritório Verde – 2014.....	63
Tabela 5 - Escritório Verde – 2015.....	63
Tabela 6 - Escritório Verde e Neville – 2016.....	64
Tabela 7 - Escritório Verde e Neville – 2017.....	64
Tabela 8 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Escritório Verde (kWh).....	80
Tabela 9 - Irradiação média diária no plano horizontal no Escritório Verde (kWh/m ² .dia).....	80
Tabela 10 - Irradiação média diária no plano inclinado no Escritório Verde (kWh/m ² .dia).....	81
Tabela 11 - Produtividade (Yield) do Escritório Verde (kWh/kWp).....	81
Tabela 12 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Escritório Verde (%).....	82
Tabela 13 – Fator de Capacidade (FC) do Escritório Verde (%).....	82
Tabela 14 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Neville (kWh).....	83
Tabela 15 - Irradiação média diária no plano horizontal no Neville (kWh/m ² .dia)....	83
Tabela 16 - Irradiação média diária no plano inclinado no Neville (kWh/m ² .dia).	84
Tabela 17 - Produtividade (Yield) do Neville (kWh/kWp).....	84
Tabela 18 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Neville (%).....	85
Tabela 19 – Fator de Capacidade (FC) do Neville (%).....	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Porcentagem de participação na geração de energia elétrica global.	16
Gráfico 2 - Participação das fontes na matriz elétrica brasileira.....	23
Gráfico 3 - Capacidade Instalada Mundial de SFVCR.	33
Gráfico 4 - Os 10 Maiores Países com relação à capacidade instalada.	34
Gráfico 5 - Perdas Diárias em diferentes partes do Mundo devido à Sujidade.	38
Gráfico 6 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Escritório Verde (kWh).....	54
Gráfico 7 - Irradiação média diária no plano horizontal no Escritório Verde (kWh/m ² .dia).....	55
Gráfico 8 - Irradiação média diária no plano inclinado no Escritório Verde (kWh/m ² .dia).....	55
Gráfico 9 - Produtividade (Yield) do Escritório Verde (kWh/kWp).	56
Gráfico 10 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Escritório Verde (%).....	57
Gráfico 11 – Fator de Capacidade (FC) do Escritório Verde (%).	57
Gráfico 12 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Neville (kWh).....	58
Gráfico 13 - Irradiação média diária no plano horizontal no Neville (kWh/m ² .dia). ...	58
Gráfico 14 - Irradiação média diária no plano inclinado no Neville (kWh/m ² .dia). ...	59
Gráfico 15 - Produtividade (Yield) do Neville (kWh/kWp).	59
Gráfico 16 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Neville (%).	60
Gráfico 17 – Fator de Capacidade (FC) do Neville (%).	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. TEMA	15
1.1.1. Delimitação do Tema	17
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS	17
1.3. OBJETIVOS	18
1.3.1. Objetivo Geral	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4. JUSTIFICATIVA	19
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. ENERGIA SOLAR	23
2.2. RADIAÇÃO SOLAR.....	24
2.2.2. Componentes da Radiação Solar	27
2.2.3. Instrumentos de Medição da Radiação Solar.....	28
2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	30
2.3.1. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR)	31
2.4. ÍNDICES DE MÉRITO	35
2.5. NECESSIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	36
2.6. SUJIDADE (<i>SOILING</i>).....	37
2.6.1. Processo de Limpeza Natural	40
2.6.2. Sistemas de Limpeza Automatizados	41
2.6.2.1. Métodos de Limpeza Emergentes.....	42
2.6.3. Limpeza Manual com Água.....	45
2.6.4. Tratamento de Superfície.....	45
2.6.4.1. Superfícies Hidrofóbicas e Hidrofílicas	46
2.6.4.2. Superfícies Fotocatalíticas	48
3. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	51
3.1. LOCAIS PARA A BASE DE ESTUDO DO PROJETO.....	51
3.2. MÉTODO DE LIMPEZA UTILIZADO NESTE PROJETO.	54
3.3. ESCRITÓRIO VERDE (EV).....	54

3.4. NEOVILLE	58
3.5. ANÁLISE DOS DADOS DE ACORDO COM AS LIMPEZAS REALIZADAS ...	61
4. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO	66
4.1. COMPARAÇÃO DE DADOS DO ESCRITÓRIO VERDE	66
4.2. COMPARAÇÃO DE DADOS DO NEOVILLE	67
5. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A	80
TABELAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA MENSAL NO PLANO HORIZONTAL E INCLINADO, PRODUTIVIDADE, TAXA DE DESEMPENHO E FATOR DE CAPACIDADE DO ESCRITÓRIO VERDE E NEOVILLE.	80

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o tema, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos geral e específicos, também como a justificativa de executar esse projeto, os procedimentos metodológicos, a estrutura do trabalho, um cronograma das atividades a serem realizadas e as referências utilizadas na composição deste trabalho.

1.1. TEMA

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizada no mundo, de fundamental importância para o desenvolvimento das sociedades atuais. A energia elétrica é gerada através de várias fontes de energia, podendo ser pela água, combustíveis fósseis, biomassa, vento, sol, temperatura do planeta, força das ondas e compostos químicos (ARAÚJO, RANK e BUENO, 2016).

Em termos globais, as fontes que tem maior predominância na matriz elétrica são as provenientes de combustíveis fósseis e nucleares. Contudo há uma tendência para que se reduza a geração de energia vinda dessas fontes (REN21, 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016). A participação das fontes energéticas na produção de energia elétrica global é mostrada no Gráfico 1.

Quanto ao Brasil, este apresenta uma matriz elétrica predominantemente renovável, sendo por sua maioria as hidrelétricas (MME, 2015a). Somando algumas fontes renováveis de geração (eólica, PCH, termelétrica a biomassa e solar) apresenta-se uma expansão média anual total de 10% em capacidade instalada (EPE, 2015).

Embora as hidrelétricas sejam a maior fonte geradora de energia elétrica no país, entre 2013 e 2014 esta apresentou uma redução de 4,5% na geração de energia (MME, 2015a).

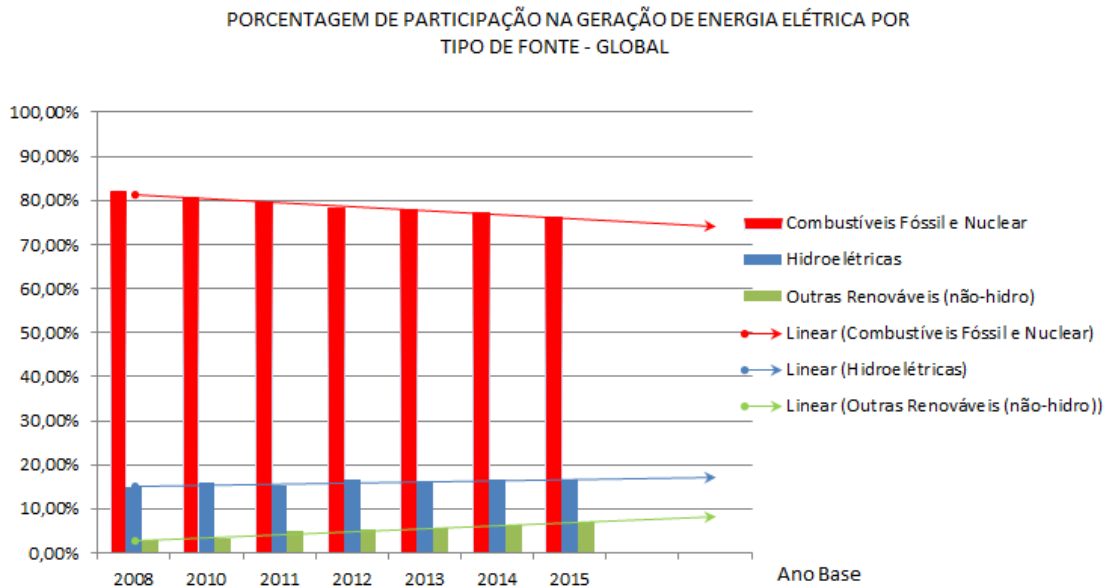


Gráfico 1 - Porcentagem de participação na geração de energia elétrica global.

Fonte: Adaptado de REN21 (2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016).

Por ser uma energia renovável, a energia solar tem apresentado maiores investimentos a cada dia, passando de 1 MW de capacidade instalada em 2010 (MME, 2015a), para aproximadamente 21 MW em 2015 (MME, 2016), e com estimativa para o ano de 2050 entre 78 GW e 118 GW apenas como geração distribuída (EPE, 2014a).

Em relação ao estado do Paraná, a maior parte da energia elétrica gerada provém de hidrelétricas com participação de 89,94% do total instalado, o que representa aproximadamente 14,5 GW, descontados os 7 GW de Itaipu do lado do Paraguai (ANEEL, 2016b). Como o potencial hídrico do estado possui dificuldade de expansão em função de pressões sociais, ambientais e públicas, é necessário que ocorram iniciativas na geração de energia elétrica por outras fontes (TIEPOLO, 2015).

Com a sociedade moderna, a qual vem se conscientizando cada vez mais quanto à necessidade de utilização de fontes renováveis, principalmente através daquelas que causam os menores impactos ao meio ambiente e a sociedade, novas fontes vêm sendo pesquisadas e aplicadas, entre elas a energia solar através de sistemas fotovoltaicos (TIEPOLO, 2015).

Entretanto, com a falta de limpeza nos painéis fotovoltaicos, ocorrem perdas nos índices de mérito como desempenho e produtividade, afetando na geração da energia elétrica dos painéis fotovoltaicos. Com isto, para se ter um sistema com

índices de mérito elevados, há a necessidade de se estudar e determinar o tempo ótimo para efetuar a limpeza dos painéis, onde nesta pesquisa serão estudados os painéis fotovoltaicos implantados no Escritório Verde e da Sede Neville da UTFPR, ambos no Câmpus Curitiba.

1.1.1. Delimitação do Tema

O tema a ser desenvolvido neste trabalho abordará sobre a determinação do tempo ótimo para limpeza de painéis fotovoltaicos, visando alta produtividade do sistema, utilizando como estudo de caso os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) instalados no Escritório Verde da UTFPR, e o instalado na cobertura da Sede Neville, Câmpus Curitiba.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

A busca por energias limpas tornou-se uma alternativa cada vez maior, em destaque a energia solar fotovoltaica que vem crescendo cada vez mais no Brasil, apesar de ainda ser uma energia pouco utilizada no país em relação a outras já exploradas. Ao final do ano de 2015 o Brasil apresentou 21 MW de capacidade instalada em energia solar (MME, 2016).

Com esse constante crescimento da energia solar fotovoltaica, cresce também a demanda aos cuidados básicos de manutenção com os equipamentos que compõem este tipo de sistema de geração de energia. Um dos aspectos mais importantes da manutenção em SFVCR é a limpeza regular da superfície do painel fotovoltaico, visto que a acumulação de sujeira ao longo do tempo ocasiona perdas de produtividade. Em meio a esses aspectos surge uma pergunta importante:

- **Qual o tempo ideal para limpeza dos painéis fotovoltaicos visando alta produtividade sem que ocorram perdas excessivas?**

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar os índices de mérito (desempenho e produtividade) dos painéis fotovoltaicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), localizados no Câmpus Curitiba, Escritório Verde e Sede Neville, instalados em condições ambientais diferentes, e determinar o intervalo considerado ideal para que seja feita a limpeza dos módulos para obter a maior produtividade anual.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Elaborar revisão bibliográfica sobre o tema energia solar, SFVCR, perda de produtividade em painéis fotovoltaicos em função do índice de sujeidade, e a importância e necessidade de se fazer a manutenção preventiva;
- Acompanhar os índices de sujeidade acumulados ao longo do tempo nos painéis fotovoltaicos da UTFPR;
- Coletar dados da produtividade dos painéis fotovoltaicos da UTFPR e verificar como os índices de sujeidade podem afetar o seu rendimento ao longo do tempo;
- Analisar os dados obtidos de produtividade dos painéis fotovoltaicos da UTFPR e compará-los, sob as diferentes condições técnicas de instalação, para saber qual dos dois painéis tem maior perda no seu desempenho ao longo de determinado tempo;
- Criar método que demonstre qual o melhor tempo para fazer a manutenção em ambos os painéis solares;
- Analisar os benefícios que este método estará proporcionando para a produtividade e desempenho do sistema de geração de energia solar;

1.4. JUSTIFICATIVA

Com o passar dos anos, o avanço das tecnologias e a sua aplicação em sistemas de energias renováveis vem aumentando a procura pela utilização no Brasil, como a energia solar fotovoltaica a qual possui um enorme potencial de utilização e causa pouco impacto ao meio ambiente e a sociedade.

O país tem apresentado um crescimento expressivo nos últimos anos na utilização da energia solar, e estima-se que o Brasil alcance 7 GW em capacidade instalada fotovoltaica até 2024, o que deverá representar 3,4% da capacidade instalada na matriz elétrica brasileira (EPE, 2015). Atualmente, esta fonte é responsável por apenas 0,02% da potência instalada no país (ANEEL, 2016a).

De acordo com Pereira *et al.* (2006), o Brasil apresenta valores altos de irradiação praticamente em todo o seu território. O mapa de irradiação Global é apresentado na Figura 1.

Em relação ao estado do Paraná, este apresenta valores de irradiação bastante expressivos, comparáveis aos melhores potenciais encontrados na Europa. Comparando a Produtividade Estimada Total Anual Média do estado do Paraná com a Europa, pôde-se verificar que a média do Paraná é 58,75% superior à Alemanha, 13,48% superior à Itália, 1,97% superior à Espanha, 31,28% superior à França, 60,46% superior à Bélgica e 71,19% superior a do Reino Unido. Esses percentuais representam a quantidade Média Total Anual de energia elétrica que um SFVCR pode gerar a mais no Paraná em relação a cada um destes países (TIEPOLO, 2015).

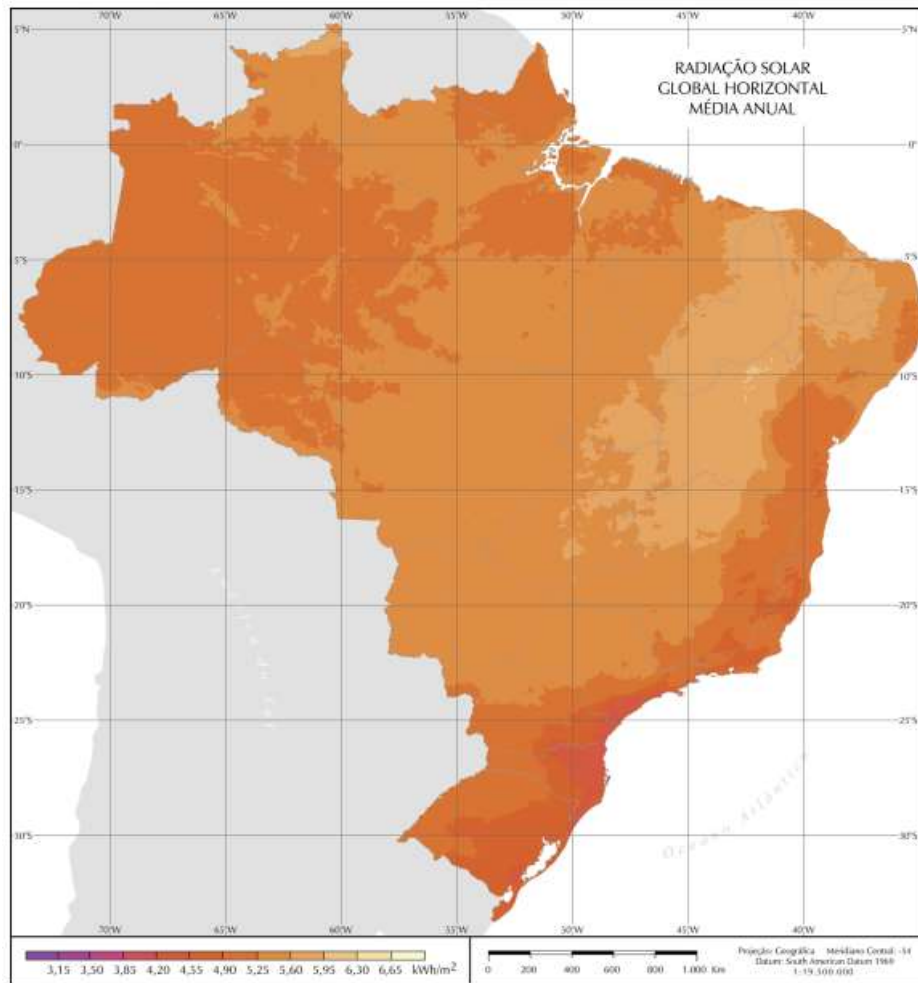


Figura 1 - Mapa de radiação solar global horizontal média diária anual do Brasil.

Fonte: PEREIRA *et al.* (2006).

Com todo esse crescimento de energia solar fotovoltaica previsto no Brasil, e que deverá ocorrer também no Paraná visto o grande potencial encontrado no estado, surge à questão de manutenção preventiva visando sempre um alto desempenho destes sistemas, sendo uma delas a limpeza dos módulos para manter a eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico (CEPEL, 2004). Além de ser importante, essa limpeza garante uma maior durabilidade dos painéis fotovoltaicos, e também aumenta a produtividade do sistema ao longo do ano, ao diminuir as perdas por bloqueio da radiação solar incidente no módulo. O acúmulo de sujeira nos painéis fotovoltaicos poderá causar manchas, fungos e corrosão nos módulos, além de diminuir a parcela de radiação solar que incidirá diretamente nas células fotovoltaicas, reduzindo a produtividade e vida útil que é estimada entre 25 a 30 anos (RENEWENERGIA, 2015).

Com relação aos painéis fotovoltaicos instalados no Escritório Verde e da Sede Neville da UTFPR, ambos no Câmpus Curitiba, até o momento não há nenhum estudo específico, detalhado e atualizado sobre o tempo ótimo para a limpeza dos painéis visando alta produtividade do sistema. Com base nas informações obtidas através deste estudo, será possível identificar o tempo ótimo para a limpeza dos painéis, e propor parâmetros e diretrizes para o desenvolvimento de um método que demonstre qual o melhor tempo para fazer a manutenção em ambos os painéis fotovoltaicos.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As atividades necessárias que foram realizadas nesse trabalho são as seguintes:

- Realizar pesquisa bibliográfica a respeito da energia solar, SFVCR, perda de produtividade em painéis fotovoltaicos em função do índice de sujidade, e a importância e necessidade de se fazer a manutenção preventiva;
- Analisar os painéis fotovoltaicos instalados no Escritório Verde e Sede Neville, principalmente no que diz respeito aos índices de mérito;
- Coletar dados dos índices de sujidade e de índices de mérito dos painéis;
- Organizar a limpeza dos painéis para a coleta de dados;
- Analisar os dados obtidos antes e depois da limpeza, a fim de verificar qual painel possui maior perda no desempenho;
- Desenvolver uma metodologia que vise determinar o tempo ótimo para a limpeza, visando alta produtividade e desempenho dos painéis fotovoltaicos;

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

- O primeiro capítulo será sobre a introdução, apresentando o tema de pesquisa, problemas, objetivos, justificativa, procedimentos metodológicos, estrutura do trabalho e cronograma;
- O segundo capítulo abordará a respeito da fundamentação teórica sobre SFVCR, os índices de mérito e a necessidade de manutenção preventiva dos painéis fotovoltaicos da UTFPR, Câmpus Curitiba, Sede Centro – Escritório Verde e Sede Neoville;
- No terceiro capítulo serão coletados dados de índice de mérito dos painéis do Escritório Verde e da Sede Neoville da UTFPR, analisando os resultados obtidos antes e depois da limpeza, em função da sujidade existente de acordo com ambiente em que cada um se encontra;
- O quarto capítulo conterà a metodologia para determinar o tempo ótimo para a limpeza dos painéis fotovoltaicos e a comparação entre os painéis para verificar qual apresenta maior perda de desempenho em determinado período de tempo;
- O quinto capítulo conterà a conclusão final da pesquisa, e propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros sobre o tema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ENERGIA SOLAR

No horizonte de 2050 tem-se uma projeção de demanda para o país de aproximadamente 1.624 TWh (EPE, 2014). Comparando com o consumo em 2015 de 581,486 TWh (MME, 2016), a diferença de demanda de energia elétrica que necessitará ser suprida será de aproximadamente 1.043 TWh.

