

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS FRANCISCO BELTRÃO  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

MARIANA FAVERSANI NUERNBERG

**EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS EM DIFERENTES PROCESSOS DE  
MANUTENÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2019

MARIANA FAVERSANI NUERNBERG

**EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS EM DIFERENTES PROCESSOS DE  
MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação como requisito parcial para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da UTFPR, Câmpus Francisco Beltrão.

Orientador: Prof. Dr. Adir Silvério Cembranel

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> MSc. Izadora Consalter Pereira

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2019

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
**Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2**

**EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS EM DIFERENTES PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**

por

**Mariana Faversani Nuernberg**

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado às 10:30 do dia 28 de novembro de 2019, como requisito para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Francisco Beltrão. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

---

**Prof. Dr. Wagner De Aguiar**  
Coordenador do Curso de  
Engenharia Ambiental

---

**Prof. Dr. Adir Silvério  
Cembranel**  
Professor Orientador

---

**Prof. MSc. Izadora Consalter  
Pereira**  
Professora Coorientadora

---

**Prof. Dra. Claudia Eugênia Castro  
Bravo**  
Membro da Banca

---

**Prof. Dra. Denise Andréia Szymczak**  
Professor do TCC2

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental”

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Rita Faversoni, que sempre me disse que a única coisa que não podem roubar de você é o conhecimento e por isso agradeço por ter me dado o privilégio, suporte e apoio para estudar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por toda força nos momentos de dificuldades, e por colocar pessoas na minha vida que foram meu apoio e suporte nesta etapa.

Ao professor Dr. Adir Silvério Cembranel, pela orientação, confiança, paciência e dedicação visando sempre o sucesso deste trabalho e me ajudando sempre que busquei seu auxílio.

A professora MSc. Izadora Consalter Pereira, primeiramente por aceitar o convite para coorientação deste trabalho, pela dedicação, amparo, companheirismo e amizade, a qual se tornou uma inspiração como pessoa e como profissional.

A Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Claudia Eugênia Castro Bravo, por aceitar o convite para fazer parte da banca avaliadora, e por todas suas contribuições para este estudo, e principalmente por todo auxílio e apoio durante toda a trajetória acadêmica.

A todos os meus familiares por ser meu suporte, e motivo de nunca desistir e ter me possibilitado de alguma forma na realização do meu sonho, em especial Rita Faversoni, Julia Faversoni Sartor, Amélia Faversoni Pagno, Maria Inês Pereira, Ani Carolini Pereira e Tiago Pagno, nada seria possível sem todo apoio e paciência.

Ao meu namorado Luiz Fernando Tronco, por estar do meu lado em todos os momentos, me amparando, incentivando e ajudando. E principalmente pelo companheirismo e paciência.

As minhas amigas Enaile, Danieli, Marina e Débora pela amizade, paciência, incentivo e por estarem sempre ao meu lado.

A empresa Macro Recuperadora de Transformadores Ltda, em especial a Milton C.R. Marcante, por não medir esforços para ajudar, e possibilitar a aplicação deste estudo.

E por fim, a todos os professores e servidores que de alguma maneira contribuíram para a minha formação acadêmica e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Francisco Beltrão.

## RESUMO

NUERNBERG, Mariana F. **Eficiência na Geração de Energia Elétrica de Painéis Fotovoltaicos em Diferentes Processos de Manutenção**. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2019.

As elevadas concentrações de poluentes atmosféricos, gerados principalmente pela utilização de fontes de energia não renováveis, tem motivado a buscar por diversificação na matriz energética mundial. Além disso, os padrões atuais de produção de energia são estruturados no uso de recursos não renováveis, especialmente a energia nuclear e os combustíveis fósseis. Ademais, estas fontes energéticas geram elevado impacto ao meio ambiente. Diante desse cenário, a utilização de painéis fotovoltaicos apresenta-se como uma alternativa promissora, eficaz e inesgotável na geração de energia. Contudo, o acúmulo de sujeira na superfície das placas resulta na perda de eficiência na geração. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de painéis fotovoltaicos na geração de energia elétrica, considerando três diferentes sistemas de manutenção (tratamento) das placas fotovoltaicas. No tratamento 1 (T1) ocorreram limpezas manuais dos painéis, com a aplicação de água não pressurizada e utilização de detergente neutro. No segundo tratamento (T2) foram realizadas limpezas manuais por meio do escoamento de água não pressurizada, simulando um aspersor de água durante 60 segundos. Por fim, no terceiro tratamento (T3), não foram realizadas intervenções nos painéis. Assim, dados de produtividade foram coletados periodicamente e realizou-se a avaliação da eficiência e a viabilidade econômica de cada tratamento. A partir dos resultados, foi possível verificar com relação a eficiência, que o Tratamento 1 apresentou-se com maior geração de energia. Entretanto, o Tratamento 3 demonstrou-se a melhor opção em termos de investimentos econômicos.

**Palavras-chave:** Matriz energética, fontes renováveis, sujeira.

## ABSTRACT

NUERNBERG, Mariana F. **Efficiency in electric energy generation of photovoltaic panels in different maintenance processes.** 2019. 60 f. Course conclusion paper (graduation) - University degree in environmental engineering. Technological Federal university of Paraná. Francisco Beltrão, 2019.