O país apresenta no seu histórico a participação predominantemente da fonte hidráulica na sua matriz elétrica, conforme mostra o Gráfico 2. Todavia sua expansão não apresenta um estímulo considerável, visto que os impactos ambientais e sociais não facilitam a implantação de novas usinas. Uma alternativa para este complemento são as fontes renováveis de energia não hídricas como a eólica e a solar, que apresentaram juntas um crescimento significativo nos anos de 2014 e 2015, com a eólica crescendo cerca de 77,1%, e a solar fotovoltaica com exorbitantes 266,4%, apesar desta última ainda ser pouco representativa na capacidade instalada total no país (MME, 2016).

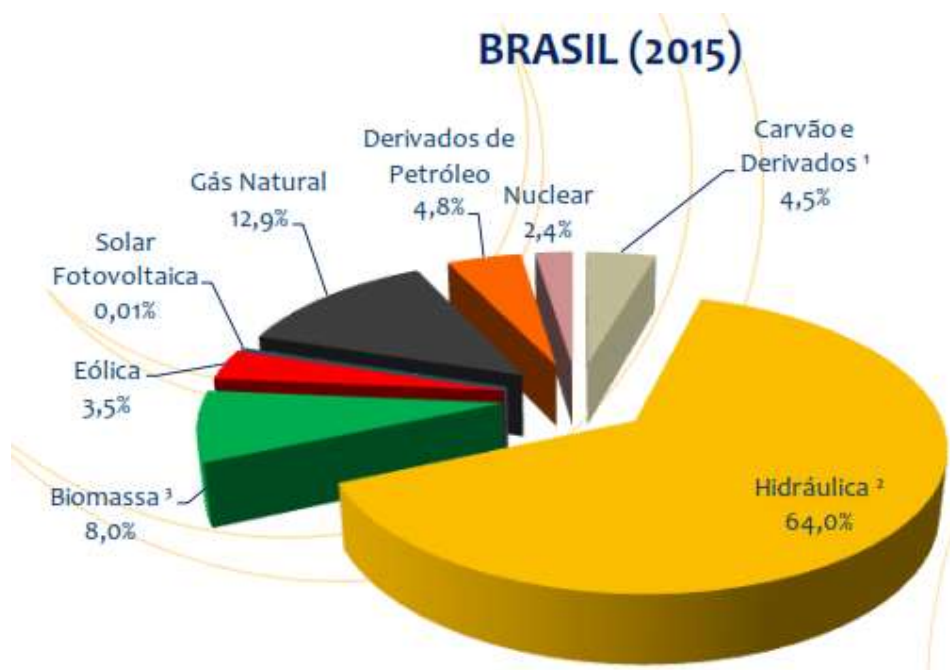


Gráfico 2 - Participação das fontes na matriz elétrica brasileira.

Fonte: MME (2016).

A energia solar pode ser aproveitada basicamente de duas maneiras, sendo na forma térmica para aquecer ambientes e fluidos, como também na forma de geração de energia elétrica por meios termoelétricos ou fotovoltaicos (ANEEL, 2005).

2.2. RADIAÇÃO SOLAR

O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia, pois é a partir de sua energia que ocorre os fenômenos como evaporação, dando origem ao ciclo das águas, induz a circulação atmosférica em larga escala causando os ventos, e combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás natural, gerados a partir dos resíduos (PINHO e GALDINO, 2014).

As utilizações realizadas com a energia solar foram enormes ao longo da história, e vão desde a obtenção da iluminação natural dos ambientes através da reflexão e concentração da radiação em espelhos, até mais recentemente para a geração de energia elétrica (TIEPOLO, 2015).

O Sol fornece energia na forma de radiação, sendo necessária para a existência de vida na Terra. A energia é gerada no núcleo solar, através da fusão dos núcleos dos átomos de hidrogênios em átomos de hélio, e durante este processo, parte da massa do hidrogênio é transformada em energia. Neste processo, devido à conversão de matéria, uma enorme quantidade de energia é liberada. No entanto, devido a distância do Sol até a Terra ser gigantesca, apenas uma pequena quantidade da radiação solar atinge a superfície terrestre (GREENPRO, 2004), (DGS, 2008).

2.2.1. Irradiância e Irradiação

Quando se fala em radiação solar pode estar se referindo a irradiância ou a irradiação. Em função dessas relações de conceitos, foi elaborada uma norma que padroniza os principais termos técnicos referentes à energia solar fotovoltaica

utilizados no Brasil, a norma brasileira NBR 10899:2006 - “Terminologia sobre Energia Solar Fotovoltaica” (ABNT, 2006). A seguir são apresentados, a partir da NBR 10899, os termos referentes à irradiância e irradiação:

- Irradiância solar (G): Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em (W/m^2).
- Irradiação solar (I) ou (H): Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo específico, normalmente uma hora ou um dia, medida em (Wh/m^2 ou J/m^2).

Também chamada de intensidade de radiação solar, a irradiância é a potência solar instantânea que atinge uma determinada área na superfície terrestre. Seu valor depende da distância entre o Sol e a Terra e varia de acordo com a posição relativa entre ambos ao longo do ano devido ao movimento elíptico de translação que o planeta descreve (PINHO e GALDINO, 2014). Na Figura 2 é possível observar o movimento elíptico de translação da Terra.



Figura 2 - Movimento elíptico de translação da Terra.

Fonte: ANEEL (2005).

Em geral esta intensidade tem o valor de $1367 \text{ W}/\text{m}^2$, denominada de constante solar (G_{cs}). Devido aos efeitos atenuantes da atmosfera, como reflexão, absorção (por ozônio, vapor de água oxigênio e gás carbônico) e espalhamento (por

moléculas de ar, partículas em suspensão e poluição), este nível de irradiância não é alcançado na superfície terrestre (PINHO e GALDINO, 2014).

As diversas alterações nas características da radiação solar dependem da composição e da espessura da camada atmosférica, conhecida como Massa de Ar. A espessura dessa massa resulta da distância que a radiação solar direta percorre até a superfície e, esta distância por sua vez, depende do ângulo de inclinação do Sol em relação a vertical local (Zênite), conhecido como ângulo zenital do Sol (θ) (PINHO e GALDINO, 2014).

Portanto, quanto maior a latitude do local, maior será o desvio em relação ao zênite e conseqüentemente maior a atenuação devido ao aumento da camada da atmosfera que os raios solares devem atravessar (BOYLE, 2004). Na Figura 3 é apresentada a variação da camada da atmosfera que é atravessada pelos raios solares em função do ângulo de incidência.

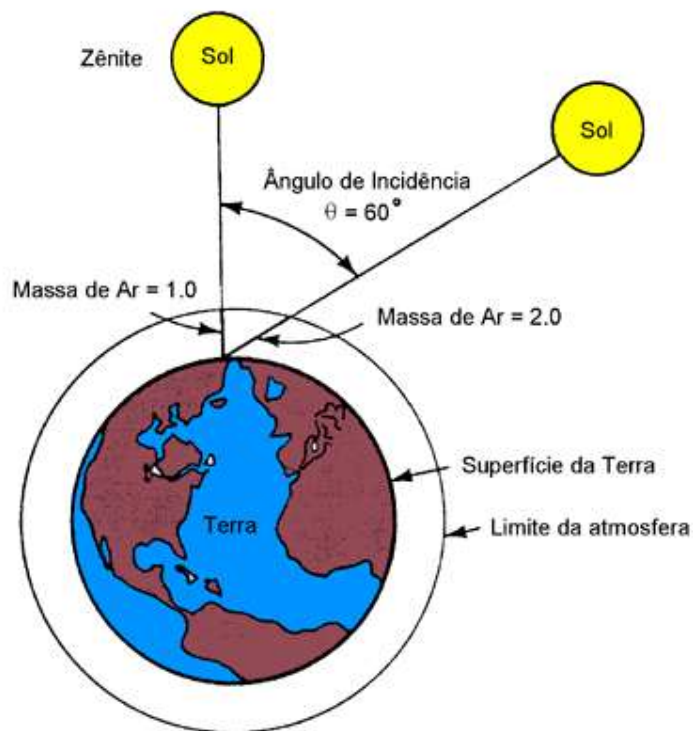


Figura 3 - Espessura da massa de ar que é atravessada pelos raios solares.

Fonte: CRESESB (2006).

A disponibilidade de radiação solar também dependerá das condições climáticas e da posição relativa do ponto estudado em relação ao sol. A irradiância média que atinge a superfície da Terra, com o Sol a pino, sem nuvens, é de

aproximadamente 1.000 W/m^2 , sendo este o valor geralmente utilizado como parâmetro para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (BOYLE, 2004).

2.2.2. Componentes da Radiação Solar

A radiação solar incidente na superfície da terra é composta por duas componentes: a radiação direta e difusa, conforme mostrado na Figura 4. A radiação direta é uma fração da radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer alteração, processo de espalhamento ou reflexão em sua direção. Já a radiação difusa refere-se à componente da radiação solar que, ao atravessar a atmosfera, sofre espalhamento causado por nuvens e outros componentes da atmosfera que estão em suspensão. A soma dessas radiações chama-se radiação solar global horizontal (TIEPOLO, 2015).



Figura 4 - Componentes da Radiação Solar.

Fonte: TIEPOLO (2015).

Há, ainda, uma terceira contribuição para a irradiação denominada albedo, a qual é a fração de radiação solar incidente proveniente da reflexão dos raios a partir

de um corpo ou uma superfície (vegetação, solo ou construções civis). Em termos geográficos, o albedo representa a relação entre a quantidade de luz refletida pela superfície terrestre e a quantidade de luz recebida pelo Sol. Esta relação varia tanto com os tipos de materiais existentes na superfície terrestre quanto com a inclinação dos raios solares, e conforme essa inclinação aumenta o albedo também aumentará (KNOOW, 2007).

2.2.3. Instrumentos de Medição da Radiação Solar

As medições de radiação solar na superfície terrestre são essenciais para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas, como também para o desenvolvimento de projetos que visam à captação e a conversão de energia solar. Com um histórico dessas medidas é possível analisar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico, a fim de garantir um máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano. A primeira análise é do local a ser instalado, verificando se nessa localização é ou não possível captar os raios necessários para a geração. A segunda é o dimensionamento do painel para a área estudada, e a terceira é o cálculo de produção de energia elétrica.

O objetivo da medição dos dados solares é a obtenção experimental do valor instantâneo do fluxo energético solar (irradiância) ou integrado (irradiação) ao longo de tempo (minuto, hora, dia ou ano) (PINHO e GALDINO, 2014).

Dentre os equipamentos mais utilizados para medição solar, estão o piranômetro e o pireliômetro.

O piranômetro é um instrumento utilizado para obter a radiação global, quando instalado no plano horizontal (radiação direta e difusa), e a radiação total quando instalado em um plano inclinado (radiação direta, difusa e albedo). Sua composição varia de acordo com o tipo do equipamento: termoelétrico ou o fotovoltaico.

O piranômetro termoelétrico compõe-se por sensor de termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca uma diferença de potencial que ao ser

medida possibilita a relação do valor da irradiância solar incidente (PINHO e GALDINO, 2014). A Figura 5 mostra um exemplo de piranômetro termoeletrico.



Figura 5 - Piranômetro termoeletrico.

Fonte: PINHO e GALDINO (2014).

O piranômetro fotovoltaico é baseado em fotocélula, que basicamente utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para fazer a medição da irradiância solar, ilustrado na Figura 6. Este modelo apresenta maior sensibilidade apesar das medidas menos precisas e é bastante utilizado devido ao seu baixo custo comparado aos termoeletricos (PINHO e GALDINO, 2014).

Pireliômetros são instrumentos que medem a radiação direta incidente sobre uma superfície. Apresentam uma pequena abertura que permite visualizar somente o disco solar e a região vizinha, denominada circunsolar. O instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor (PINHO e GALDINO, 2014). A Figura 7 mostra um exemplo de pireliômetros.



Figura 6 - Piranômetro Fotovoltaico.
Fonte: PINHO e GALDINO (2014).



Figura 7 – Pireliômetro.
Fonte: PINHO e GALDINO (2014).

2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O processo de obtenção de energia elétrica proveniente da radiação solar, se faz pela conversão direta da luz do sol em eletricidade através do efeito fotovoltaico. O componente fundamental para a geração de energia elétrica é pela célula

fotovoltaica, a qual ainda é interligada de forma série ou paralelo a fim de constituir o módulo fotovoltaico (URBANETZ, 2010).

A célula fotovoltaica pode ser constituída por algumas tecnologias, tais como: silício cristalino (c-Si), o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e outros compostos relacionados ao disseleneto de cobre (Cu) e índio (I) entre outros (MARINOSKI *et al.*, 2004). A célula fotovoltaica é a parte principal dos sistemas fotovoltaicos, onde nela há a incidência de raios solares e aparecimento de uma tensão, transformando a energia da forma de luz (foto) na forma de energia elétrica em volts (voltaico), logo a composição do nome fotovoltaico (AMÉRICADOSOL, 2016).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser basicamente de dois tipos: sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), os quais normalmente são instalados em locais com nenhum acesso à energia elétrica e também necessitam de uma forma de armazenamento dessa energia, como um banco de baterias; ou em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFVCR) que são vistos como uma forma de geração distribuída, sendo eles próximos dos locais de consumo (URBANETZ, 2010).

2.3.1. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR)

Os SFVCR são compostos principalmente por painéis fotovoltaicos (composição de um conjunto de módulos fotovoltaicos, os quais são constituídos pelas células fotovoltaicas), e inversores que convertem a corrente contínua proveniente dos módulos, em corrente alternada utilizada geralmente nas residências e indústrias (URBANETZ, 2010). Visto que os SFVCR não necessitam de um local para armazenar energia, tal como os SFI utilizando bancos de baterias, os SFVCR dispensam o empecilho com a manutenção do banco de baterias, pois a vida útil das baterias é menor se comparada com a dos módulos fotovoltaicos. Outra vantagem é o fato de toda energia do SFVCR ser utilizada, conseqüentemente apresentando uma maior produtividade ao longo do ano.

Os painéis fotovoltaicos possuem a função de converter a energia radiante do sol e disponibilizá-la para o usuário em forma de energia elétrica, seguindo o

esquema de geração de energia por corrente contínua no painel fotovoltaico, passa para o inversor onde converte a corrente contínua em corrente alternada, e em seguida para as cargas do local de geração, caso esta esteja sendo consumida totalmente, ou injetando o excedente da energia elétrica gerada para a rede de distribuição urbana (BENEDITO, 2009).

Há também a presença de um medidor bidirecional de energia, que calcula a quantidade de energia que é gerada pelos módulos e injetada na rede elétrica, e a quantidade de energia que está sendo consumida no mês, sendo que ao final do mês faz-se o cálculo, a fim de se realizar um balanço energético no mês e determinar a quantidade de energia excedente à consumida e que gerará créditos a serem consumidos nos meses seguintes (PRÁTIL, 2015). A Figura 8 apresenta a composição básica de um SFVCR.

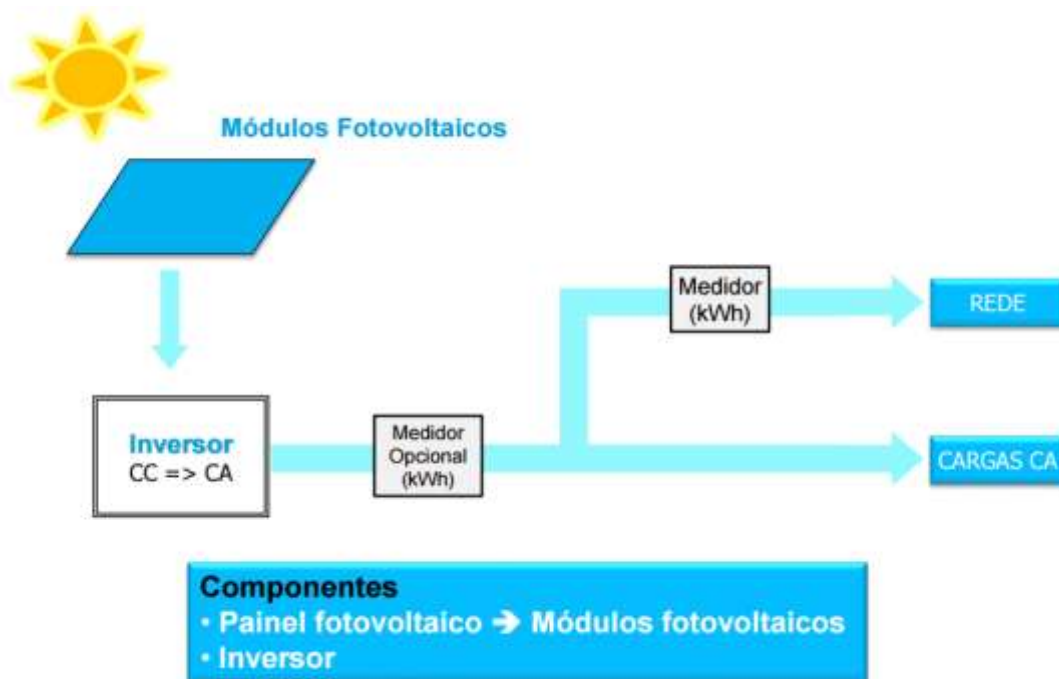


Figura 8 - Diagrama de um SFVCR.

Fonte: URBANETZ (2014).

A energia solar fotovoltaica apresentou um crescimento exponencial na sua capacidade instalada global nos anos de 2005 a 2015, como ilustrado no Gráfico 3. Em 2015 o mercado mundial apresentou um recorde no crescimento da quantidade de capacidade instalada adicionada no ano, sendo de 25% de crescimento com relação ao ano de 2014, onde 50 GW foram adicionados em SFVCR. Os 10 países

com a maior capacidade instalada e a quantidade que foi adicionada no ano de 2015 são apresentados no Gráfico 4 (REN21, 2016).

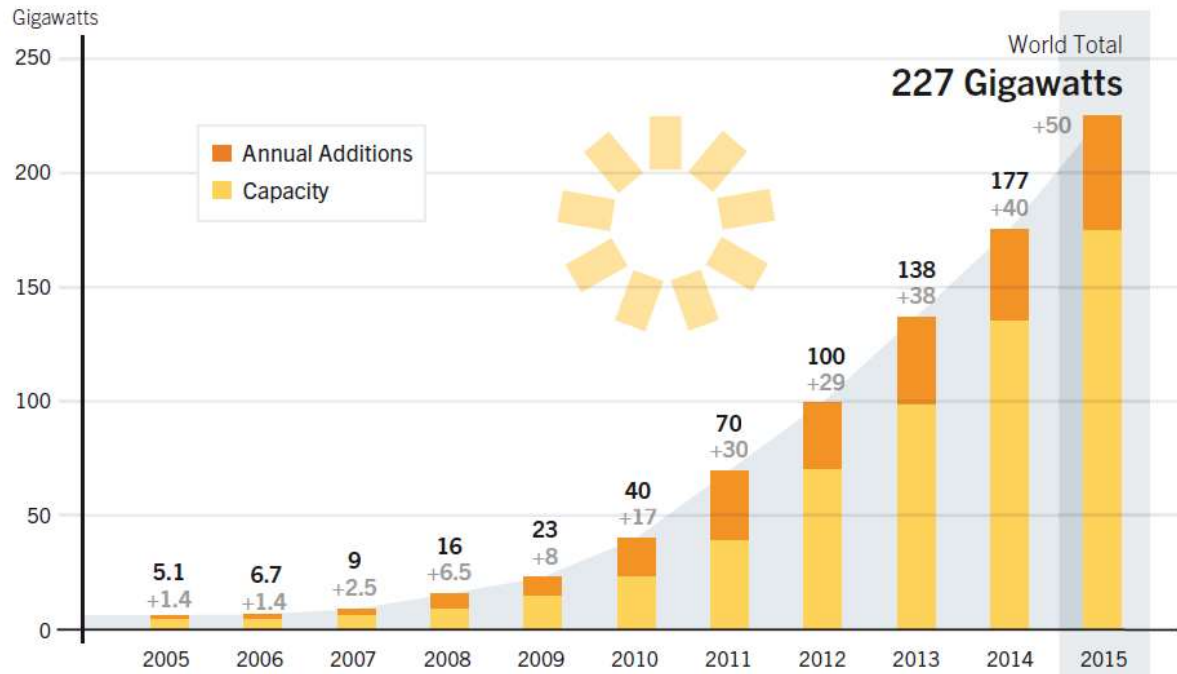


Gráfico 3 - Capacidade Instalada Mundial de SFVCR.

Fonte: REN21 (2016).

Alguns países possuem incentivos para a disseminação desse tipo de fonte geradora de energia elétrica, e mesmo o Brasil possuindo uma maior incidência solar e a tarifa de energia elétrica estar em patamar parecido com a de alguns países, ainda não apresenta um incentivo por todo o seu território (EPE, 2014b).

A ANEEL simplificou e padronizou os métodos para o incentivo de geração de energia proveniente de pequenas centrais eólicas e de painéis solares. Da mesma forma o CONFAZ (Conselho Nacional de Política Fazendária) deixou a critério dos estados escolherem se queriam aderir à isenção da cobrança do ICMS sobre a energia elétrica inserida pelo consumidor na rede da distribuidora e depois compensada. Com isto, 21 estados brasileiros e o Distrito Federal já aderiram a esse incentivo para a maior incentivo a implementação de SFVCR (ICMS16, 2015). Dessa maneira, o valor que será cobrado do consumidor será a diferença entre a energia elétrica gerada e injetada na rede, e seu consumo. Por exemplo, considerando um consumidor injetando 300 kWh na rede de energia elétrica excedente em determinado mês e consumindo 500 kWh no mesmo mês, logo irá

pagar somente por 200 kWh, ou seja, a diferença entre a energia elétrica injetada e a consumida, ambas medidas pelo medidor bidirecional (Ambiente e Energia, 2015).

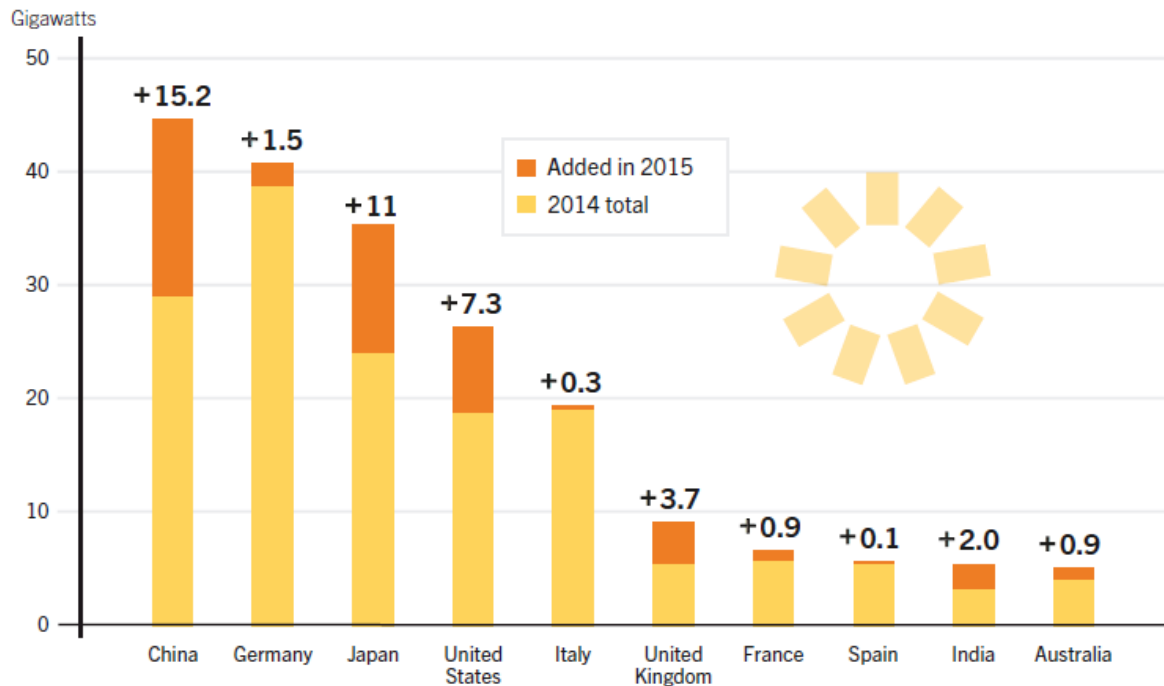


Gráfico 4 - Os 10 Maiores Países com relação à capacidade instalada.

Fonte: REN21 (2016).

Também foi apresentado outro incentivo para a disseminação da fonte solar fotovoltaica, com a isenção dos tributos PIS/Pasep e COFINS na energia elétrica injetada na rede elétrica pelo consumidor a ser compensada (BRASIL, 2015). Outros métodos para a ampliar a geração de fontes renováveis de forma distribuída também foram implementadas, como a redução do impostos por importação até 31 de dezembro de 2015, e apoio do BNDES em fornecer taxas especiais para projetos que envolvam geração distribuída e eficiência energética em escolas e hospitais públicos (MME, 2015b).

Até outubro de 2016 o país possuía aproximadamente 32 MWp instalados no território nacional em micro e mini geração, sendo o estado do Paraná com aproximadamente 2,1 MWp (ANEEL, 2016c). Caso o incentivo seja mais efetivo, a quantidade de SFVCR tende a crescer substancialmente.

2.4. ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito são indicadores utilizados para fazer comparações entre os sistemas fotovoltaicos em todo o mundo e com diferentes potências. Podem ser relacionados à Produtividade (*Yield-Y*), ao Fator de Capacidade do sistema (FC) e ao Desempenho Global (*Performance Ratio*) (PAULA *et al.*, 2015) (URBANETZ, 2014).

Inicialmente a Produtividade (*Yield-Y*) é explicada como a relação entre a energia elétrica gerada em função da potência total do SFVCR instalado. Assim, é possível comparar o desempenho entre diferentes sistemas, numa mesma relação kWh/kWp. A Equação 1 demonstra tal índice (PAULA *et al.*, 2015) (RAMPINELLI *et al.*, 2014) (URBANETZ, 2014).

$$Y = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Potência do Sistema Fotovoltaico (kWp)}} \quad (1)$$

O Fator de Capacidade (FC) é definido pela relação entre a energia gerada durante determinado tempo e o valor teórico da energia que poderia ser gerada, caso o sistema operasse 24 horas na sua potência nominal durante determinado período, geralmente um ano. A Equação 2 apresenta tal índice (PAULA *et al.*, 2015) (RAMPINELLI *et al.*, 2014) (URBANETZ, 2014).

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência do Sistema Fotovoltaico} * 24h * \text{Dias}} (\%) \quad (2)$$

O Desempenho Global ou Taxa de Desempenho, também conhecido como *Performance Ratio* (PR) é a relação entre a Produtividade do sistema (*Yield*) e a Produtividade de Referência, sendo esta última a relação entre a Irradiação do local e a irradiância de referência (1000 Wp), sendo o valor resultante adimensional. A Equação 3 apresenta esse índice (PAULA *et al.*, 2015) (RAMPINELLI *et al.*, 2014) (URBANETZ, 2014).

$$PR = \frac{Yield}{Yield\ Refer\ência} (\%) = \frac{Yield}{Irradia\c{a}\tilde{o}/1000} (\%) \quad (3)$$

Com a presença de tais índices   possível determinar se com o passar do tempo os painéis sofreram alguma modificação com relação as perdas no sistema, seja elas por sombreamento, danificação dos módulos e principalmente sujeira acumulada (URBANETZ, 2014) (TIEPOLO, 2015).

2.5. NECESSIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Primeiramente   necessário ver onde estão localizados os painéis fotovoltaicos, a fim de se verificar o ambiente em que o painel está instalado, podendo ter influência de agentes externos como edificações próximas que possam ocasionar a diminuição da radiação incidente nos painéis pelo sombreamento parcial, assim como árvores com depósito de folhas e sombreamento. Também é preciso considerar se está próximo de algum lugar com muito fluxo de veículos, os quais emitem poeira e fuligem que, em suspensão, acabam por se depositar sobre os módulos fotovoltaicos, comprometendo seu rendimento. Não podendo deixar de lado também a presença de animais que possam sujar os módulos, como as aves (RENEWENERGIA, 2015).

Alguns métodos de manutenção preventiva, visando o melhor desempenho dos sistemas fotovoltaicos, compõem da inspeção dos cabos, conexões e terminais que constituem todo o sistema. Também   necessário que se verifique o inversor, onde nele apresenta, se houver, a presença de sujidades como poeiras e outros dejetos. E principalmente o painel em si, onde é possível observar claramente se existe algum inconveniente que esteja influenciando o desempenho do sistema fotovoltaico (SOLARWATERS, 2016).

Em ambientes em que há grande quantidade de poeira, ter períodos muito longos sem a realização da limpeza dos painéis pode prejudicar significativamente o desempenho do sistema. No Brasil já foram encontrados casos de até 10% de perda

na taxa de desempenho do sistema (PINHO e GALDINO, 2014). A Figura 9 mostra o estado de um painel fotovoltaico com uma grande quantidade de sujeira, onde escreveram em inglês “*clean me!*”, ou “me lave”.



Figura 9 - Painel “Clean me!”.

Fonte: EFEITOSOLAR (2016).

Caso haja sujeiras como dejetos de animais e folhas, é recomendado que se faça uma limpeza mensalmente, somente com o uso de água, panos ou auxílio de alguma ferramenta não nociva ao painel (PINHO e GALDINO, 2014) (RENEWENERGIA, 2015).

Neste trabalho será analisado especificamente os efeitos provenientes da sujeira acumulada nos painéis e conseqüentemente das melhorias ocasionadas das limpezas realizadas.

2.6. SUJIDADE (*SOILING*)

A radiação solar fornece valores de irradiação de forma desigual em todo o globo terrestre, desse modo os painéis solares sempre apresentarão desempenhos diferentes. Todavia, com as equações anteriores citadas, é possível verificar este desempenho de forma igualitária, colocando todos os sistemas num mesmo parâmetro.

Como as células fotovoltaicas são organizadas em série e paralelo para formar um módulo fotovoltaico, caso ocorra o sombreamento (um fator que limita a quantidade de corrente que passa pelas células) em alguma parte do módulo, as outras células que estão em série seguirão o mesmo valor de corrente, diminuindo a quantidade de energia que poderia ser gerada (HICKEL *et al*, 2016)

O termo sujidade ou sujeira não é somente a acumulação de poeira nos painéis, mas também de fuligem, compostos de plantas, excrementos de animais, principalmente pássaros, sais e crescimento de espécies orgânicas como musgos. Todos esses elementos compõem a sujidade e limitam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Há ainda outros fatores que comprometem o desempenho do sistema, como a temperatura, principalmente nas células mono e poli cristalinas de silício, velocidade relativa do vento, umidade do ar, corrosão e limitações dos componentes que compõem o sistema (SAYYAH *et al.*, 2014). Para se ter uma ideia de quanto é a perda de energia por sujidade tem-se a Gráfico 5 para apresentar tais valores.

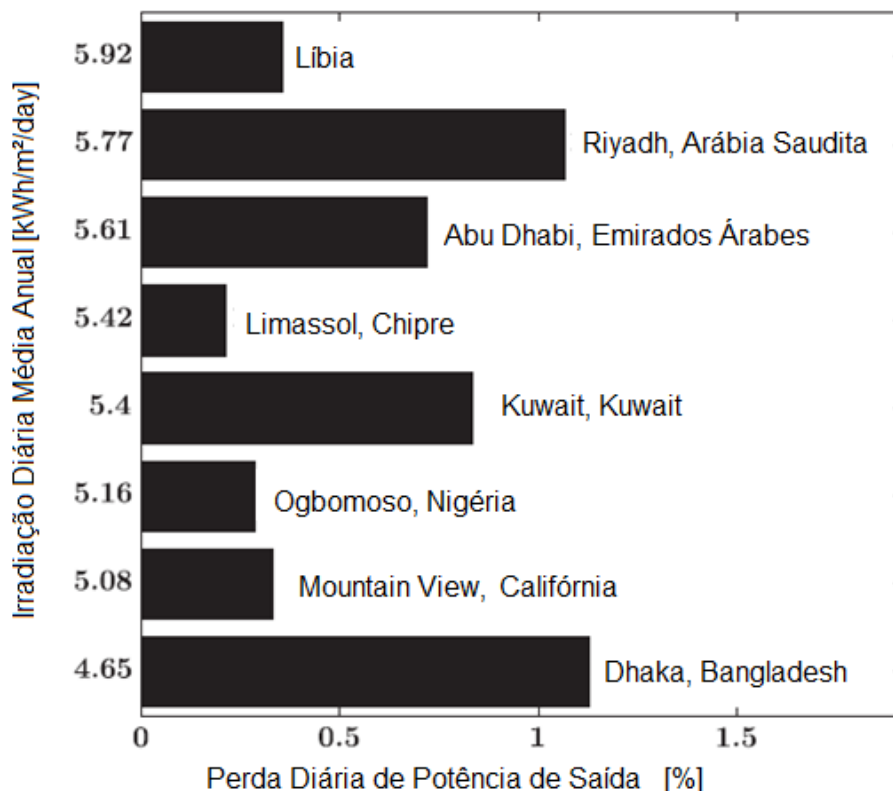


Gráfico 5 - Perdas Diárias em diferentes partes do Mundo devido à Sujidade.

Fonte: Adaptado de SAYYAH *et al.* (2014).

Alguns fatores relevantes na determinação da energia perdida proveniente da sujeira encontrada nos painéis são: o ângulo de inclinação do painel e o tamanho da partícula incidente nos módulos.

A inclinação do painel é muito relevante com relação à quantidade de poeira acumulada, visto que se estiver a uma inclinação de 0° , a quantidade de depósitos no painel será de grande intensidade, e caso seja 90° a limpeza proveniente das chuvas, junto com a ação da gravidade no painel, proverá com que o mesmo se mantenha com uma menor quantidade de sujeira no módulo, contudo ainda formando camadas de poeira (SAYYAH *et al.*, 2014). É recomendado que se possua uma inclinação mínima de 10° , como em locais próximos à linha do equador onde apresentariam inclinações menores que 10° devido à latitude do local. Adicionando essa inclinação mínima, faz-se a limpeza automática mínima necessária para não comprometer o sistema fotovoltaico (PINHO e GALDINO, 2014). No caso de Curitiba, por exemplo, seria necessária a instalação dos painéis com ângulo na inclinação de 25° (Latitude de Curitiba).

O tamanho da partícula que incide no painel também é de grande importância. Partículas menores comprometem mais o sistema, corroendo-o, do que aquelas partículas que apresentam dimensões maiores. Foi realizado um estudo onde partículas grandes (diâmetro maior que $75 \mu\text{m}$) apresentaram de 12 a 20% menos corrosão nos módulos do que partículas pequenas (diâmetro menor que $75 \mu\text{m}$) (SAYYAH *et al.*, 2014).

Para um excelente desempenho das células fotovoltaicas, é fundamental que ocorra uma boa transmitância da superfície que recobre os módulos. A deposição da poeira produzida nos arredores, devido à poluição ou fenômenos naturais, está relacionada às condições ambientais nas quais a superfície está exposta.

Normalmente em locais onde os níveis de radiação são mais elevados, existe baixo índice de precipitação de chuva e o efeito do acúmulo de sujeira, também conhecido como efeito *soiling*, é mais grave (SILVA, 2016). A chuva é um grande aliado na redução de sujeira, pois produz a limpeza natural da superfície.

Alguns métodos são realizados com objetivo de manter o painel com uma limpeza adequada, conseqüentemente otimizando seu desempenho. A Figura 10 apresenta algumas técnicas de limpeza.



Figura 10 - Agentes de Limpeza de painéis fotovoltaicos.

Fonte: LEMOS *et al.* (2016) e SAYYAH *et al.* (2014).

Segundo Vivar *et al.* (2008), as sujidades diminuem a transmitância dos módulos fotovoltaicos devido ao espalhamento da radiação incidente, reduzindo a intensidade que chega à célula fotovoltaica. Em particular, painéis fotovoltaicos com sistema ópticos concentradores (CPV) podem apresentar perda de até 26% da corrente gerada quando o painel está sujo.

2.6.1. Processo de Limpeza Natural

A precipitação é considerada o agente de limpeza natural mais eficiente para a remoção de partículas contaminantes das superfícies fotovoltaicas, restaurando assim o desempenho dos módulos. De acordo com Appels *et al.* (2012), a chuva tem efeitos restauráveis suficientes para tornar a limpeza manual regular da superfície fotovoltaica desnecessária.