The elevated levels of atmospheric pollutants mostly produced with the use of non renewable resources of energy has motivated the country to search diversification in the energetic matrix. Furthermore, the current standards of energy production are structured in the use of non renewable energy, especially the nuclear energy and the fossil fuels. In addition, these energy sources result in elevated impact in the local environment. In the face of the current situation, the photovoltaic panels perform as a promising and effective alternative that is able to show the use of an abundant and endless source. Although, the dirt accumulation in the units surface results the loss of efficiency in the energy generation. Therefore, in this assignment was analysed the photovoltaic panels efficiency in the electric energy generation, considering three different maintenance systems of the photovoltaic panels. In the first treatment (T1) happened manual cleaning of the panels, with non pressurized water application and using neutral detergent. In the second treatment (T2) were made manual cleaning through non pressurized water drain, simulating a water sprinkler during 60 seconds. Lastly, in the third treatment (T3), weren't made interventions in the panels. Accordingly, it was collected the production data and realized the efficiency evaluation and the economic viability of each maintenance system. Based on the results, it was possibly to verify that related with the efficiency, the first treatment had the biggest energy generation. However, the third treatment demonstrated the best economic option.

**Keywords:** energetic matrix, renewable sources, dirtiness.

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comportamento das temperaturas. ....	32
Gráfico 2 - Precipitação média. ....	32
Gráfico 3 - Geração de energia anterior ao processo de limpeza. ....	41
Gráfico 4 - Variação na geração acumulada de energia. ....	43
Gráfico 5 - Geração de energia acumulada ao longo do experimento. ....	43
Gráfico 6 - Processos de manutenção durante todo período de estudo. ....	44
Gráfico 7 - Dados de precipitação de chuva.....	45
Gráfico 8 - Geração de energia acumulada dos tratamentos 1 e 2. ....	45
Gráfico 9 - Análise estatística pelo teste de Tukey a 5%. ....	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rotação da Terra ao longo do ano.....	19
Figura 2 - Painel fotovoltaico.....	21
Figura 3 - Capacidade instalada global de sistemas fotovoltaicos.....	23
Figura 4 - Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica.....	24
Figura 5 - Módulo fotovoltaico modelo do HR-315P-24/Ba.....	29
Figura 6 - Micro inversor modelo YC500A.....	30
Figura 7 - Local de estudo na cidade de Pato Branco.....	30
Figura 8 - Detalhe da sujidade nos módulos antes da limpeza.....	31
Figura 9 - Mapa da precipitação anual do estado do Paraná.....	33
Figura 10 - Mapa da insolação anual do estado do Paraná.....	34
Figura 11 - Irradiação solar no plano inclinado Pato Branco.....	35
Figura 12 - Processo de limpeza prévia.....	36
Figura 13- Esquemático dos sistemas de manutenção.....	37
Figura 14 - Primeiro tratamento (T1).....	38
Figura 15 - Segundo tratamento (T2).....	38
Figura 16 - Limpeza prévia dos painéis fotovoltaicos.....	41
Figura 17 - Terceiro tratamento (T3).....	46
Figura 18 - Tarifa convencional subgrupo B3.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de irradiação e produtividade total anual média.....	25
Tabela 2 - Dados de irradiação solar em Pato Branco.....	35
Tabela 3 - Datas de coleta de dados e manutenção das placas.....	37
Tabela 4 - Geração de energia em diferentes etapas do estudo.....	42
Tabela 5 - Geração de energia acumulada nos tratamentos. ....	47
Tabela 6 - Geração total de energia elétrica para cada tratamento. ....	48
Tabela 7- Valores obtidos pela geração de energia. ....	49
Tabela 8 - Média mensal dos valores obtidos pela geração de energia.....	50
Tabela 9 - Custo para aplicação do tratamento 1.....	50
Tabela 10 - Valores obtidos para cada processo de manutenção.....	51

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
2 OBJETIVOS .....	14
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	15
3.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	15
3.2 ENERGIA SOLAR .....	17
3.3 RADIAÇÃO SOLAR .....	18
3.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	20
3.4.1 Componentes do Sistema Fotovoltaico.....	24
3.5 POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO ESTADO DO PARANÁ.....	25
3.6 EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS RELACIONADA A SUJIDADE	26
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E DO OBJETO DE ESTUDO.....	29
4.1.1 Clima .....	31
4.1.2 Irradiação Solar .....	34
4.2 SISTEMAS DE MANUTENÇÃO E COLETA DE DADOS.....	35
4.3 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA .....	39
4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE MANUTENÇÃO .....	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 SISTEMAS DE MANUTENÇÃO, COLETAS E ANÁLISE DOS DADOS .....	40
5.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA .....	47
5.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE MANUTENÇÃO .....	48
6 CONCLUSÕES .....	53
REFERÊNCIAS.....	54

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica no mundo vem exigindo cada vez mais investimentos em recursos energéticos, contudo, o aumento do consumo desses recursos tem elevado os níveis de emissão de gases nocivos à atmosfera. Por tal razão, se faz necessário a busca por energias renováveis, que proponham uma geração de energia sustentável, com menor emissão de gases nocivos e menores impactos ambientais (SOUSA, 2018).

No Brasil, a maior fonte de geração de energia elétrica são as usinas hidroelétricas, entretanto este cenário pretende ser ocupado também por energia fotovoltaica, por tratar-se de uma fonte de energia limpa, renovável e de alto potencial de geração (GALDINO, 2018).

Neste contexto, no ano de 2012, entrou em vigor no Brasil a Resolução Normativa ANEEL nº 482, que determina a regulamentação do funcionamento das mini e micro usinas geradoras de energia elétrica, a partir de sistemas fotovoltaicos, na qual, o consumidor pode gerar a sua própria energia elétrica e fornecer o excedente para a rede de distribuição local, resultando no impulso ao crescimento das instalações destes sistemas (ANEEL, 2008).