Em painéis fotovoltaicos que possuem sistema de monitoramento solar a posição dos painéis deve ser inclinada para ajudar a limpeza através da chuva. Em posições quase horizontais, as chuvas leves que incluem sal solúvel geralmente deixam manchas de água indesejáveis. Após um período de tempo de exposição, estas manchas empoeiradas acumulam-se como resíduos, formando camadas de poeira fortemente aderentes que não podem ser removidas sem lavagem manual com detergente. Esta camada de sujeira é prejudicial ao desempenho do módulo,

sendo indispensável uma limpeza imediata após tais eventos para restaurar a eficiência do sistema (BETHEA *et al.*, 1981). Segundo AlBusairi e Möller (2010), o sistema de rastreamento, para realizar a alteração da posição de inclinação dos painéis fotovoltaicos, é o sistema mais viável para a utilização da chuva como meio de limpeza.

O vento, assim como a chuva, também tem um duplo papel no desempenho dos painéis fotovoltaicos. O vento carrega a poeira e causa a sujeira nos painéis, pois é o principal meio de transporte para transportar as partículas pelo ar. Como lado positivo, o vento pode reduzir a sujidade dos painéis removendo partículas maiores de poeira das superfícies, além de reduzir a umidade relativa do ambiente e a temperatura de painéis fotovoltaicos constituídos por células solares c-Si à medida que sua velocidade aumenta, melhorando assim a eficiência do sistema (MEKHILEF *et al.*, 2012). Em contrapartida, o efeito de limpeza do vento não é muito eficiente para partículas menores que 50 μm , pois partículas menores aderem à superfície e resistem à remoção pelo vento, mesmo com velocidades de ar maiores que 50 m/s (CUDDIHY, 1983).

2.6.2. Sistemas de Limpeza Automatizados

O processo de limpeza automatizado consiste em usar dispositivos mecânicos controlados por computador para automatizar o procedimento de limpeza, a fim de minimizar o uso de água e manter a eficiência do módulo fotovoltaico a um nível aceitável (SAYYAH *et al.*, 2014).

Em estudo realizado por Tejwani e Solanki (2010), foi desenvolvido e testado um sistema integrado de monitoramento solar de um único eixo equipado com um mecanismo de limpeza visando maximizar a produção de energia de um módulo fotovoltaico. O sistema de seguimento de ângulo azimutal, que compreende um microcontrolador, motor de passo e caixa de engrenagens, inicia a sua rotação de uma posição perpendicular à Terra inicial às 6 AM, e completa a sua rotação 360 graus em 24 h utilizando passos de 15 graus, mantendo o seu ângulo normal de radiação solar durante o dia. A superfície do módulo fotovoltaico torna-se perpendicular ao solo duas vezes por dia. Nesse momento, uma escova montada

sobre uma haste deslizante limpa o sistema, gira, então segue um percurso para cima e para baixo devido à gravidade. Assim, o módulo fotovoltaico é escovado duas vezes por dia nessa configuração. A eficácia do projeto foi verificada comparando-se a produção de energia diária, onde o módulo de rastreamento com equipamento de limpeza mostrou um aumento de 15% em comparação com o de um módulo equipado apenas com um sistema de rastreamento.

De acordo com Ju e Fu (2011), a limpeza robótica reduz o consumo de água, mas aumenta os custos de instalação e manutenção. Em seu estudo, dois sistemas fotovoltaicos idênticos foram expostos ao ar livre. Um dos sistemas fotovoltaicos foi equipado com um sistema de limpeza automatizado composto de um motor elétrico e uma escova com água pulverizada, enquanto o outro foi deixado sozinho para ser limpo por precipitação natural. O sistema fotovoltaico equipado com sistema de limpeza automatizado entregou mais potência de saída, em comparação com o sistema fotovoltaico limpo naturalmente. No entanto, o custo de operação do sistema de limpeza automatizado, incluindo água e energia consumida, foi mais alto durante o mesmo período.

2.6.2.1. Métodos de Limpeza Emergentes

Os métodos emergentes de limpeza consistem na criação de meios alternativos de limpeza através de avanços contemporâneos e inovações em diversos campos da tecnologia, a fim de reduzir os custos com o uso de água e de mão-de-obra e manter a eficiência dos painéis fotovoltaicos em padrões satisfatórios. O alto custo da água e da mão-de-obra em limpeza automatizada tem potencial para ser um fator significativamente proibitivo, o que faz necessário a utilização de métodos alternativos de limpeza (JU e FU, 2011).

Até hoje a maioria dos processos automatizados de limpeza aplicados utilizam mecanismos mecânicos e motorizados complexos, que ainda não são consideráveis econômicos ou confiáveis. Muitas vezes é difícil ou impraticável ter uma equipe de técnicos disponíveis para manter a operação dos robôs de limpeza, principalmente em instalações autônomas em áreas remotas. As operações de limpeza em grande escala requerem grandes quantidades de água anualmente, o uso de veículos

especialmente projetados e uma equipe de operações experiente, que tornam os métodos caros e muitas vezes difíceis de implementar (SAYYAH *et al.*, 2014).

Um exemplo que vem sendo estudado é uma forma alternativa para a limpeza usando forças eletrostáticas para remoção de poeira, chamadas de telas eletrodinâmicas (EDS). O princípio fundamental dos EDS foi introduzido na década de 1970 e mostra que uma onda viajando através de um campo elétrico poderia transportar partículas de aerossol carregadas em uma direção transversal. Um EDS consiste em uma série de eletrodos alternados embutidos em um filme dielétrico transparente e aplicados à superfície do painel solar. O processo de remoção de poeira não requer água ou partes móveis, e pode ser implementado com a frequência necessária, sem interromper o funcionamento do sistema (MAZUMDER *et al.*, 2013).

Os eletrodos transparentes podem ser depositados nas placas de cobertura de vidro dos módulos fotovoltaicos ou na superfície frontal dos espelhos solares. O filme dielétrico cobre e protege os eletrodos da degradação ambiental. Os eletrodos são ativados por tensões de baixa frequência e produzem um campo elétrico na superfície do filme dielétrico que varia com o tempo. As partículas de poeira que residem na superfície são carregadas eletricamente por forças dielétricas e levitam, sendo transportadas através da superfície para fora do módulo fotovoltaico, restaurando a sua eficiência (MAZUMDER *et al.*, 2013). A Figura 11 mostra uma vista esquemática do EDS em funcionamento.

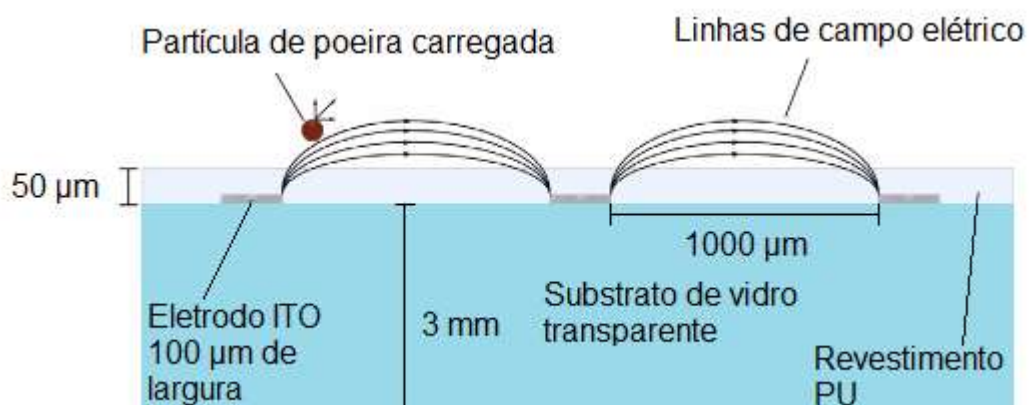


Figura 11 – Seção transversal da tela eletrodinâmica (EDS).

Fonte: Adaptado de MAZUMDER *et al.* (2013).

Segundo Mazumder *et al.* (2013), a eficiência de remoção de poeira utilizando o sistema EDS demonstrou ser mais de 90%, sem necessidade de água ou trabalho manual. Além disso, a potência necessária para energizar os eletrodos EDS é significativamente desprezível, quando comparada a energia gerada pelo painel solar, e os EDS não precisam estar constantemente ativados, sendo suficiente apenas alguns minutos a cada dia.

O processo de funcionamento do EDS requer uma condição de ambiente seco e, portanto, é aplicável em atmosferas semiáridas e desérticas. Não podendo funcionar em condições úmidas, pois uma película dielétrica protege os eletrodos usados no EDS. O EDS foi inicialmente desenvolvido para remoção de poeira em aplicações de exploração espacial, contudo estão surgindo estudos recentes que visam adotar o EDS para remoção de poeira de painéis solares instalados na Terra (MAZUMDER *et al.*, 2013). A Figura 12 mostra uma série de fotografias decorridas no tempo de um painel solar coberto por amostra de poeira retirada do deserto sendo limpo pelo EDS. Todo o intervalo representado é de 20 s, com cada instantâneo tirado em um intervalo de 3,3 s.

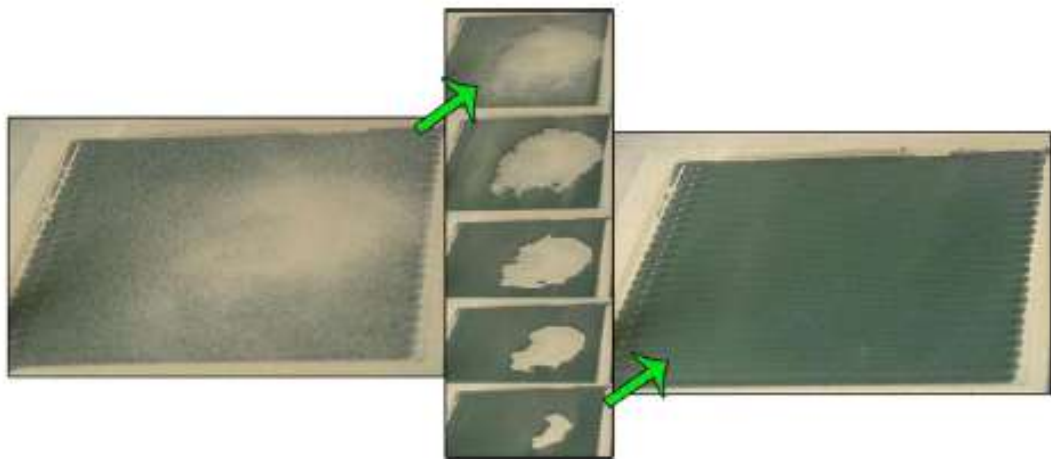


Figura 12 – Fotografias de um painel EDS, inicialmente coberto por uma camada de poeira, sendo limpo pelo EDS.

Fonte: MAZUMDER *et al.* (2013).

2.6.3. Limpeza Manual com Água

A limpeza com água de torneira, muitas vezes misturada com detergente, seguida de limpeza com um pano macio ou esponjas é a prática mais comum para a limpeza de painéis fotovoltaicos em instalações de pequena escala (MOHAMED E HASAN, 2012). Entretanto, segundo Pavan *et al.* (2011), utilizam-se para grandes plantas fotovoltaicas jatos de água de alta pressão, seguidos de escovação, sendo considerado um dos métodos de limpeza mais eficaz entre as práticas existentes, pois é menos nocivo à superfície do painel solar, mais econômico e tem um impacto ambiental mínimo.

Pavan *et al.* (2011) demonstra, em seu estudo, a eficácia da escovação após lavagem dos painéis fotovoltaicos com água e detergente. Em seu estudo, painéis em duas grandes instalações (1 MWp) em Puglia, Itália, foram limpos usando água em alta pressão, porém uma das instalações teve seus painéis escovados após a lavagem. Os dados obtidos antes e depois da limpeza mostrou que a instalação a qual ocorreu à escovação dos painéis fotovoltaicos obteve um aumento na potência de saída de 6,9%, em oposição a apenas 1,1% na instalação sem limpeza com escovação. A principal razão para este aumento relativo da eficiência é que as partículas finas altamente aderidas foram removidas apenas com escovação.

Em contrapartida ao efeito de melhoria da eficiência pela escovação, de acordo com Sayyah *et al.* (2014) a limpeza excessiva da superfície pode eventualmente degradar o desempenho do sistema arranhando a superfície vidrada dos painéis fotovoltaicos. Essa degradação superficial pode ser mais prejudicial para superfícies espelhadas em painéis solares concentrados. Este método de esfregar deve proceder como um processo delicado que deve ser realizado com extremo cuidado.

2.6.4. Tratamento de Superfície

Os métodos passivos de limpeza consistem em modificar a superfície de cobertura transparente das placas diminuindo a aderência de partículas de poeira ou

melhorando a molhabilidade (energia superficial) da superfície frontal para uma eficiente limpeza com água (SAYYAH *et al.*, 2014).

Segundo Lemos *et al.* (2016), as abordagens preventivas incluem ambos os métodos passivos, métodos para impedir a fixação do pó, e métodos ativos, métodos para repelir a partícula de poeira carregada. Todos estes métodos são de “elevada tecnologia” e o progresso continua com o desenvolvimento da ciência dos materiais, química, física e engenharia.

Em especial, a área de revestimentos apresentou desenvolvimentos recentes com materiais de superfícies super-hidrofóbicas e super-hidrofílicas, a qual geraram resultados promissores que são eficazes para ambas as condições de pó seco e úmido, porém seu tempo de vida ainda precisa ser validado. Esses métodos têm demonstrado eficácia e continuam a ser testados e avaliados (KAZMERSKI, 2013).

2.6.4.1. Superfícies Hidrofóbicas e Hidrofílicas

Os recobrimentos autolimpantes estão divididos em duas categorias principais: super-hidrofóbico e super-hidrofílico. Os recobrimentos de ambos os tipos apresentam o efeito autolimpante com a ação da água, sendo que na superfície super-hidrofóbica ocorre à formação de gotículas de água rolantes, e na superfície super-hidrofílica ocorre o espalhamento de água que carregam a sujeira para fora da superfície, como pode ser visto na Figura 13 (SILVA *et al.*, 2016).

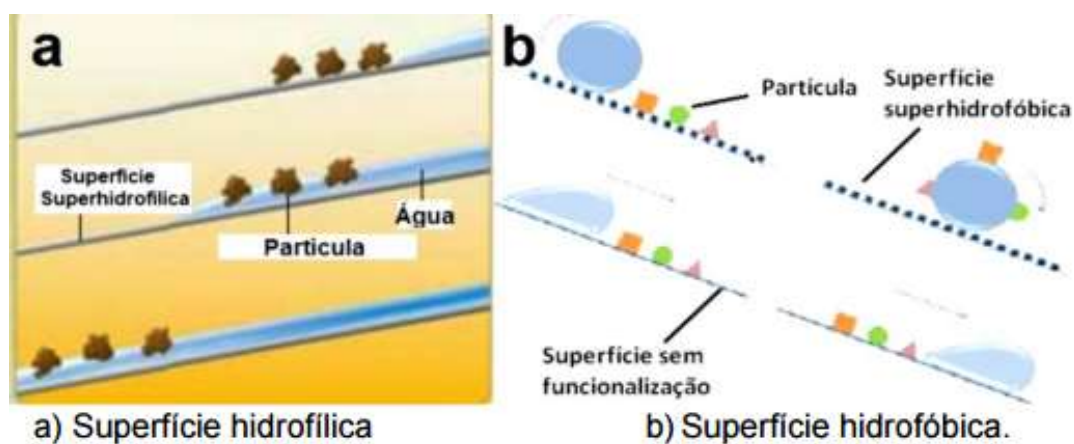


Figura 13 – Recobrimento autolimpante (a)super-hidrofílico e (b)super-hidrofóbico.

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

Uma superfície com molhabilidade especial (superhidrofilicidade ou superhidrofobicidade) pode contribuir substancialmente para a diminuição do acúmulo de sujidades sobre a superfície. A molhabilidade é uma propriedade extremamente importante de uma superfície sólida, sendo diferenciado caracteristicamente pelo ângulo de contato. Uma superfície pode apresentar diferentes características dependendo da sua natureza física, como tensão superficial, rugosidade e topologia da superfície. Ela pode ser hidrofílica, hidrofóbica, super-hidrofílica ou super-hidrofóbica, a depender do ângulo de contato, como mostra a Figura 14 (SILVA *et al.*, 2016).

Regime	Super-hidrofilico	Hidrofilico	Hidrofóbico	Super-hidrofóbico
Diagrama da gota				
Ângulo de Contacto	$\theta < 10^\circ$	$\theta < 90^\circ$	$\theta > 90^\circ$	$\theta > 150^\circ$

Figura 14 – Diagrama de gotas sobre superfícies com diferentes graus de molhabilidade e correspondentes valores de ângulos de contato.

Fonte: FERREIRA (2013).

Um exemplo de superfície autolimpante super-hidrofóbica é o modelo representativo da folha da planta de lótus. Devido às células epidérmicas papilosas cobertas com cristais de cera, ilustrado na figura 15a, a superfície da folha torna-se muito resistente e repelente a água. Dessa forma, as gotas de água na superfície tornam-se esféricas e rolam com facilidade. A gota de água ao rolar sobre os contaminantes absorve as partículas de sujeira e retira a sujeira para fora superfície, como ilustrado na figura 15b (SILVA *et al.*, 2016).

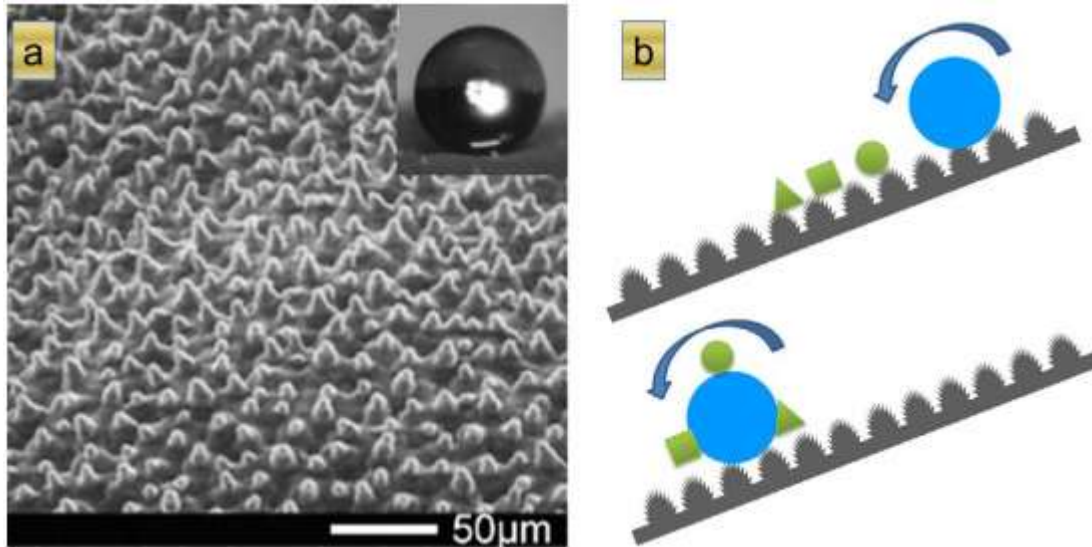


Figura 15 – Efeito autolimpante através da folha de lótus.

Fonte: YAO e HE (2014).

2.6.4.2. Superfícies Fotocatalíticas

A importância da fotocatalise está relacionada à transformação de substâncias orgânicas poluentes em substâncias inofensivas. As superfícies autolimpantes apresentam as vantagens de reduzir os custos com manutenção e proteção contra a acumulação de poeira. Um dos materiais mais utilizados para aplicações em autolimpeza é o dióxido de titânio (TiO_2), por possuir elevados níveis de estabilidade térmica e propriedades fotocatalíticas. Outra vantagem do TiO_2 é a facilidade de obtenção de propriedades super-hidrofílicas em superfícies fotovoltaicas (EUVANANONT *et al.*, 2008).