Nos últimos anos, o interesse na geração de energia solar assim como pela capacidade instalada de painéis fotovoltaicos expandiu rapidamente no país. Este crescimento está relacionado ao tempo de retorno sobre os investimentos financeiros, cada vez menores, tornando a energia solar uma alternativa economicamente viável a suprir a demanda de energia elétrica (MERLO, 2017).

Apesar do aumento significativo na contribuição de geração de energia elétrica nos últimos anos e da melhora na eficiência dos materiais fotovoltaicos, é primordial que as instalações de painéis fotovoltaicos utilizem sua capacidade máxima de geração e a entrega seja de forma consistente e confiável. Fatores ambientais, como temperatura, ventos e poeiras podem prejudicar consideravelmente a performance do sistema (RAO, 2013).

A diferença na geração de energia entre módulos limpos e os com acúmulo de sujidade, principalmente em instalações de grande porte, podem acarretar sérios problemas de ordem econômica, quando diminuída a capacidade geradora de energia (ALVES, 2018).

Deste modo, o tema desenvolvido neste trabalho teve como objetivo analisar a eficiência de painéis fotovoltaicos a partir da avaliação da geração de energia elétrica nos diferentes sistemas de manutenção aplicados aos painéis fotovoltaicos. Além disso, determinou-se a alta produtividade do sistema, utilizando como estudo de caso o sistema fotovoltaico instalado na empresa Macro Recuperadora de Transformadores Ltda, no município de Pato Branco-PR.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficiência de painéis fotovoltaicos instalados no município de Pato Branco-PR, na geração de energia elétrica considerando diferentes sistemas de manutenção das placas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar três diferentes sistemas de manutenção de painéis fotovoltaicos;
2. Coletar dados de produtividade de energia dos painéis fotovoltaicos considerando os diferentes sistemas de manutenção;
3. Analisar a eficiência dos sistemas de manutenção na geração de energia;
4. Avaliar a viabilidade econômica dos processos de manutenção.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A capacidade de regeneração dos recursos utilizados para a geração de energia faz com que uma fonte de energia seja denominada renovável, assim, estão situadas as fontes hídrica e solar, consideradas em todo o mundo como fontes importantes de energia (DUPONT, 2015).

Os padrões atuais de consumo de energia são movidos pelo uso de recursos esgotáveis, seja por energia nuclear ou por combustíveis fósseis. Estas fontes de energia são caracterizadas como não renováveis pois seus processos de uso são irreversíveis e geram impacto ao meio ambiente. Não obstante, sua utilização tem alterado substancialmente o balanço térmico do planeta e a composição da atmosfera, em razão da emissão de poluentes e gases de efeito estufa provocando o aquecimento global, além de colocar em risco o abastecimento de energia a longo prazo (GOLDEMBERG, 2007).

O momento tecnológico atual apresenta obstáculos relacionados a sustentabilidade. O segmento que tem recebido maior ênfase é o energético, tendo em vista que os hábitos atuais vêm apresentando maior demanda por energia. Com o provável esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, a mudança pela utilização de fontes renováveis em grandes proporções, retrata o grande desafio para o próximo século (GALDINO, 2018). Assim, a busca por fontes de energia renováveis tem sido pesquisada em diferentes áreas com o intuito de atender a demanda de energia elétrica de maneira sustentável e que possam causar o mínimo de impacto ao meio ambiente (DUPONT, 2015).

Deste modo, o desenvolvimento de fontes de energias alternativas, como a biomassa, energia solar e eólica tem ganhado cada vez mais importância na última década. Uma das principais razões se deve ao aumento da preocupação ambiental, em particular as consequências relacionadas ao efeito estufa (SONAI, 2015). Essa preocupação refere-se ao fato que aproximadamente dois terços das emissões dos gases do efeito estufa (GEEs) são provenientes da geração e uso de energias não renováveis, as quais representam aproximadamente 80% de toda energia produzida. No entanto, este número tem sido reduzido nos últimos anos devido ao uso de fontes renováveis de energia (CELESTINO, 2016).

De acordo com Agência Internacional de Energia (IEA), os combustíveis fósseis ainda serão a fonte predominante de energia mundial nas próximas duas décadas, contudo, terão sua participação reduzida na matriz energética, em função da gradativa introdução de energia renovável, em especial a solar e eólica, devido à queda dos custos da tecnologia e pela manutenção dos subsídios (EPE, 2015).

O acelerado crescimento do setor elétrico foi alavancado pelas iniciativas de políticas públicas, responsabilidade ambiental e crescente demanda de energia nos países em desenvolvimentos. Ao final de 2015, a maioria dos países tinham políticas de apoio a energias renováveis, as quais receberam maior relevância durante o ano devido a realização da COP21, a “Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas” (REN 21, 2016).

O histórico acordo de 2015 busca limitar a elevação da temperatura média global abaixo do 2°C neste século. As energias renováveis juntamente com a crescente melhoria da eficiência energética são os principais pilares para uma solução climática viável. Juntas, elas podem prover mais de 90% de redução da emissão de CO<sub>2</sub> relacionada à energia total necessária (IRENA, 2018).

A alteração da matriz energética para o uso de fontes de energias renováveis se mostra viável e vantajosa, uma vez que apresentam baixo ou quase nulo impacto ambiental, não afetando o balanço térmico e possuindo reservas de energia praticamente inesgotáveis (GOLDEMBERG, 2007).