Segundo Kesmez *et al.* (2009) é possível conferir propriedades autolimpantes e fotocatalíticas a uma superfície por meio do seu recobrimento, utilizando uma ou mais camadas de dióxido de titânio (TiO_2). Essas características são obtidas devido à modificação das propriedades químicas, microestruturais e morfológicas da superfície do substrato recoberto. Entretanto, esses revestimentos de TiO_2 possuem maiores índices de refração que os substratos de vidro, o que gera um aumento da reflexão e conseqüente diminuição da transmitância da amostra.

Jesus (2015) desenvolveu em sua pesquisa um filme composto com alta transparência e atividade fotocatalítica, a qual possui capacidade de decompor

compostos orgânicos na presença de luz ultravioleta. Para evitar o acúmulo de sujidades nos painéis solares foram desenvolvidos filmes finos de TiO_2 devido suas propriedades de fotocatalise e superhidrofilicidade fotoinduzida.

Os filmes finos de TiO_2 têm propriedades capazes de remover contaminantes orgânicos aderidos à sua superfície sob iluminação com luz UV por meio de reações de oxiredução. Essas propriedades autolimpantes são originárias da combinação da decomposição fotocatalítica oxidativa de contaminantes orgânicos, bem como da hidrofilicidade. A propriedade hidrofílica proveniente do baixo ângulo de contato faz com que a água ao incidir sobre a superfície se espalhe formando assim uma lâmina que ao escorrer promove a remoção de parte da sujidade presente (JESUS, 2015).

Segundo Kim *et al.* (2006), a reação fotocatalítica tem sido objeto de estudo e tem atraído grande atenção em aplicações para a purificação de ambientes aquáticos ou atmosféricos. Em especial, o dióxido de titânio (TiO_2) está sendo amplamente empregado como um fotocatalisador na decomposição de compostos orgânicos voláteis (COV), por meio de reações de oxiredução ativadas por meio de radiação UV. Os COV são uma importante classe de poluentes do ar normalmente encontrados na atmosfera de todas as áreas urbanas e industriais. Muitos compostos orgânicos voláteis são conhecidos por serem tóxicos e, possivelmente, cancerígenos (ADDAMO, 2007).

A seguir, é apresentado na Tabela 1 o resumo das vantagens e desvantagens associadas com cada método de limpeza mencionado acima.

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens Associadas aos Diferentes Métodos de Limpeza.

Método de limpeza / agente	Vantagens	Desvantagens
LIMPEZA NATURAL: CHUVA, DERRETIMENTO DE NEVE, VENTO E FORÇAS GRAVITACIONAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Chuvas fortes e neve derretida podem restaurar completamente a eficiência do painel solar; • Sistemas de rastreamento podem ser utilizados para aumentar a eficiência de limpeza da chuva; • O vento alto pode remover partículas maiores de poeira das superfícies do painel fotovoltaico; • Não há custo de limpeza; 	<ul style="list-style-type: none"> • Chuva leve em regiões com elevados níveis de poeira seguida por vento empoeirado aumenta substancialmente a deposição de poeira e reduz a eficiência do painel fotovoltaico; • Chuva nas zonas áridas e semi-áridas são pouco frequentes; • Em terras semi-áridas e desérticas a chuva ocasional não fornece um método de limpeza confiável;
LIMPEZA COM JATO DE ÁGUA EM ALTA PRESSÃO	<ul style="list-style-type: none"> • A limpeza pode ser realizada sempre que necessário; • A alta eficiência do módulo fotovoltaico pode ser mantida rotineiramente; 	<ul style="list-style-type: none"> • Tem custos significativos para o trabalho e recursos hídricos, além de requer pessoal treinado; • Os recursos hídricos são muito limitados nas zonas áridas; • A deposição de sais orgânicos cria uma película sobre a superfície de vidro que requer a limpeza com escovação. O processo requer pessoal altamente treinado para evitar arranhões;
SISTEMA DE LIMPEZA ROBÓTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizam sistemas eficientes de uso de água para uma limpeza econômica; • Ambos os processos de limpeza e depuração podem ser automatizados; 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisa de uma equipe de técnicos para a supervisão da operação do robô; • O consumo de energia do dispositivo robótico não é rentável em algumas aplicações; • Tem altos custos de operação e manutenção;
REVESTIMENTO ANTI-SUJIDADE	<ul style="list-style-type: none"> • Melhora a eficiência de limpeza dos agentes de limpeza natural; • O revestimento dura por alguns anos; • É um método eficaz para tornar a superfície do módulo altamente hidrofóbica ou hidrofílica; 	<ul style="list-style-type: none"> • Sua vida útil é limitada; • A reaplicação do revestimento pode reduzir o desempenho do painel;
TELA ELETRODINÂMICA (EDS)	<ul style="list-style-type: none"> • Não precisa de recursos hídricos ou mão-de-obra para a operação; • Não há movimento mecânico envolvido no procedimento de limpeza; • O processo de limpeza pode ser ativado automaticamente ou manualmente, dependendo da necessidade; • O consumo de energia é muito baixo; 	<ul style="list-style-type: none"> • A tecnologia está em estágio de desenvolvimento; • O desempenho é limitado; • A durabilidade desta tecnologia ainda não foi estabelecida;

Fonte: Adaptado de SAYYAH *et al.* (2014).

3. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

3.1. LOCAIS PARA A BASE DE ESTUDO DO PROJETO

Os objetos de estudo para a realização desta pesquisa foram o painel fotovoltaico do Escritório Verde (EV) e o painel fotovoltaico da Sede Neville, ambos da UTFPR câmpus Curitiba.

O Escritório Verde (EV) é localizado na Sede Centro da UTFPR, Avenida Silva Jardim nº 807, Bairro Rebouças em Curitiba, Paraná. Devido esta rua ser uma das principais da cidade, há a presença de uma grande quantidade de automóveis que trafegam nela, conseqüentemente, também há a emissão de partículas que ficam em suspensão na atmosfera devido ao processo de combustão dos automóveis, principalmente naqueles que utilizam como combustíveis os de origem fóssil, e que se depositam na superfície dos módulos diminuindo o desempenho do sistema. O painel do escritório verde é apresentado na Figura 16.



Figura 16 - Painel Fotovoltaico do Escritório Verde.

Fonte: URBANETZ (2014).

Com destaque para o painel do EV, o qual foi o primeiro SFVCR instalado no Paraná no ano de 2011, com seu funcionamento de forma ininterrupta desde a sua inauguração. O painel do EV apresenta uma inclinação de 15° , onde o ponto ótimo seria de 25° aproximadamente, inclinação essa igual à latitude do local. Também o painel não se encontra voltado para o norte verdadeiro, por seguir a direção do telhado do EV, sendo que o painel se encontra com um desvio azimutal de 22° a oeste, assim não aproveitando totalmente a radiação solar. Também há um sombreamento parcial que ocorre pelo final da tarde, o qual é ocasionado por causa de uma edificação que se encontra à esquerda do escritório verde, piorando a produtividade do SFVCR. A potência desse sistema é de 2,1 kWp, sendo constituído por 10 módulos de 210 Wp em série (URBANETZ *et al.*, 2014).

A Sede Neville, está também localizada em Curitiba, na Rua Pedro Gusso nº 2671, no bairro Cidade Industrial de Curitiba (CIC). O painel se localiza numa região com condições climatológicas diferentes das encontradas no EV, com ar aparentemente mais limpo, sendo mais distante das ruas e dos agentes emissores de poluição. A Figura 17 apresenta o painel da sede Neville e em destaque o seu inversor.



Figura 17 - Painel Fotovoltaico da Sede Neville.

Fonte: LABENS (2016).

Este painel foi montado nas características ideais de geração, com inclinação igual a latitude de Curitiba, ou seja 25° , e com orientação para o norte verdadeiro (ou geográfico), sem desvio azimutal. Sua potência é de 10,2 kWp, sendo esse

constituído por 34 módulos de 300 Wp, formado por dois conjuntos de 17 módulos ligados em série (URBANETZ *et al.*, 2016).

A seguir são apresentadas duas figuras que demonstram a quantidade de sujeira presente nos painéis fotovoltaicos estudados antes da realização das limpezas, sendo a Figura 18 relativa ao Escritório Verde e a Figura 19 ao da sede Neville.



Figura 18 - Detalhe da sujeira nos módulos do Escritório Verde antes da limpeza.

Fonte: ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).



Figura 19 - Sujeira no Módulo Fotovoltaico do Neville.

Fonte: ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

3.2. MÉTODO DE LIMPEZA UTILIZADO NESTE PROJETO.

O método de limpeza utilizado neste trabalho foi à limpeza manual com água e detergente. Em ambos os câmpus foram aplicadas as técnicas de escovação com esponjas e pano macio nos painéis fotovoltaicos para melhorar a eficiência da limpeza.

3.3. ESCRITÓRIO VERDE (EV)

Visto que os índices de mérito necessitam de alguns dados anteriores, inicialmente serão apresentados os dados da geração de energia elétrica pelo sistema, também como a irradiação diária média no plano horizontal. O Gráfico 6 apresenta os valores da geração e o Gráfico 7 mostra essa irradiação. No APÊNDICE A constam as tabelas que fizeram surgir esses gráficos, juntamente com mais algumas tabelas respectivas a alguns gráficos os quais serão apresentados posteriormente.

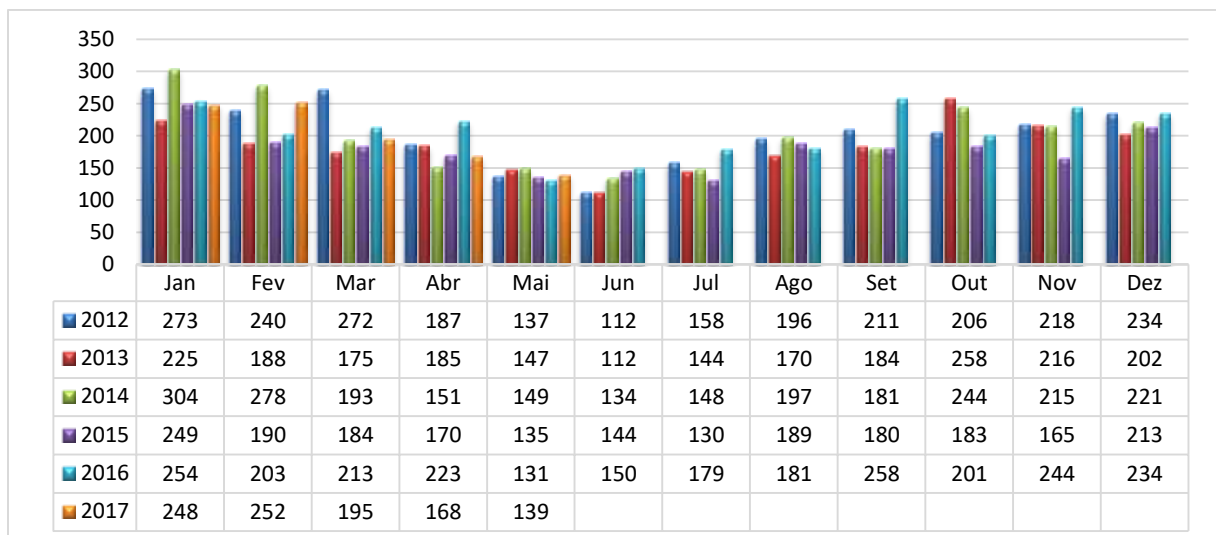


Gráfico 6 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Escritório Verde (kWh).

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

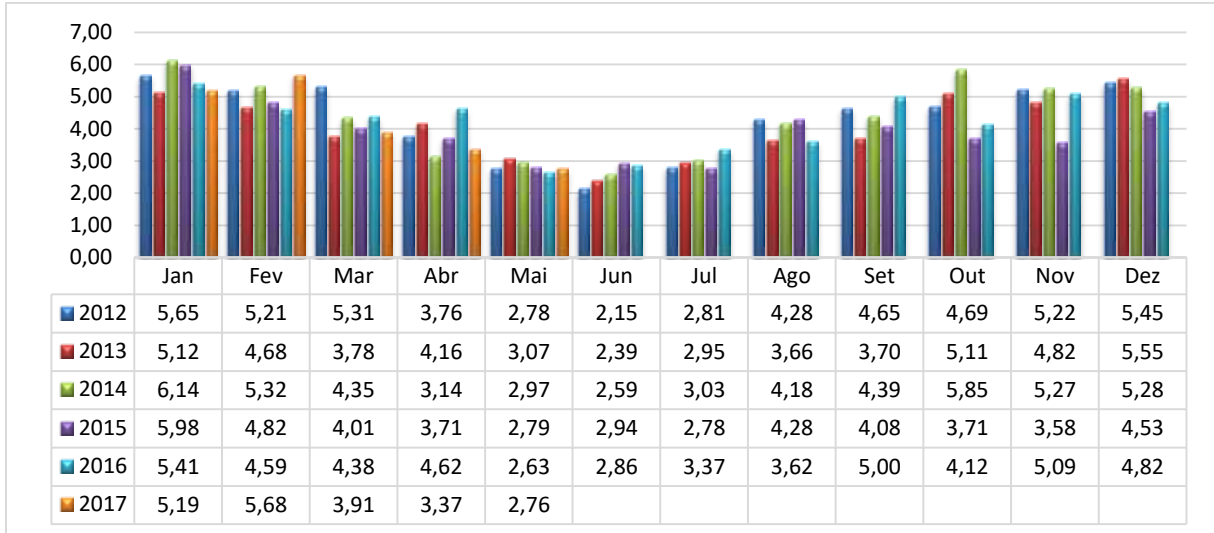


Gráfico 7 - Irradiação média diária no plano horizontal no Escritório Verde (kWh/m².dia).

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Obtidos esses dados pode-se dar andamento no procedimento de cálculo dos índices de mérito do Escritório Verde. Com o auxílio de um software disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o Radiasol, com o qual pode-se inserir valores com diferentes aspectos de instalação como inclinação e desvio azimutal. Assim foi possível fazer uma comparação para encontrar os dados de irradiação no plano inclinado nos sistemas. O Gráfico 8 apresenta a irradiação diária média no plano inclinado na superfície do Escritório Verde.

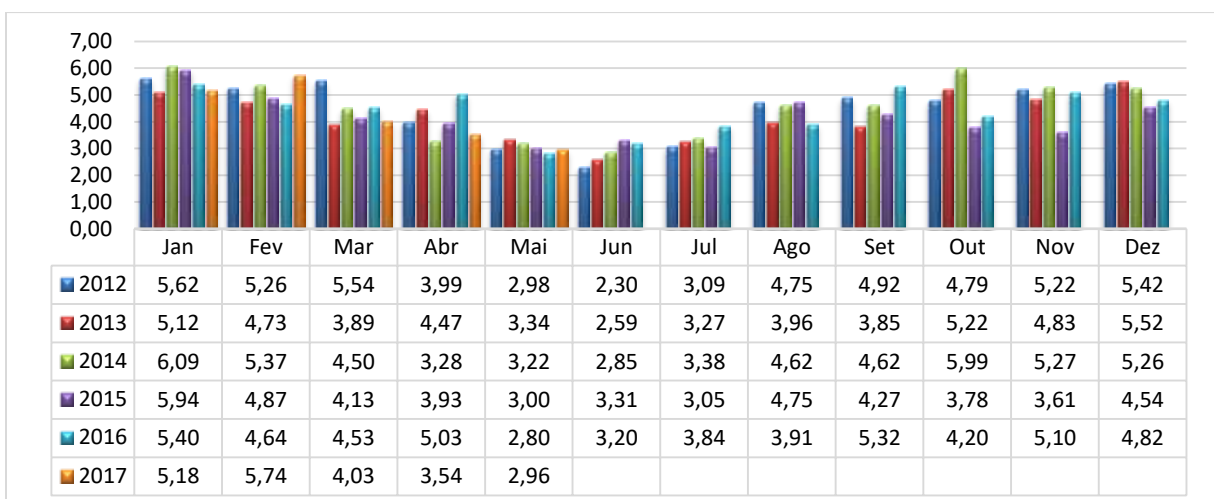


Gráfico 8 - Irradiação média diária no plano inclinado no Escritório Verde (kWh/m².dia).

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Na sequência é possível obter os índices de mérito, seguindo a metodologia explicada no capítulo 2. Relembrando tais índices: Produtividade (Yield), uma relação da energia elétrica gerada pelo sistema em função da potência total do SFVCR instalado; Desempenho Global ou Taxa de Desempenho (Performance Ratio/PR), o qual faz uma relação entre a Produtividade e a produtividade de Referência; Fator de Capacidade (FC) o qual é definido como a energia gerada durante certo intervalo de tempo e o valor da energia que poderia ser gerado caso o sistema operasse ininterrupto. Os Gráficos 9, 10 e 11, apresentam os índices de mérito do Escritório Verde, sendo Produtividade, Desempenho Global e Fator de Capacidade respectivamente.

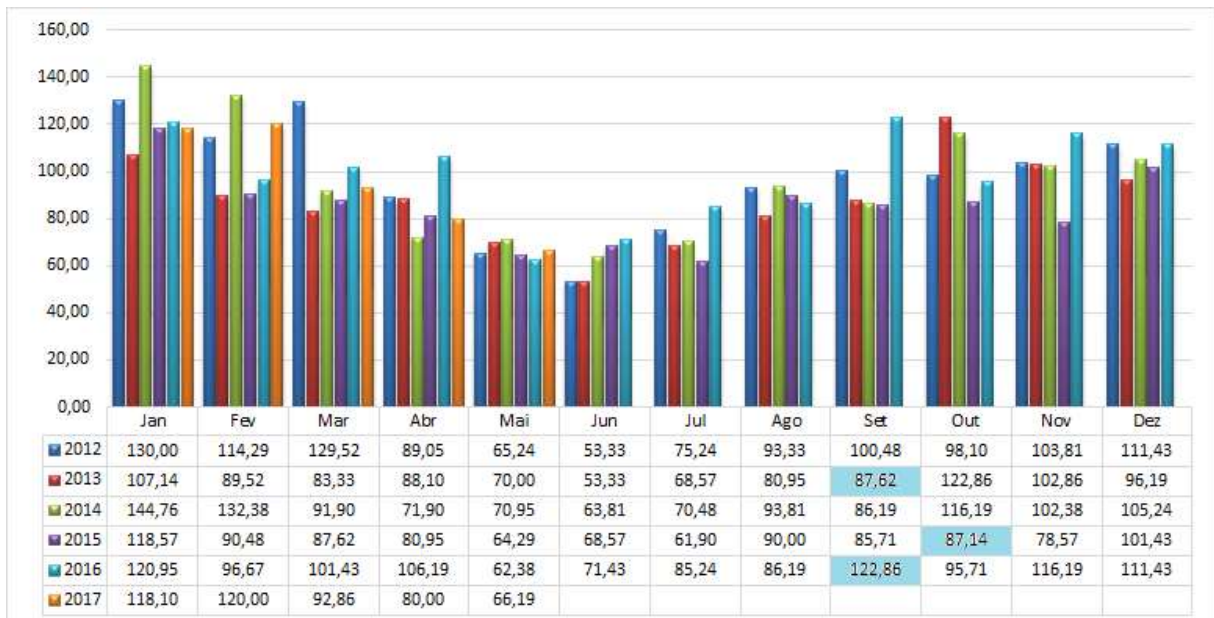


Gráfico 9 - Produtividade (Yield) do Escritório Verde (kWh/kWp).

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: Os meses destacados em azul são os meses em que tiveram o primeiro ciclo, um mês, de operação após as limpezas.

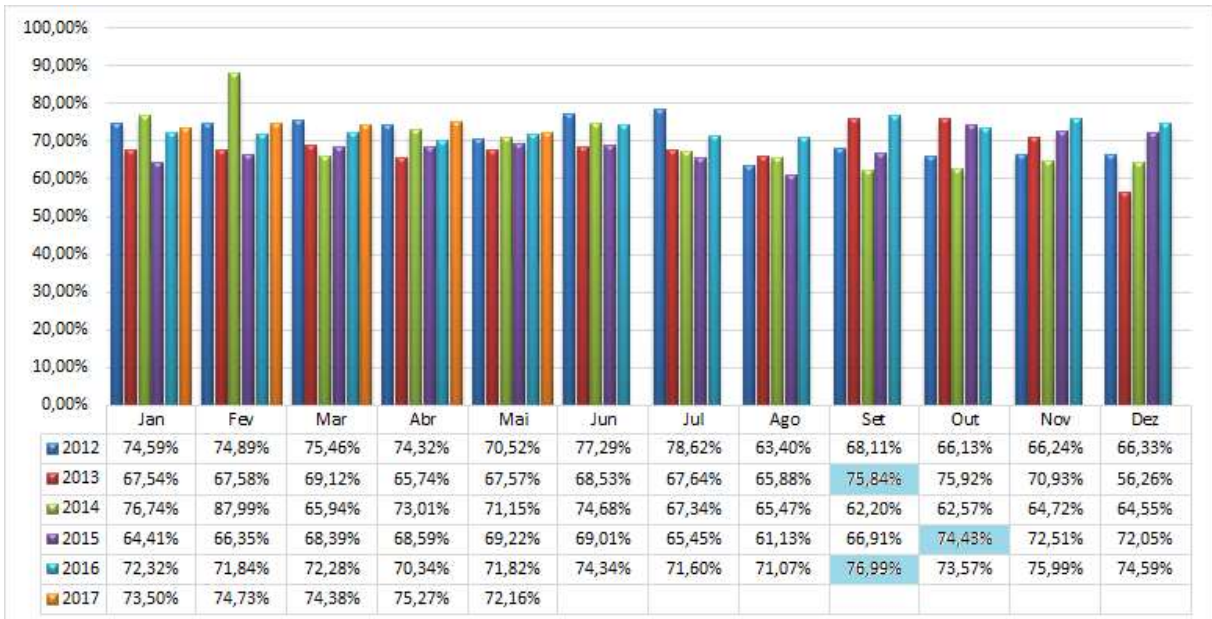


Gráfico 10 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Escritório Verde (%).

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: Os meses destacados em azul são os meses em que tiveram o primeiro ciclo, um mês, de operação após as limpezas.



Gráfico 11 - Fator de Capacidade (FC) do Escritório Verde (%).

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: Os meses destacados em azul são os meses em que tiveram o primeiro ciclo, um mês, de operação após as limpezas.

3.4. NEOVILLE

Analogamente ao realizado com o Escritório Verde, foram realizados os mesmo procedimentos para obter os índices de mérito no SFVCR do Neville. Desse modo inicialmente os Gráficos 12 e 13 apresentam a geração de energia elétrica do sistema e a irradiação diária média no plano horizontal no local onde está localizado o sistema fotovoltaico.

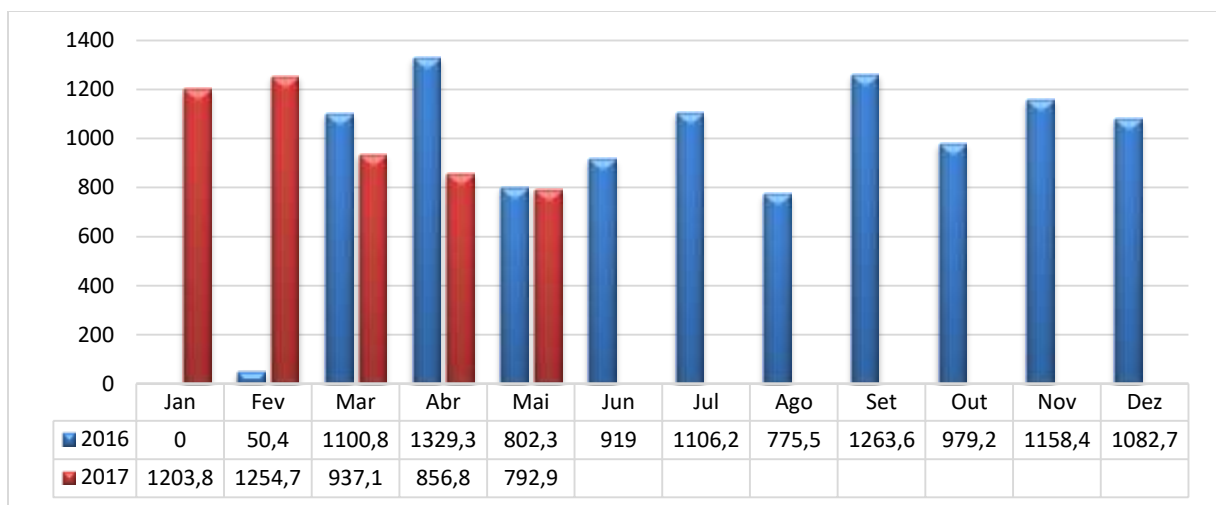


Gráfico 12 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Neville (kWh).

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

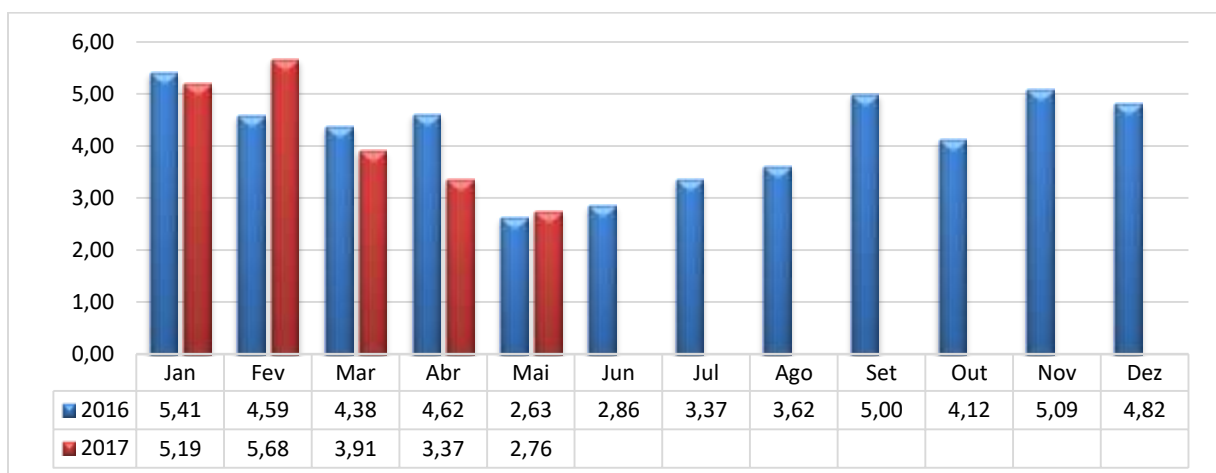


Gráfico 13 - Irradiação média diária no plano horizontal no Neville (kWh/m².dia).

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Novamente utilizando o Radiasol foi possível realizar o mesmo procedimento para o sistema fotovoltaico localizado no Neville. O Gráfico 14 apresenta a irradiação diária média no plano inclinado.

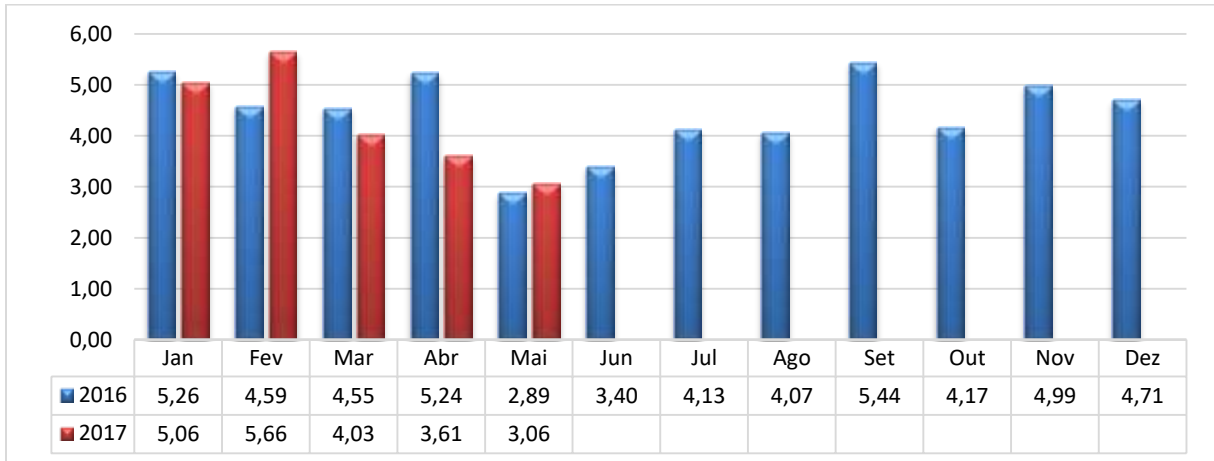


Gráfico 14 - Irradiação média diária no plano inclinado no Neville (kWh/m².dia).

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Continuando com o mesmo mecanismo ao encontro dos índices de mérito do painel fotovoltaico do Neville, esses são apresentados nos Gráficos 15, 16 e 17, sendo Produtividade, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade respectivamente.

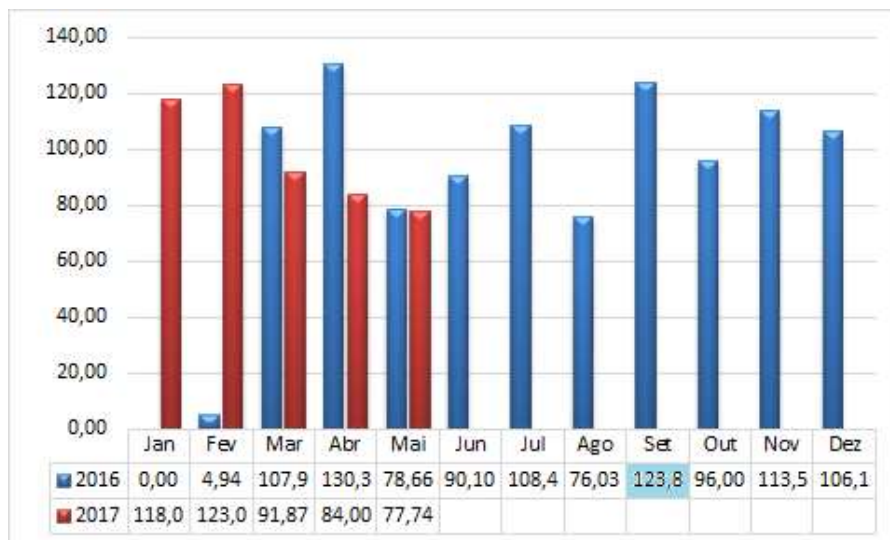


Gráfico 15 - Produtividade (Yield) do Neville (kWh/kWp).

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

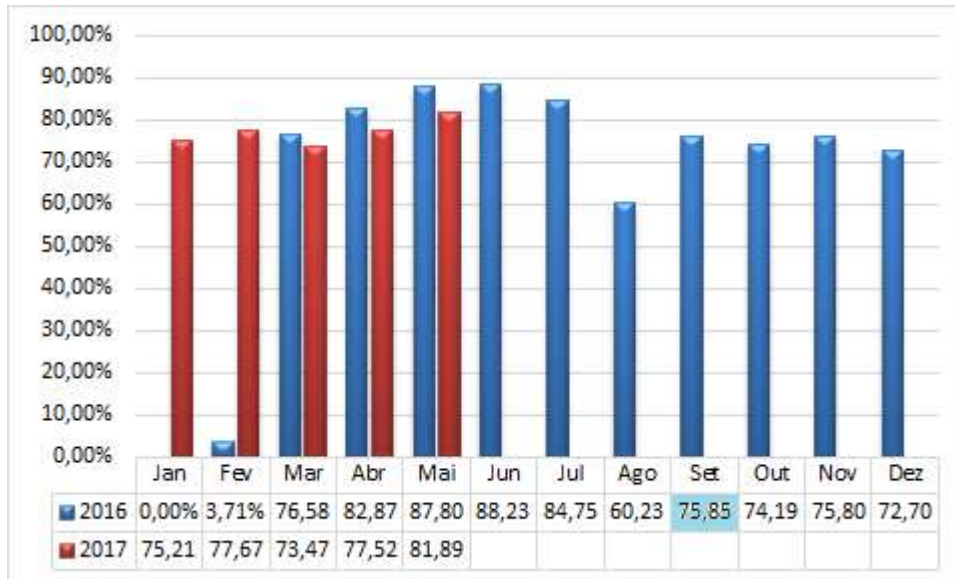


Gráfico 16 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Neville (%).

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

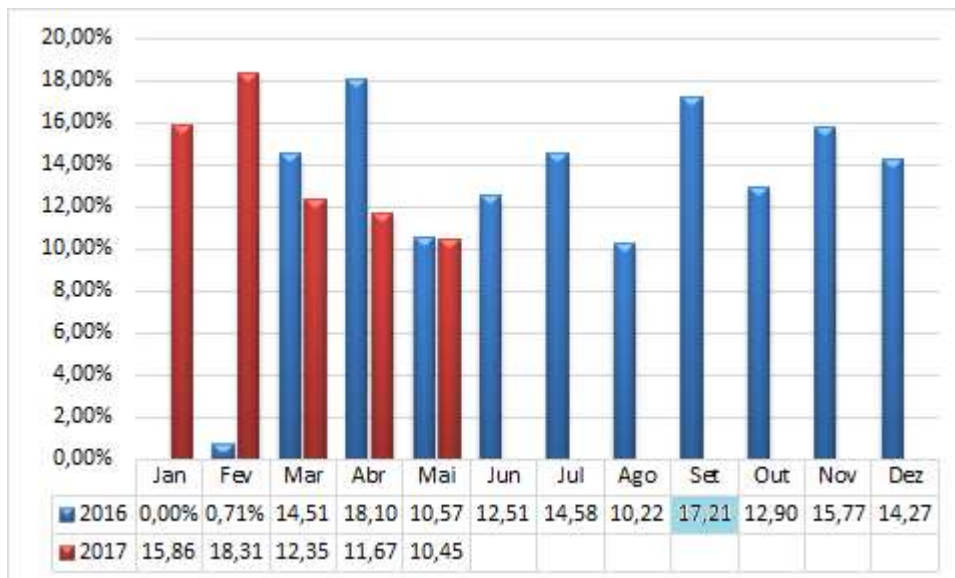


Gráfico 17 - Fator de Capacidade (FC) do Neville (%).

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

3.5. ANÁLISE DOS DADOS DE ACORDO COM AS LIMPEZAS REALIZADAS

Primeiramente para fazer uma medição bem efetiva é necessário que existam dados de pelo menos 1 ano, um ciclo completo, a fim de poder realizar uma análise completa do desempenho de um sistema, considerando as variabilidades decorrentes da sazonalidade das estações.

Tendo o sistema fotovoltaico do Escritório Verde como o primeiro no estado do Paraná, desde 2012, a quantidade de dados presentes é vasta, logo as comparações podem ser mais apuradas, assim resultados com boa relevância. O sistema fotovoltaico do Neville ainda não apresenta muito valores, todavia ainda assim serão feitas comparações para avaliar esse sistema.

No Escritório Verde foram realizadas 3 limpezas: a primeira em 31 de agosto de 2013; a segunda em 26 de setembro de 2015; e a terceira e mais recente 01 de setembro de 2016. Com essa última limpeza foi possível perceber a alteração nos índices de mérito, todos os índices tiveram um aumento nos seus respectivos valores, sendo a Produtividade de 86,19 kWh /kWp para 122,86 kWh /kWp, a Taxa de Desempenho de 71,07% para 76,99% e o Fator de Capacidade de 11,58% para 17,06%.

No painel fotovoltaico localizado no Neville houve apenas uma limpeza até junho de 2017 que ocorreu em 02 de setembro de 2016. Observando os índices de mérito próximos dessa data é possível observar que teve um aumento significativo nesses índices em destaque para a Produtividade de 108,45 kWh /kWp para 123,88 kWh /kWp e Fator de Capacidade de 14,58% para 17,21%, entretanto a Taxa de Desempenho sofreu uma queda quando comparada aos meses anteriores, desconsiderando o mês de agosto, o qual foi atípico, visto que houve desligamentos do inversor durante alguns momentos do mês, e assim a possível produtividade do sistema não foi totalmente aproveitada.

Com os dados obtidos nos gráficos já apresentados, foram criadas outras tabelas para observar os dados ano a ano, e a partir do ano de início de funcionamento do painel fotovoltaico do Neville, foram feitas tabelas que facilitam na comparação dos dados do Escritório Verde e Neville. As Tabelas 2, 3, 4, 5 apresentam os dados recebidos para os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

Juntamente as Tabelas 6 e 7 revelam os dados para possíveis comparações nos anos de 2016 e 2017 do Escritório Verde junto ao Neville.

Tabela 2 - Escritório Verde – 2012.

Valores	Irradiação plano inclinado (kWh/m ² .dia)	Produtividade (kWh/kWp)	Taxa de Desempenho	Fator de Capacidade
Jan	5,62	130,00	74,59%	17,47%
Fev	5,26	114,29	74,89%	16,42%
Mar	5,54	129,52	75,46%	17,41%
Abr	3,99	89,05	74,32%	12,37%
Mai	2,98	65,24	70,52%	8,77%
Jun	2,30	53,33	77,29%	7,41%
Jul	3,09	75,24	78,62%	10,11%
Ago	4,75	93,33	63,40%	12,54%
Set	4,92	100,48	68,11%	13,96%
Out	4,79	98,10	66,13%	13,18%
Nov	5,22	103,81	66,24%	14,42%
Dez	5,42	111,43	66,33%	14,98%
Média	4,49	1163,81	71,33%	13,25%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 3 - Escritório Verde – 2013.