Segundo IRENA (2018), a alteração global da matriz energética proporciona custos adicionais que chegariam a US \$ 1,7 bilhão por ano em 2050. Entretanto, a redução da poluição atmosférica, melhores índices de saúde, aumento da segurança energética, diversificação do fornecimento de energia e menor dano ambiental superariam em larga escala esses custos. Além disso, a transição energética apresenta benefícios como a melhora significativa da pegada socioeconômica global do sistema de energia em comparação com os negócios habituais, melhorando o bem-estar global, o PIB e a geração de empregos.

Essa transição energética é sustentada pela queda dos custos por energias renováveis. O acréscimo da capacidade de geração de energia renovável está ultrapassando o de geração de combustível fóssil. Pelo sexto ano seguido, o acréscimo de capacidade de geração líquida das fontes de energia renovável supera a de fontes convencionais. No ano de 2017, o setor adicionou 167 GW de capacidade de geração de energia renovável, um aumento de 8,3% em relação ao

ano anterior, mantendo sua taxa de crescimento anual desde 2010 entre 8 a 9%. Estima-se que a geração de energia renovável foi responsável por um trimestre da geração total de energia global em 2017 (IRENA, 2018).

### 3.2 ENERGIA SOLAR

A energia solar é responsável pela manutenção da vida no Planeta e a radiação solar apresenta uma importante fonte energética. A quantidade de energia solar, incidida na Terra, disponível para conversão de energia é em teoria mais de mil vezes suficiente para abastecer o consumo de energia primária da humanidade de acordo com os níveis atuais de consumo de energia. Além de superar em 10 vezes a reserva de combustíveis fósseis contida no planeta. O sol, responsável pelo desenvolvimento e manutenção da vida na terra é visto como fonte de energia inesgotável (GEA, 2012; PALZ, 1981).

A energia solar provém da luz e do calor do Sol, chegando a Terra nas formas luminosa e térmica. É utilizada em diferentes tecnologias, tais como aquecimento solar e energia solar fotovoltaica. A mesma desponta como uma alternativa promissora de energia, em razão do grande potencial, especialmente no Brasil, que se encontra em uma posição geográfica privilegiada (SONAI, 2015).

A maior parte de energia que incide a atmosfera terrestre manifesta-se sob forma de luz infravermelha e de raios ultravioletas. A captação dessa luz é transformada em algum tipo de energia, assim os equipamentos utilizados serão os determinantes de qual tipo de energia será obtida. Quando utilizada superfície escura, a energia solar será transformada em energia térmica, utilizada para aquecimento de fluídos e ambiente, e quando utilizado células fotovoltaicas será convertida diretamente em energia elétrica (ANEEL, 2008).

Muitas empresas estão aplicando o conceito de desenvolvimento sustentável, adotando atitudes e políticas ecologicamente corretas. A energia solar, renovável e limpa, é uma dessas alternativas para gerar eletricidade (ARAMIZU, 2010). Segundo Santos (2013), além da geração de eletricidade através do uso de células fotovoltaicas, o aquecimento de água através de sistemas com coletores solares são aplicações viáveis de utilização nos setores residenciais e industriais.

Em julho de 2016, o território nacional brasileiro possuía capacidade total instalada de 51,1 MW de potência em cerca de 3800 instalações (MME, 2016). Em outubro de 2017, houve um acréscimo de mais de oito vezes em relação a junho de 2016, sendo que a capacidade instalada subiu para 438,3 MW em aproximadamente 15,7 mil instalações. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia, PDE-2016, é estimado que a capacidade de geração solar instalada supere 13 GW em 2026 (MME, 2017).

A geração de energia solar no Brasil traz vantagens socioeconômicas para as regiões de baixo desenvolvimento econômico, como a região nordeste, pois nela se encontram os maiores índices de irradiações solares, sendo que o uso da terra e a arrecadações de impostos contribuem para o desenvolvimento local.

A média de irradiação anual no Brasil, oscila entre 1.200 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>, acima da média europeia, porém abaixo de regiões como Oriente médio, norte e sul da África, Índia, sudoeste dos EUA, México, Chile e Peru, que apresentam valores acima dos 3.000 kWh/m<sup>2</sup> anuais (MME, 2017).

### 3.3 RADIAÇÃO SOLAR

A intensidade da energia total incidente sobre a superfície terrestre, denominada radiação solar, varia de acordo com o local de sua aferição, condições climáticas e atmosféricas. Coordenadas como latitude e posição no tempo, ou seja, a hora do dia e o dia do ano interferem na quantidade de radiação solar incidente em determinada superfície, tendo em vista a inclinação do eixo em torno do qual a Terra rotaciona e da trajetória elíptica que a Terra percorre em torno do Sol ao longo do ano (CRESESB, 2000).

Por consequência, o período de exposição solar do dia, aquele em que há visibilidade do Sol ou de claridade, é diferente em algumas regiões e em períodos do ano. As variações mais acentuadas acontecem nas regiões polares e nos períodos em que o Sol atinge o maior afastamento angular da linha do equador, conhecido como solstício. Diferentemente das regiões próximas a linha do equador e durante o período em que o Sol corta a linha do equador, conhecido como equinócio, onde há maior regularidade de insolação diária (CRESESB, 2000).

Ao abordar o termo radiação solar, o conceito literário da expressão, refere-se inicialmente a dois termos, irradiância e irradiação. Com o propósito de esclarecer tais conceitos, em 2006 foi elaborada a norma brasileira NBR 10899:2006 – Terminologia sobre Energia Solar Fotovoltaica para padronizar os principais termos técnicos utilizados no âmbito da energia solar fotovoltaica no Brasil. Nessa oportunidade, foi definido que a irradiância solar refere-se ao índice na qual a radiação solar incide em uma superfície por unidade de área desta superfície, medida em  $W/m^2$ . Enquanto a irradiação solar é a irradiância assimilada durante um espaço de tempo, medida em  $Wh/m^2$  ou  $J/m^2$  (ABNT, 2006).

A irradiância, então, é a potência solar instantânea que atinge uma determinada área na superfície terrestre. A potência tem como dependente a distância entre o Sol e a superfície terrestre e se altera ao longo do ano devido aos movimentos de rotação e translação da Terra (GALDINO et al., 2018).

Figura 1 - Rotação da Terra ao longo do ano.



Fonte: ANEEL (2008).

As condições climáticas e a posição relativa do local observado em relação ao sol interferem na disponibilidade de radiação solar. Contudo, para fins de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, o valor frequentemente utilizado como parâmetro é a irradiância média que atinge a superfície terrestre sem a presença de nuvens, cerca de  $1.000 W/m^2$  (BOYLE, 2004). Para alguns projetos, um histórico de aferições de radiação solar, tanto direta como difusa, pode viabilizar ou não a instalação de sistemas fotovoltaicos e térmicos em determinadas regiões,

possibilitando maior proveito ao decorrer do ano quando as alterações de intensidade da radiação solar são mais intensas (CRESESB, 2000).

As condições ambientais que influenciam fundamentalmente no desempenho dos módulos fotovoltaicos são a irradiância e a temperatura das células. A alteração da intensidade da radiação solar causa alteração proporcional na geração de corrente. Deste modo, quando os valores de incidência de radiação forem menores no módulo, haverá uma redução dos valores de corrente, provocando redução na produtividade do sistema. Em contrapartida, quando os valores de incidência de radiação forem maiores no módulo, haverá um aumento nos valores de corrente. Isto porque um fóton com energia suficiente, energiza um elétron, assim, quanto maior o volume de elétrons energizados, o fluxo de corrente elétrica será maior (ALONSO, 2016).

### 3.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Em virtude da elevada participação das fontes não renováveis na matriz elétrica mundial, as quais são associadas ao aquecimento global pelas emissões de seus gases responsáveis pelo efeito estufa, diversas iniciativas, ao longo dos últimos anos, têm ocorrido com o propósito de tornar a matriz elétrica mundial cada vez mais limpa e sustentável. Dentre as fontes limpas e sustentáveis, a energia solar fotovoltaica é uma das mais promissoras e em maior evidência no cenário atual (TIEPOLO, 2015).

A energia solar fotovoltaica alcançada através da conversão direta de luz solar em eletricidade é denominada efeito fotovoltaico. A unidade fundamental para que ocorra o processo de conversão é a célula fotovoltaica, um instrumento construído com material semicondutor (ALVES, 2018).

Os semicondutores são materiais capazes de mudar facilmente sua condição de isolante para condutores, sendo caracterizados por possuir uma banda proibida entre as bandas de valência e banda de condução, em temperatura 0 Kelvin. A banda de condução estará vazia e a banda de valência totalmente preenchida de elétrons, posteriormente quando o material semicondutor é aquecido, ou seja, recebe energia, alguns elétrons se tornam livres e passam da banda de valência

para a banda de condução, conduzindo energia elétrica (SOARES JUNIOR, 2018; MUNDO EDUCAÇÃO).

A geração de energia pelo efeito fotovoltaico ocorre a partir do momento que os fótons, partículas elementares mediadoras da força eletromagnética, atingem as células fotovoltaicas excitando os elétrons que circundam os átomos, fazendo-os se desprendam. Os elétrons livres se deslocam através da corrente elétrica, para a parte da célula que está com ausência de elétrons. No decorrer do dia, os elétrons irão fluir em uma direção constantemente, deixando átomos e ocupando espaços em átomos diferentes (PORTAL SOLAR). O sistema é composto por um conjunto de painéis, conforme demonstrado na Figura 2, conectados a inversores, convertendo a energia de corrente contínua em corrente alternada (SOARES JUNIOR, 2018).

Figura 2 - Painel fotovoltaico.



Fonte: Portal Solar (2019).

No Brasil, entrou em vigor em 17 de abril de 2012 a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que foi alterada pela Resolução Normativa 687/2015, a qual determina a regulamentação para o funcionamento da micro e mini geração distribuída de energia elétrica, permitindo ao consumidor gerar a sua própria energia elétrica por fontes renováveis, fornecendo o excedente para a rede de distribuição do município (ANEEL, 2015).

Conforme a Resolução Normativa nº 687/2015, microgeradores são sistemas com potência igual ou de até 75 kW. Os minigeradores, por sua vez são centrais

geradoras de energia elétrica, com potência instalada acima de 75 kW e até 5 MW, para fontes renováveis de energia elétrica, conectadas na rede de distribuição (ANEEL, 2015).

Grande parte das células fotovoltaicas utilizam o silício como base de fabricação, devido a este material ser abundante na natureza e sua tecnologia ter avançado significativamente nos últimos anos (DUPONT, 2015). O silício pode ser constituído de cristais policristalinos, monocristalinos ou de silício amorfo. Dentre estas opções, as monocristalinas são as que possuem maior eficiência, atingindo entre 15% e 18% de eficiência quando produzidas em laboratórios (CRESESB, 2000).