Valores	Irradiação plano inclinado (kWh/m ² .dia)	Produtividade (kWh/kWp)	Taxa de Desempenho	Fator de Capacidade
Jan	5,12	107,14	67,54%	14,40%
Fev	4,73	89,52	67,58%	13,32%
Mar	3,89	83,33	69,12%	11,20%
Abr	4,47	88,10	65,74%	12,24%
Mai	3,34	70,00	67,57%	9,41%
Jun	2,59	53,33	68,53%	7,41%
Jul	3,27	68,57	67,64%	9,22%
Ago	3,96	80,95	65,88%	10,88%
Set	3,85	87,62	75,84%	12,17%
Out	5,22	122,86	75,92%	16,51%
Nov	4,83	102,86	70,93%	14,29%
Dez	5,52	96,19	56,26%	12,93%
Média	4,23	1050,48	68,21%	12,00%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

Tabela 4 - Escritório Verde – 2014.

Valores	Irradiação plano inclinado (kWh/m ² .dia)	Produtividade (kWh/kWp)	Taxa de Desempenho	Fator de Capacidade
Jan	6,09	144,76	76,74%	19,46%
Fev	5,37	132,38	87,99%	19,70%
Mar	4,50	91,90	65,94%	12,35%
Abr	3,28	71,90	73,01%	9,99%
Mai	3,22	70,95	71,15%	9,54%
Jun	2,85	63,81	74,68%	8,86%
Jul	3,38	70,48	67,34%	9,47%
Ago	4,62	93,81	65,47%	12,61%
Set	4,62	86,19	62,20%	11,97%
Out	5,99	116,19	62,57%	15,62%
Nov	5,27	102,38	64,72%	14,22%
Dez	5,26	105,24	64,55%	14,14%
Média	4,54	1150,00	69,70%	13,16%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 5 - Escritório Verde – 2015.

Valores	Irradiação plano inclinado (kWh/m ² .dia)	Produtividade (kWh/kWp)	Taxa de Desempenho	Fator de Capacidade
Jan	5,94	118,57	64,41%	15,94%
Fev	4,87	90,48	66,35%	13,46%
Mar	4,13	87,62	68,39%	11,78%
Abr	3,93	80,95	68,59%	11,24%
Mai	3,00	64,29	69,22%	8,64%
Jun	3,31	68,57	69,01%	9,52%
Jul	3,05	61,90	65,45%	8,32%
Ago	4,75	90,00	61,13%	12,10%
Set	4,27	85,71	66,91%	11,90%
Out	3,78	87,14	74,43%	11,71%
Nov	3,61	78,57	72,51%	10,91%
Dez	4,54	101,43	72,05%	13,63%
Média	4,10	1015,24	68,20%	11,60%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

Nas tabelas seguintes, Tabela 6 e 7, os nomes dos índices foram encurtados para uma melhor visualização do ano de 2016 e 2017, de uma maneira que seja possível observar os dois locais e seus valores. Sendo Irradiação: a irradiação

média no plano inclinado; Yield: Produtividade; PR: Performance Ratio, Taxa de Desempenho; FC: Fator de Capacidade.

Tabela 6 - Escritório Verde e Neville – 2016.

Local	Escritório Verde				Neville			
	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Yield (kWh/kWp)	PR	FC	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Yield (kWh/kWp)	PR	FC
Jan	5,40	120,95	72,32%	16,26%	5,26	0,00	0,00%	0,00%
Fev	4,64	96,67	71,84%	13,89%	4,59	4,94	3,71%	0,71%
Mar	4,53	101,43	72,28%	13,63%	4,55	107,92	76,58%	14,51%
Abr	5,03	106,19	70,34%	14,75%	5,24	130,32	82,87%	18,10%
Mai	2,80	62,38	71,82%	8,38%	2,89	78,66	87,80%	10,57%
Jun	3,20	71,43	74,34%	9,92%	3,40	90,10	88,23%	12,51%
Jul	3,84	85,24	71,60%	11,46%	4,13	108,45	84,75%	14,58%
Ago	3,91	86,19	71,07%	11,58%	4,07	76,03	60,23%	10,22%
Set	5,32	122,86	76,99%	17,06%	5,44	123,88	75,85%	17,21%
Out	4,20	95,71	73,57%	12,86%	4,17	96,00	74,19%	12,90%
Nov	5,10	116,19	75,99%	16,14%	4,99	113,57	75,80%	15,77%
Dez	4,82	111,43	74,59%	14,98%	4,71	106,15	72,70%	14,27%
Média	4,40	1176,67	73,06%	13,41%	4,45	1031,08	77,90%	14,06%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

Tabela 7 - Escritório Verde e Neville – 2017.

Local	Escritório Verde				Neville			
	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Yield (kWh/kWp)	PR	FC	Irradiação (kWh/m ² .dia)	Yield (kWh/kWp)	PR	FC
Jan	5,18	118,10	73,50%	15,87%	5,06	118,02	75,21%	15,86%
Fev	5,74	120,00	74,73%	17,86%	5,66	123,01	77,67%	18,31%
Mar	4,03	92,86	74,38%	12,48%	4,03	91,87	73,47%	12,35%
Abr	3,54	80,00	75,27%	11,11%	3,61	84,00	77,52%	11,67%
Mai	2,96	66,19	72,16%	8,90%	3,06	77,74	81,89%	10,45%
Média	4,29	477,14	74,01%	13,24%	4,28	494,64	77,15%	13,73%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Com a primeira limpeza ocorrida no Escritório Verde é possível observar um aumento em todos os índices de mérito e expressivamente na Taxa de Desempenho com um aumento de aproximadamente 10 pontos percentuais. Similarmente na segunda limpeza dos painéis do Escritório Verde teve-se um melhora significativa de

aproximadamente 7,5 pontos percentuais na Taxa de Desempenho. Na terceira limpeza constam-se aperfeiçoamentos dos valores de índices de mérito, sendo que a Taxa de Desempenho aumentou em 6 pontos percentuais com relação ao mês anterior.

Visto que o painel fotovoltaico do Neoville está em seu início, tendo completado um ano de funcionamento em fevereiro de 2017, assim a aquisição dos dados ainda está em desenvolvimento. Contudo com a limpeza realizada em setembro do ano de 2016 pode-se verificar que não ocorreu uma melhora significativa nos índices de mérito do sistema, tendo que ainda nos meses de agosto o sistema apresentou algumas falhas, ainda que o inversor apresentou alguns desligamentos durante momentos do mês, assim prejudicando a geração de energia do sistema. Por consequência não foi possível fazer uma comparação mais direta mês a mês. Já nos meses de maio de 2017, os valores dos índices de mérito começaram a subir novamente, quando comparados com o Escritório Verde no ano de 2017, pode-se observar que com o passar das estações, um módulo fotovoltaico instalado nas condições ideais, como é o caso do Neoville, apresenta diferença de valores de acordo com o período do ano, em suas estações (primavera, verão, outono e inverno).

4. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO

4.1. COMPARAÇÃO DE DADOS DO ESCRITÓRIO VERDE

Ao comparar os dados obtidos para o Escritório Verde, alguns meses atípicos são apresentados, porém eles se balanceiam, assim tornando a média mensal do resultado final de todo tempo de funcionamento do Escritório Verde com 70,83% na sua Taxa de Desempenho e 12,96% no seu Fator de Capacidade, e também possuindo uma média de Produtividade anual de 1111,24 kWh/kWp. Assim para determinar o tempo ótimo para a realização da limpeza dos painéis fotovoltaicos do Escritório Verde foi estipulado para que o sistema opere regularmente com uma taxa de desempenho de no mínimo 70%.

Se todos os meses em que ocorreu uma taxa de desempenho menor que 70%, fossem alterados para que tivesse no mínimo esses 70%, a nova média seria de 72,46%. Assim verificando em quanto tempo teve-se o decaimento dessa taxa durante os anos, no primeiro momento foram de sete meses, no segundo de dez meses, com três meses que ficaram oscilando entre poucos valores e muitos valores, e seriam de onze meses no terceiro caso, contudo foi impedido pela última limpeza realizada. Assim foi feita uma média que define que em nove a dez meses é o tempo ideal para que sejam feitas as limpezas do painel fotovoltaico do Escritório Verde.

Se for estipulado que deseja-se uma taxa de desempenho de no mínimo 72%, a média geral de todo o funcionamento do sistema vai para 73,45%. Analogamente segue-se o mesmo padrão realizado no esquema anterior, desde o primeiro valor que foi sequencial a outro, sendo inferior a 72% é de sete meses no primeiro momento, no segundo foi de dois meses, no terceiro foram de seis meses, no quarto momento também de seis meses. Desse modo a média de meses para que sejam realizadas as limpezas é de cinco a seis meses, a fim de se obter uma taxa de desempenho mínima de 72% durante todo ano.

Valores um pouco mais altos que 72% são impraticáveis, visto que apresenta uma variação mês a mês e assim não necessariamente a redução dos índices de mérito é consequência da sujidade, ou seja a limpeza não afetará tanto o

desempenho do sistema. Tendo ainda que pode-se obter uma variação indesejável em poucos meses e na sequência do funcionamento do sistema, o valor retorne para valores desejáveis, acima de 72%, por exemplo.

4.2. COMPARAÇÃO DE DADOS DO NEOVILLE

Ao comparar os dados dos índices de mérito no Neoville, a limpeza realizada não apresentou melhores significativas para o sistema, logo não foi possível realizar uma metodologia para descobrir o tempo ótimo para a limpeza do sistema em questão.

Contudo alguns aspectos podem ser destacados, como o painel fotovoltaico do Neoville está com inclinação igual a latitude, inclinação ideal para geração de energia, se comparado ao sistema do Escritório Verde, que possui inclinação menor que a latitude, os momentos em que o sistema possui melhor geração são nas estações de outono e primavera, todavia na estação de verão, o sistema com inclinação menor que a latitude, como é o caso do Escritório Verde, esse apresenta os índices de mérito mais elevados, visto que o sistema recebe mais irradiação nessa época do ano.

5. CONCLUSÕES

A energia elétrica é gerada por diversas vertentes, uma delas é a energia solar fotovoltaica, que vem crescendo consideravelmente ao longo do tempo. Este método de geração de energia elétrica é proveniente das células fotovoltaicas, as quais constituem um módulo fotovoltaico. Diversos fatores implicam no funcionamento desses módulos como, por exemplo, a sujeidade, um fator relevante o qual foi estudado nesse trabalho.

A sujeidade nas superfícies dos módulos fotovoltaicos se relaciona diretamente com a diminuição da eficiência das células fotovoltaicas, o que pode ser bastante significativo. A saída de potência fornecida a partir de um módulo fotovoltaico depende fortemente da quantidade de irradiação que atinge os painéis. As sujidades diminuem a transmitância dos módulos devido ao espalhamento da radiação incidente, reduzindo a intensidade que chega à célula. Assim a sujeidade limita a geração de energia elétrica e conseqüentemente a produtividade do sistema.

Os objetivos principais desse estudo foram fornecer informações sobre como a sujeidade afeta no desempenho e na produtividade dos painéis fotovoltaicos, as diferentes formas de limpeza e as perdas naturais que a sujeidade provoca nos painéis estudados, para ser possível determinar o tempo ideal para a limpeza dos painéis fotovoltaicos visando melhor produtividade.

Foi elaborado um desenvolvimento sobre a bibliografia a respeito do tema energia solar fotovoltaica, abordando os tópicos sobre a sujeidade e a influência dessa nos índices de mérito.

As diferentes formas de limpeza como, por exemplo, a limpeza manual, a limpeza natural, a limpeza automatizada (robótica) e seus métodos emergentes, e a limpeza através de tratamento de superfícies (hidrofóbicas, hidrofílicas e fotocatalíticas), foram estudadas para entender melhor essas diversas técnicas de limpeza, com intuito de expandir as possibilidades de determinação do tempo ótimo para limpeza em outros painéis que utilizem estes outros métodos de limpeza. A forma de limpeza utilizada nesse trabalho foi à limpeza manual com água e detergente, juntamente com escovação com esponjas.

Através das limpezas realizadas, foi possível observar as perdas provenientes pela sujeidade. Foram coletados dados mês a mês dos índices de produtividade dos

painéis estudados, juntamente com a taxa de desempenho e o fator de capacidade. Através desses dados, pode-se confirmar a diminuição da produtividade e desempenho dos painéis fotovoltaicos estudados devido à sujidade.

Os métodos para a realização desse estudo foram iniciados a partir do levantamento de dados das características construtivas e elétricas dos SFVCR, da coleta de dados de radiação solar no plano horizontal, da adaptação dos valores de radiação no RADIASOL e dos cálculos dos índices de mérito para cada sistema.

Com o desenvolvimento desse trabalho foi possível acompanhar, estudar e desenvolver de forma satisfatória, o tempo ideal para a realização da limpeza nos módulos fotovoltaicos estudados no Escritório Verde, porém não foi possível determinar o tempo ideal para a limpeza do painel localizado na sede Neville.

No Escritório Verde foram estipuladas duas taxas de desempenho mínimas para atuar durante todo o funcionamento do sistema. Uma delas foi utilizando uma taxa de no mínimo 70%, a qual se pode determinar que o tempo ideal para a limpeza no painel se estabeleceu entre 9 a 10 meses. A outra, com o valor da taxa de desempenho alterando para 72%, foi possível verificar que o tempo ideal se alterou para 5 a 6 meses. Contatou-se que valores acima dos estipulados são inviáveis para a determinação do tempo ótimo, devido às consequências climáticas que podem alterar relativamente os índices de sujidade, consequentemente ocasionando variação excessiva dos índices de mérito e implicando na necessidade de manutenções mais frequentes elevando os custos com a limpeza desnecessariamente.

Na sede Neville foram analisados todos os dados obtidos dos índices de mérito desde seu recente funcionamento. Ao analisar os dados, constatou-se que, no mês de agosto de 2016, mesmo o escritório verde tendo uma radiação menor do que o Neville, ele ainda assim teve maior produtividade do que o próprio Neville. Com isso a energia que poderia ser gerada pelo Neville foi menor, consequentemente ele teve uma produtividade menor, um fator de capacidade menor e uma taxa de desempenho menor do que aquilo que deveria ter. Embora não se possa afirmar é bem provável e possível que essa diminuição dos índices de mérito seja a um provável desligamento do inversor, que deve estar ocorrendo ao longo dos meses, notadamente a partir do mês de agosto que caiu da taxa 84,75% para 60,23%. Um provável motivo para a ocorrência da queda dos índices de mérito no Neville seja em função de algum erro na parametrização do inversor ou do

excesso de desligamento que tenha ocorrido ao longo do mês. Esse excesso de desligamentos faz com que ele não disponibilize toda a energia que efetivamente o sistema fotovoltaico poderia estar gerando. Diante desses fatores, não foi possível determinar o tempo ideal para a limpeza do painel fotovoltaico da sede Neville, necessitando de mais informações para estabelecer o melhor tempo para a limpeza.

Propostas para Trabalhos Futuros

A partir dos estudos sobre a influência da sujidade para a determinação do tempo ótimo de limpezas nos painéis fotovoltaicos da UTFPR, alguns trabalhos podem ser desenvolvidos com o objetivo de aprimorar esses estudos. São eles:

- a. Estudar o painel fotovoltaico encontrado no Neville a fim de determinar seu tempo ótimo, visto que não foi possível concluir esse objetivo no decorrer desse trabalho. Com mais informações de sua produtividade a determinação do seu tempo ótimo para limpeza se torna mais eficaz;
- b. Continuação do estudo para a limpeza do painel encontrado no Escritório Verde, a fim de se obter valores mais apurados, porque quanto mais tempo decorrer para a realização de um estudo, mais preciso será o tempo ideal para a realização das limpezas;
- c. Estudo dos tempos ideais em outros painéis em que as limpezas realizadas sejam por outros métodos como, por exemplo, limpeza automatizada (robótica), limpeza por tratamento de superfícies (hidrofóbicas, hidrofílicas e fotocatalíticas) ou métodos emergentes de limpeza.
- d. De acordo com os índices pluviométricos, determinar qual o tempo ideal de limpeza nos painéis e complementar o estudo;

REFERÊNCIAS

ABNT. “**NBR 10899 - Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2006. Disponível em: <<https://goo.gl/GsTwsK>>

ADDAMO, M., AUGUGLIARO, V., DI PAULA, A., LODDO, V., MARCI, G., PALMISANO, L. “**Photocatalytic thin films of TiO₂ formed by a sol-gel process using titanium tetraisopropoxide as the precursor**”, 2007. Disponível em: <<https://goo.gl/qLNyX3>>

AMBIENTE E ENERGIA. “**ANEEL aumenta incentivos em autogeração de energia**” 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/fyGmyp>>

ALBUSAIRI, H.A., MÖLLER, H.J. “**Performance evaluation of CdTe PV modules under natural outdoor conditions in Kuwait**”, 2010. Disponível em: <<http://cleanenergybusinesscouncil.com/resources/files/kisr%20research.pdf>>

AMÉRICADOSOL. “**O que é e como funciona o Sistema Fotovoltaico**”, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/tFRD3B>>

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. “**Banco de Informação de Geração – BIG- Capacidade de Geração do Brasil**”, 2016a. Disponível em: <<http://goo.gl/JVWNN9>>

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. “**Banco de Informação de Geração – BIG- Capacidade de Geração no Estado - Paraná**”, 2016b. Disponível em: <<http://goo.gl/T6XU5N>>

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. “**Microminigeração**”, 2016c. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/rcgMicro.asp>>

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **“Atlas de Energia Elétrica - 2ª Edição”**, 2005. Disponível em: <goo.gl/c0bJej>

APPELS, R., MUTHIRAYAN, B., BEERTEN, A., PAESEN, R., DRIESEN, J., POORTMANS, J. **“The effect of dust deposition on photovoltaic modules”**, 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/OJ8sXO>>

ARAÚJO, A. J. N.; RANK. N. I.; BUENO, T. B. A. **“Análise dos Fatores de Perdas Nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba”**, 86P. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2016.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **“Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório”**, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE), São Paulo, 2009. Disponível em: <<https://goo.gl/fCjyLW>>

BETHEA, R.M., BARRIGER, M.T., WILLIAMS, P.F., CHIN, S. **“Environmental effects on solar concentrator mirrors”**, 1981. Disponível em: <<https://goo.gl/69L9Ia>>

BOYLE, G. **“Renewable Energy, 2nd edition”**, 2004. Oxford, UK: Oxford University Press & The Open University.

BRASIL, Lei Nº 13.169, de 6 de outubro de 2015. Altera a Lei nº 7.689, de 15 de dezembro de 1988, para elevar a alíquota da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido - CSLL em relação às pessoas jurídicas de seguros privados e de capitalização, e às referidas nos incisos I a VII, IX e X do § 1º do art. 1º da Lei Complementar nº 105, de 10 de janeiro de 2001; altera as Leis nºs 9.808, de 20 de julho de 1999, 8.402, de 8 de janeiro de 1992, 10.637, de 30 de dezembro de 2002, 10.833, de 29 de dezembro de 2003, 11.033, de 21 de dezembro de 2004, 12.715, de 17 de setembro de 2012, 9.249, de 26 de dezembro de 1995, 11.484, de 31 de

maio de 2007, 12.973, de 13 de maio de 2014, 10.150, de 21 de dezembro de 2000, e 10.865, de 30 de abril de 2004; e dá outras providências. Brasília, DF, 6 de out. 2015; 194^o da Independência e 127^o da República. Disponível em: <<https://goo.gl/xFyZJE>>

CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **“Manual de Energia Elétrica para Sistemas Fotovoltaicos”**, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/qJ7pw1>>.