Historicamente, a célula de silício monocristalino, é a mais utilizada como conversor direto de energia solar em energia elétrica, pois seu processo de fabricação é simples e bem desenvolvido. O processo inicia-se com a extração do cristal de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), que posteriormente é desoxidado em grandes fornos, purificado e por fim, solidificado. O procedimento descrito atinge grau de pureza entre 98 e 99%, considerado eficiente em relação a custo e ponto de vista energético. Quando adicionado outros dispositivos semicondutores de grau de pureza maior (até 99,9999%), faz com que o silício funcione, finalmente, como células fotovoltaicas (CRESESB, 2000).

As células de silício policristalino são obtidas por processos similares ao do silício monocristalino, permitindo a obtenção de níveis de eficiência similares. No entanto, por exigirem menores rigores de controle em sua fabricação, as células de silício policristalinas são viáveis financeiramente, porém, menos eficientes (CRESESB, 2000).

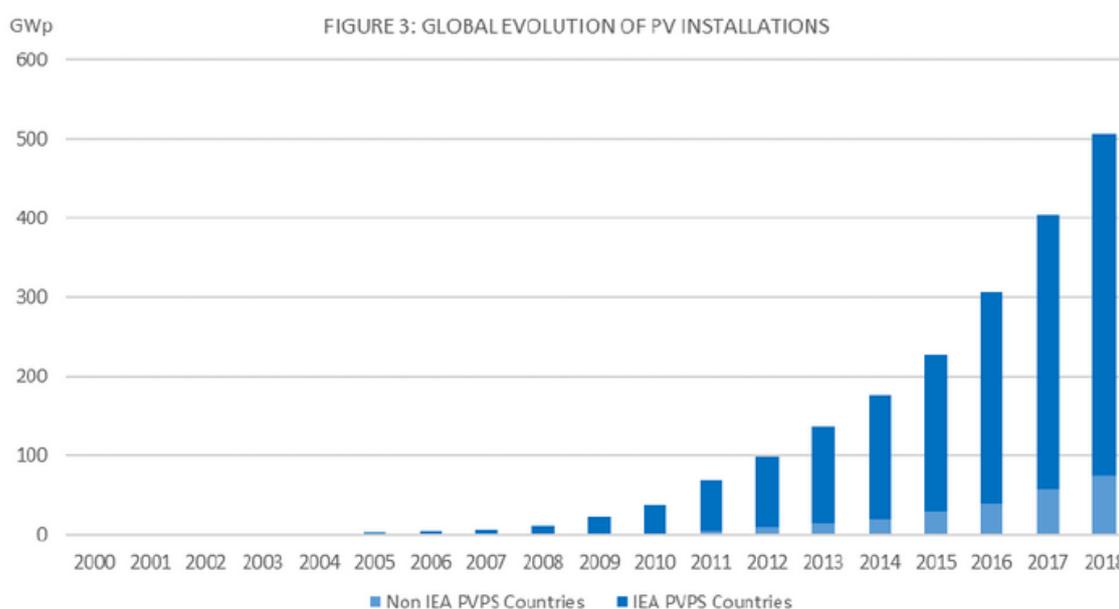
A célula de silício amorfo distingue-se da monocristalina e da policristalina devido ao alto grau de desarranjo na estrutura de seus átomos. Tem como vantagem seu processo de fabricação relativamente simples e baixo consumo de energia em sua produção, tornando-a menos onerosa. Apesar de seu custo de produção reduzido, o emprego do silício amorfo expõe desvantagens como baixa eficiência de conversão quando comparadas as células monocristalinas e policristalinas, além da degradação das células em seus primeiros meses de atividade, diminuindo a eficiência ao longo de sua vida útil (CRESESB, 2000).

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em três categorias distintas: sistema autônomo, híbrido e conectado à rede. O sistema autônomo é caracterizado

por uma unidade de controle de potência, armazenamento e inversores. O sistema híbrido composto por diferentes fontes de geração de energia elétrica, adicionados aos módulos fotovoltaicos com o intuito de otimizar a geração de energia elétrica. O sistema conectado à rede elétrica é apresentado como uma fonte essencial ao sistema elétrico no qual está ligado. Apesar do sistema depender da rede, essa desvantagem é contornada com a adição de sistemas de armazenamento, para quando houver falha na rede, existirá energia armazenada para sustentar a instalação elétrica (SOUSA, 2018).

A capacidade total instalada de geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos mundialmente, ao final de 2018, ultrapassou a marca de 500GW, conforme apresentado na Figura 3. A China continua na liderança com capacidade instalada de 176,1 GW, seguida pela União Europeia, 120,4 GW, Estados Unidos, 56,0 GW e Índia, 32,9 GW. Países que fazem parte da “International Energy Agency” acumulam uma capacidade de 429,6 GW, representando, 85%. Em contrapartida, demais países, dentre eles o Brasil, acumulam uma capacidade de 75,8 GW, equivalente a 15%. O Brasil aparece na 8ª posição entre os países não participantes com 2,2GW de capacidade instalada ao final de 2018 (IEA, 2019).

Figura 3 - Capacidade instalada global de sistemas fotovoltaicos.



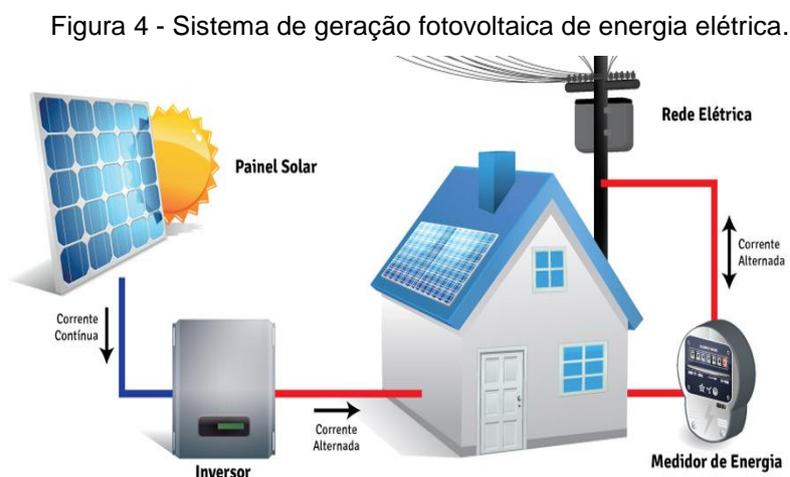
Fonte: IEA 2019.

### 3.4.1 Componentes do Sistema Fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos são capazes de transformar a energia dos raios do sol em energia elétrica. Seguindo o esquema de geração de energia por corrente contínua no painel fotovoltaico, passa para o inversor, responsável por converter 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 a rede elétrica de distribuição (BENEDITO, 2009). A Figura 4 demonstra o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

O medidor bidirecional de energia, calcula a quantidade de energia gerada pelos módulos e injetada na rede elétrica, a quantidade de energia que está sendo consumida no mês, sendo que ao final do mês faz-se o cálculo, a fim de determinar a quantidade de energia excedente à consumida e que gerará créditos a serem consumidos nos meses seguintes (BENEDITO, 2009).

Segundo a ANEEL (2015), o sistema das centrais geradoras continua conectado à rede elétrica que fornece energia quando não há geração por meio dos painéis fotovoltaicos. A energia produzida quando não consumida pela central geradora, é automaticamente injetada no sistema de distribuição, no qual o consumidor recebe crédito a ser consumido por um prazo de sessenta meses, podendo ser compensada em outra unidade consumidora, da qual seja de mesmo titular e unidade distribuidora.



Fonte: Solar Brasil (2019).

### 3.5 POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO ESTADO DO PARANÁ

O Estado do Paraná está situado ao sul do Brasil, com área de 199.880 km<sup>2</sup> e população estimada em 11.443.957 habitantes, distribuída em 399 municípios. No ano de 2017, a população paranaense apresentou consumo de energia elétrica de aproximadamente 30.726 GWh, correspondendo a 3,8% a mais em relação ao ano de 2016, de 29.598 GWh (IPARDES, 2013; EPE, 2018).

Apesar de deter apenas 4,9% do potencial instalado em energia solar fotovoltaica do Brasil, 59,4 MW, o estado do Paraná apresenta potencial para instalação elevado comparável aos melhores potenciais encontrados na Europa, com valores de Irradiação e Produtividade Total Anual Média conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de irradiação e produtividade total anual média.

Estado	Valor de Irradiação Total Anual (kWh/m <sup>2</sup> )			Valor de Produtividade Total Anual (kWh/kWp.ano)			Diferença percentual da Média obtida no Paraná em relação à Média obtida do país europeu
	Total Anual Mínimo	Total Anual Máximo	<b>Total Anual Média</b>	Total Anual Mínimo	Total Anual Máximo	<b>Total Anual Média</b>	
Paraná	1651	2119	<b>1986</b>	1238	1589	<b>1490</b>	
Portugal	1653	2250	<b>1996</b>	1240	1687	<b>1497</b>	-0,52%
Espanha	1283	2288	<b>1948</b>	963	1716	<b>1461</b>	1,97%
Grécia	1379	2325	<b>1897</b>	1034	1744	<b>1423</b>	4,71%
Turquia	1181	2306	<b>1873</b>	886	1729	<b>1405</b>	6,05%
Itália	927	2219	<b>1750</b>	695	1664	<b>1313</b>	13,48%

Fonte: TIEPOLO (2015).

Os menores índices de Irradiação e Produtividade Diária Média Mensal no Paraná geralmente ocorrem no mês de julho, 3,61 kWh/m<sup>2</sup>.dia e 2,71 kWh/kWp.dia, respectivamente. Em contrapartida o mês de janeiro registra o maior valor com 6,46 kWh/m<sup>2</sup>.dia e 4,85 kWh/kWp.dia, expondo a grande oscilação que acontece durante o ano no estado (TIEPOLO, 2015). As menores médias anuais acontecem na região entre o litoral paranaense e a serra do mar, localidades com maiores índices de nebulosidade, dificultando a incidência da radiação solar nos painéis fotovoltaicos (TIEPOLO, 2015).

### 3.6 EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS RELACIONADA A SUJIDADE

O grande desafio para o aumento da geração de energia solar é o *payback*, uma técnica muito utilizada nas empresas para análise do prazo de retorno do investimento em um projeto. Para que este tempo de retorno seja reduzido, os custos com manutenção devem ser minimizados, envolvendo a substituição de equipamentos que apresentam desempenho insatisfatórios e necessidade de limpeza das placas solares periodicamente (SOARES JUNIOR, 2018).

O desempenho dos painéis fotovoltaicos pode ser prejudicado por diversos fatores, como a instalação, o sistema fotovoltaico e fatores ambientais. O acúmulo de poeira, dejetos de animais e poluição são os principais fatores de impacto ambiental, pois bloqueiam parte da luz solar que não pode ser recebida pelos painéis, resultando em uma perda na geração de energia (FOUAD et al., 2017). O acúmulo de sujeira nos painéis fotovoltaicos promove efeito de barreira para a passagem dos fótons, prejudicando na produção do sistema ao decorrer do tempo (SAMPLE et al., 2016).