CONFAZ. **“CONVÊNIO ICMS 16, DE 22 DE ABRIL DE 2015”**, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/BBaWNY>>

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **“Energia Solar Princípios e Aplicações”**, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **“Guia de Instituições e Empresas do CRESESB”**, 2014. Disponível em <[http://www.cresesb.cepel.br/guia_cresesb/index.php?section=com_empresas&cid=50&filter\[\]=>](http://www.cresesb.cepel.br/guia_cresesb/index.php?section=com_empresas&cid=50&filter[]=>)>.

CUDDIHY, E.F. **“Surface Soiling: Theoretical Mechanisms and Evaluation of Low-Soiling Coatings”**, 1983. Disponível em: <https://www2.jpl.nasa.gov/adv_tech/photovol/ppr_81-85/Surf%20Soiling%20Theor%20Mech%20-%20Williamsburg1983.pdf>

DGS. **“Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers”**, 2008. Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie, ISBN-13: 978-1-84407-442-6, Second Edition.

EFEITOSOLAR. **“Como se deve limpar os painéis solares?”**, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/6g4S0T>>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **“Plano Decenal de Expansão de Energia 2024”**, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/6AcN3L>>

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **“Série ESTUDOS DA DEMANDA DE ENERGIA NOTA TÉCNICA DEA 13/14. Demanda de Energia 2050”**, 2014a. Disponível em: <<http://goo.gl/oRrrNU>>

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **“Série Recursos Energéticos, Nota Técnica DEA 19/14. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos”**, 2014b. Disponível em: <goo.gl/KETt7o>

EUVANANONT, C., JUNIN, K., LIMTHONGKUL, P., THANACHAYANONT, C. **“TiO₂ Optical coating layers for self-cleaning applications”**, 2008. Disponível em: <<https://goo.gl/gTwsbn>>

FERREIRA, Lúcia Marisa Vieira. **“Revestimentos hidrofóbicos”**, 2013. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/11045/1/Ferreira_2013.pdf>

GREENPRO. **“Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação”**, 2004. Comissão Europeia, Fontes de Energia Renováveis. Disponível em <<http://paginas.fe.up.pt/~ee03097/ficheiros/manual-fotovoltaico.pdf>>.

HICKEL, B. M., DESCHAMPS, E. M., NASCIMENTO, L. R., RUTHER, R., SIMÕES, G.C. **“Análise Da Influência Do Acúmulo De Sujeira Sobre Diferentes Tecnologias De Módulos Fv: Revisão E Medições De Campo”**, 2016. VI Congresso Brasileiros de Energia Solar (CBENS), Belo Horizonte- Minas Gerais.

JESUS, Magnum Augusto Moraes Lopes. Magnum Augusto Moraes. **“Desenvolvimento de superfícies autolimpantes superhidrofílicas e fotocatalíticas obtidas pela deposição de filmes finos de tio₂ e tio₂/sio₂ pelo método sol-gel”**, 2015. Disponível em: <http://www.posmat.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/Mestrado/Dissertacoes/Magnum_de_Jesus_04.2015-Angela.pdf>

JU, F., FU, X. **“Research on impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance”**, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/c4UEL5>>

KAZMERSKI, L.L., SARVER, T., AL-QARAGHULI, A. **“A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches”**, 2013. Disponível em: <<https://goo.gl/6dMnmW>>

KESMEZ, O., ERDEM, H.C., BURUNKAYA, E., ARPAÇ, E. **“Sol-gel preparation and characterization of anti-reflective and selfcleaning SiO₂-TiO₂ double-layer nanometric films”**, 2009. Disponível em: <<https://goo.gl/evrIS>>

KIM, H., LEE, S., HAN, Y., PARK, J. **“Preparation of dip-coated TiO₂ photocatalyst on ceramic foam pellets”**, 2006. Disponível em: <<https://goo.gl/Mf8h7r>>

KNOOW. **“Conceito de Albedo”**, 2007. Disponível em: <<http://www.knoow.net/ciencterravida/geografia/albedo.htm>>.

LABENS, Laboratório de Energia Solar da UTFPR. Curitiba, 2016. Disponível em: <<http://labens.ct.utfpr.edu.br/>>

LEMOS, L. O., FERREIRA, A. M., JOTA, P. R. S., SILVA, A. G. V. **“Efeito da Sujidade no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos”**, 2016. VI Congresso Brasileiros de Energia Solar (CBENS), Belo Horizonte- Minas Gerais.

MACHADO, K. S. V.; CORREA, N. **“Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba”**, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba.

MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. **“Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável”**, 2004. Disponível em: <goo.gl/OxlMcy>

MASUDA, S., FUJIBAYASHI, K., ISHIDA, K., INABA, H. **“Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain”**, 1972. Disponível em: <<https://goo.gl/48uTG1>>

MAZUMDER, M.K., HORENSTEIN, M.N., STARK, J., GIROUARD, P., SUMNER, R., HENDERSON, B., SADDER, O., HIDETAKA, I., BIRIS, A., SHARMA, R. **“Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators”**, 2013. Disponível em: <<https://goo.gl/MBJPR8>>

MEKHILEF, S., SAIDUR, R., KAMALISARVESTANI, M. **“Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells”**, 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/U6x4j>>

MME, Ministério de Minas e Energias. **“Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 - Relatório Final”**, 2016. Disponível em <goo.gl/7f77SL>

MME, Ministério de Minas e Energias. **“Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014 - Relatório Final”**, 2015a - Disponível em <<https://goo.gl/7eb7V7>>

MME, Ministério de Minas e Energias. **“Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar”**, 2015b. Disponível em:<<https://goo.gl/euKxH4>>

MOHAMED, A.O, HASAN, A. **“Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic solar modules in sahara environment”**, 2012. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/5fc1/7dc747599518334a1c82681d6a244d922500.pdf>>

PAULA, N. S., CAMARGO, C. C. S., AMORIM, E. N., CARDOSO, H. C. C., SOUTO, O. C. N., SILVA, S. B. **“Análise De Desempenho De Diferentes Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Em Operação Na Cidade De Itumbiara, Goiás”**, 2015. XIII CEEL (Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica), Uberlândia, Minas Gerais. Disponível em: <<https://goo.gl/0ss0wP>>

PAVAN, A.M., MELLIT, A., PIERI, D.D. **“The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants”**, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/LJgbNs>>

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **“Atlas Brasileiro de Energia Solar”**, 2006. Disponível em: <<http://goo.gl/IFXyvk>>

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **“Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”**. CRESESB. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/2gC9GQ>>

PRÁTIL. **“Energia solar em casa: quais são os equipamentos necessários ?”**, 2015. Disponível em: <<http://www.pratil.com.br/blog/2015/04/energia-solar-equipamentos/>>

RAMPINELLI, G. A., KRENZINGER, A., BÜHLER, A. J. **“Geração Distribuída Com Sistemas Fotovoltaicos Integrados Em Edificações: Metodologia Para Análise De Desempenho Energético”**, 2014. Mercofrio-9º Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento E Ventilação, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://goo.gl/aVeEki>>

RADIASOL. **“Radiasol 2 - Software para geração de dados horários de radiação solar”**, Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/45987>>

REN21. **“Renewable 2010 – Global Status Report”**, 2010. Disponível em <<http://goo.gl/ZqTkgF>>

REN21. **“Renewable 2011 – Global Status Report”**, 2011. Disponível em <<http://goo.gl/ZqTkgF>>

REN21. **“Renewable 2012 – Global Status Report”**, 2012. Disponível em <<http://goo.gl/ZqTkgF>>

REN21. **“Renewable 2013 – Global Status Report”**, 2013. Disponível em <<http://goo.gl/ZqTkgF>>

REN21. **“Renewable 2014 – Global Status Report”**, 2014. Disponível em <<http://goo.gl/ZqTkgF>>

REN21. **“Renewable 2015 – Global Status Report”**, 2015. Disponível em <<http://goo.gl/BrhxqQ>>

REN21. **“Renewable 2016 – Global Status Report”**, 2016. Disponível em <<http://goo.gl/l861xA>>

RENEWENERGIA, Eficiência e Sustentabilidade para um mundo melhor. **“Manutenção preventiva: Solar fotovoltaico, poeira e pombos”**, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/oRYDia>>.

SAYYAH, A., HORENSTEIN, M. N., MAZUMDER, M. K. **“Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels”** Science Direct, Solar Energy, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/n3T9yo>>

SILVA, A. G. V. **“Desenvolvimento de filmes finos de sílica com propriedade autolimpante e antirreflexiva: síntese, funcionalização e caracterização”**, 2016. Dissertação (mestrado), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Minas Gerais.

SOLARWATERS, Eficiência Energética. **“Manutenção dos Sistemas Solares Fotovoltaico”**, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/zv21Ea>>

TEJWANI, R., SOLANKI, C.S. **“360 sun tracking with automated cleaning system for solar PV modules”**, 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/oyJBlz>>

TIEPOLO, Gerson Máximo. **“Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná”**,

2015. Tese (doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS, Curitiba.

TREVELIN, Felipe Camargo. **“Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos”**, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos.

URBANETZ Jr, Jair. **“Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade”**, 2010. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC.

URBANETZ Jr., Jair. **“Introdução a Energia Solar Fotovoltaica e o SFVCR do Escritório Verde da UTFPR”**, Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Outubro, 2014. Disponível em :<<https://goo.gl/j8SxQa>>

URBANETZ JR, J., CASAGRANDE JR, E. F., TIEPOLO, G. M. **“Análise do Desempenho de Dois Anos de Operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR”**, CBENS, Recife, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/YwQ1ST>>

URBANETZ JR, J., TIEPOLO G. M., CASAGRANDE JR, E. F., TONIN F. S., MARIANO J. D. **“Geração Distribuída Fotovoltaica: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR em Curitiba”**. X CBPE, Gramado, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/s4pe0g>>

VIVAR, M., HERRERO, R., ANTÓN, I., MARTÍNEZ-MORENO, F., MORETÓN, R., SALA, G., BLAKERS, A.W., SMELTINK, J. **“Effect of soiling in CPV systems”**, 2010. Disponível em: <oa.upm.es/id/eprint/22357/contentes>

YAO, L., HE. J. **“Recent progress in antireflection and self-cleaning technology – from surface engineering to functional surfaces”**, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/l1Rhiw>>

APÊNDICE A

TABELAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA MENSAL NO PLANO HORIZONTAL E INCLINADO, PRODUTIVIDADE, TAXA DE DESEMPENHO E FATOR DE CAPACIDADE DO ESCRITÓRIO VERDE E NEOVILLE.

Tabela 8 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Escritório Verde (kWh).

Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	273	225	304	249	254	248
Fev	240	188	278	190	203	252
Mar	272	175	193	184	213	195
Abr	187	185	151	170	223	168
Mai	137	147	149	135	131	139
Jun	112	112	134	144	150	
Jul	158	144	148	130	179	
Ago	196	170	197	189	181	
Set	211	184	181	180	258	
Out	206	258	244	183	201	
Nov	218	216	215	165	244	
Dez	234	202	221	213	234	
Total	2444.00	2206.00	2415.00	2132.00	2471.00	1002.00

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK E BUENO (2016).

Tabela 9 - Irradiação média diária no plano horizontal no Escritório Verde (kWh/m².dia).

Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	5.65	5.12	6.14	5.98	5.41	5.19
Fev	5.21	4.68	5.32	4.82	4.59	5.68
Mar	5.31	3.78	4.35	4.01	4.38	3.91
Abr	3.76	4.16	3.14	3.71	4.62	3.37
Mai	2.78	3.07	2.97	2.79	2.63	2.76
Jun	2.15	2.39	2.59	2.94	2.86	
Jul	2.81	2.95	3.03	2.78	3.37	
Ago	4.28	3.66	4.18	4.28	3.62	
Set	4.65	3.70	4.39	4.08	5.00	
Out	4.69	5.11	5.85	3.71	4.12	
Nov	5.22	4.82	5.27	3.58	5.09	
Dez	5.45	5.55	5.28	4.53	4.82	

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 10 - Irradiação média diária no plano inclinado no Escritório Verde (kWh/m².dia).

Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	5.62	5.12	6.09	5.94	5.40	5.18
Fev	5.26	4.73	5.37	4.87	4.64	5.74
Mar	5.54	3.89	4.50	4.13	4.53	4.03
Abr	3.99	4.47	3.28	3.93	5.03	3.54
Mai	2.98	3.34	3.22	3.00	2.80	2.96
Jun	2.30	2.59	2.85	3.31	3.20	
Jul	3.09	3.27	3.38	3.05	3.84	
Ago	4.75	3.96	4.62	4.75	3.91	
Set	4.92	3.85	4.62	4.27	5.32	
Out	4.79	5.22	5.99	3.78	4.20	
Nov	5.22	4.83	5.27	3.61	5.10	
Dez	5.42	5.52	5.26	4.54	4.82	

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 11 - Produtividade (Yield) do Escritório Verde (kWh/kWp).

Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	130.00	107.14	144.76	118.57	120.95	118.10
Fev	114.29	89.52	132.38	90.48	96.67	120.00
Mar	129.52	83.33	91.90	87.62	101.43	92.86
Abr	89.05	88.10	71.90	80.95	106.19	80.00
Mai	65.24	70.00	70.95	64.29	62.38	66.19
Jun	53.33	53.33	63.81	68.57	71.43	0.00
Jul	75.24	68.57	70.48	61.90	85.24	0.00
Ago	93.33	80.95	93.81	90.00	86.19	0.00
Set	100.48	87.62	86.19	85.71	122.86	0.00
Out	98.10	122.86	116.19	87.14	95.71	0.00
Nov	103.81	102.86	102.38	78.57	116.19	0.00
Dez	111.43	96.19	105.24	101.43	111.43	0.00
Anual	1163.81	1050.48	1150.00	1015.24	1176.67	477.14

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: Os meses destacados em azul são os meses em que tiveram o primeiro ciclo, um mês, de operação após as limpezas.

Tabela 12 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Escritório Verde (%).

Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	74.59%	67.54%	76.74%	64.41%	72.32%	73.50%
Fev	74.89%	67.58%	87.99%	66.35%	71.84%	74.73%
Mar	75.46%	69.12%	65.94%	68.39%	72.28%	74.38%
Abr	74.32%	65.74%	73.01%	68.59%	70.34%	75.27%
Mai	70.52%	67.57%	71.15%	69.22%	71.82%	72.16%
Jun	77.29%	68.53%	74.68%	69.01%	74.34%	
Jul	78.62%	67.64%	67.34%	65.45%	71.60%	
Ago	63.40%	65.88%	65.47%	61.13%	71.07%	
Set	68.11%	75.84%	62.20%	66.91%	76.99%	
Out	66.13%	75.92%	62.57%	74.43%	73.57%	
Nov	66.24%	70.93%	64.72%	72.51%	75.99%	
Dez	66.33%	56.26%	64.55%	72.05%	74.59%	
Anual	71.33%	68.21%	69.70%	68.20%	73.06%	74.01%

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: Os meses destacados em azul são os meses em que tiveram o primeiro ciclo, um mês, de operação após as limpezas.

Tabela 13 – Fator de Capacidade (FC) do Escritório Verde (%).

Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	17.47%	14.40%	19.46%	15.94%	16.26%	15.87%
Fev	16.42%	13.32%	19.70%	13.46%	13.89%	17.86%
Mar	17.41%	11.20%	12.35%	11.78%	13.63%	12.48%
Abr	12.37%	12.24%	9.99%	11.24%	14.75%	11.11%
Mai	8.77%	9.41%	9.54%	8.64%	8.38%	8.90%
Jun	7.41%	7.41%	8.86%	9.52%	9.92%	
Jul	10.11%	9.22%	9.47%	8.32%	11.46%	
Ago	12.54%	10.88%	12.61%	12.10%	11.58%	
Set	13.96%	12.17%	11.97%	11.90%	17.06%	
Out	13.18%	16.51%	15.62%	11.71%	12.86%	
Nov	14.42%	14.29%	14.22%	10.91%	16.14%	
Dez	14.98%	12.93%	14.14%	13.63%	14.98%	
Anual	13.25%	12.00%	13.16%	11.60%	13.41%	13.24%

Fonte: Adaptado de MACHADO e CORREA (2015), ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: Os meses destacados em azul são os meses em que tiveram o primeiro ciclo, um mês, de operação após as limpezas.

Tabela 14 - Geração de Energia Elétrica do Sistema Fotovoltaico do Neville (kWh).

Mês	2016	2017
Jan	0	1203.8
Fev	50.4	1254.7
Mar	1100.8	937.1
Abr	1329.3	856.8
Mai	802.3	792.9
Jun	919	
Jul	1106.2	
Ago	775.5	
Set	1263.6	
Out	979.2	
Nov	1158.4	
Dez	1082.7	
Total	10567.40	5045.30

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 15 - Irradiação média diária no plano horizontal no Neville (kWh/m².dia).

Mês	2016	2017
Jan	5.41	5.19
Fev	4.59	5.68
Mar	4.38	3.91
Abr	4.62	3.37
Mai	2.63	2.76
Jun	2.86	
Jul	3.37	
Ago	3.62	
Set	5.00	
Out	4.12	
Nov	5.09	
Dez	4.82	

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 16 - Irradiação média diária no plano inclinado no Neville (kWh/m².dia).

Mês	2016	2017
Jan	5.26	5.06
Fev	4.59	5.66
Mar	4.55	4.03
Abr	5.24	3.61
Mai	2.89	3.06
Jun	3.40	
Jul	4.13	
Ago	4.07	
Set	5.44	
Out	4.17	
Nov	4.99	
Dez	4.71	

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Tabela 17 - Produtividade (Yield) do Neville (kWh/kWp).

Mês	2016	2017
Jan	0.00	118.02
Fev	4.94	123.01
Mar	107.92	91.87
Abr	130.32	84.00
Mai	78.66	77.74
Jun	90.10	0.00
Jul	108.45	0.00
Ago	76.03	0.00
Set	123.88	0.00
Out	96.00	0.00
Nov	113.57	0.00
Dez	106.15	0.00
Anual	1036.02	494.64

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

Tabela 18 - Desempenho Global/Taxa de Desempenho (PR) do Neville (%).

Mês	2016	2017
Jan	0.00%	75.21%
Fev	3.71%	77.67%
Mar	76.58%	73.47%
Abr	82.87%	77.52%
Mai	87.80%	81.89%
Jun	88.23%	
Jul	84.75%	
Ago	60.23%	
Set	75.85%	
Out	74.19%	
Nov	75.80%	
Dez	72.70%	
Anual	65.23%	77.15%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.

Tabela 19 – Fator de Capacidade (FC) do Neville (%).

Mês	2016	2017
Jan	0.00%	15.86%
Fev	0.71%	18.31%
Mar	14.51%	12.35%
Abr	18.10%	11.67%
Mai	10.57%	10.45%
Jun	12.51%	
Jul	14.58%	
Ago	10.22%	
Set	17.21%	
Out	12.90%	
Nov	15.77%	
Dez	14.27%	
Anual	11.78%	13.73%

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, RANK e BUENO (2016).

Nota: O mês destacado em azul é o mês em que tive o primeiro ciclo, um mês, de operação após a limpeza.