Para Cavalcante (2016), as concentrações de impurezas na superfície dos painéis fotovoltaicos diminuem a eficiência na geração de energia, resultado do acúmulo de fuligem, poeira e poluição, que causam um sombreamento nas células impedindo a absorção da totalidade da radiação incidida sobre os mesmos.

A quantidade de sujeira acumulada nos painéis solares pode acarretar redução significativa no desempenho do sistema, tornando-se absolutamente necessária a manutenção periódica do mesmo, de forma a garantir que seu desempenho não seja influenciado pelo acúmulo de sujeira (SOARES JUNIOR, 2018).

A localização e posição de instalação dos painéis fotovoltaicos influenciam para que agentes externos, como edificações, árvores e folhas, diminuam a radiação que incide sobre os painéis devido ao sombreamento parcial ou total. Além disso, a circulação de veículos próximo ao local, contribuem para o acúmulo de poeira e fuligem sobre os painéis fotovoltaicos, comprometendo a sua eficiência. Assim como os animais, que com sua presença possam sujar os painéis, como exemplo as aves (RENEWENERGIA, 2015).

O acúmulo de sujeira nos painéis solares é influenciado em razão da aspereza e inclinação da placa, pois quanto mais horizontal a superfície, maior a

ocorrência de acumulação de sujeira. Ainda, as condições climáticas como brisa lenta, fluxo de ar e frequência de chuvas contribuem para a aglomeração de sujeira (SOARES JUNIOR, 2018).

Chuvas periódicas podem auxiliar, em alguns casos, com a redução da sujeira acumulada nas placas, sendo que a autolimpeza decorrente das precipitações ocorre de maneira mais eficiente quanto maior a sua inclinação, sendo necessário uma angulação mínima de  $10^\circ$  do módulo (SOARES JUNIOR, 2018).

Em localizações onde há elevado acúmulo de poeira, não realizar a limpeza dos painéis com determinada frequência, prejudica consideravelmente a performance do sistema. Em painéis onde existem dejetos de animais e folhas, a recomendação é que o sistema seja limpo uma vez ao mês com o uso de água, panos ou ferramentas não nocivas ao painel fotovoltaico. Casos de até 10% de perda de performance do sistema já foram registrados no Brasil (PINHO e GALDINO, 2014; RENEWENERGIA, 2015).

Segundo Sousa (2018), a deposição de resíduos e temperatura dos módulos afeta na geração de energia elétrica. A utilização de água para limpeza dos painéis resulta em uma redução de cerca de  $10^\circ\text{C}$  na temperatura de superfície do módulo, contribuindo para o aumento da produção de energia e na vida útil do painel.

Segundo Miller et al. (2009), os sistemas fotovoltaicos em ambiente urbano de clima árido podem apresentar perdas decorrentes do acúmulo de sujeira. Períodos com chuvas de grande intensidade não recuperaram totalmente a capacidade de geração devido à sujeira dos módulos decorrente de poeira, matéria vegetal e excrementos de pássaros, criando perdas contínuas. Dependendo da magnitude da poluição, faz-se necessárias limpezas rotineiras para recuperar as perdas geradas pelos painéis.

Segundo Maghami et al. (2016), o fato de a superfície da placa apresentar rugosidade e não ser constituída somente de superfície plana, permite que mais sujeira se acumule. A inclinação da placa também é um aspecto que interfere no acúmulo de sujeira na mesma, pois quanto mais horizontal é a superfície, maior pode ser a quantidade acumulada. Outros fatores como brisa lenta, o fluxo de ar devido ao vento e periodicidade de chuvas colaboram para o surgimento do acúmulo de sujeira.

Chen (2018) apresentou três impactos causados pela poeira na superfície dos painéis fotovoltaicos: o efeito de proteção, efeito de temperatura e efeito de

corrosão. Conforme aumenta a densidade de poeira acumulada nos módulos, ocorre uma redução na potência máxima em cerca de 34% para partículas de 10 g/m<sup>2</sup>.

A avaliação de sujidade em painéis fotovoltaicos pode ser realizada por três modelos, primeiro pela obtenção da potência máxima e a corrente de curto circuito, pela aferição de tensão (V) e corrente (I), obtendo uma curva IxV. O segundo modelo consiste na avaliação da corrente de curto circuito, a qual é proporcional à radiação recebida pelo painel ou, por último, pela avaliação da performance do sistema em termos de produção de energia, onde é possível constatar o valor real de perda do sistema fotovoltaico (HICKEL et al., 2016).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E DO OBJETO DE ESTUDO

Esta pesquisa foi realizada em um sistema fotovoltaico instalado na empresa Macro Recuperadora de Transformadores Ltda, localizada na rodovia BR 158, nº9500, km 536, no município de Pato Branco, Estado do Paraná, com localização geográfica, latitude  $26^{\circ}13'46''\text{S}$  e longitudinal de  $52^{\circ}40'18''\text{O}$ .

O sistema fotovoltaico estudado é constituído por 14 módulos fotovoltaicos de 315W cada, com potencial de geração total de 4,41 kW de potência, instalados em novembro de 2017. A Figura 5 apresenta o módulo de modelo do HR-315P-24/Ba fabricado pela empresa Hareon Solar, em silício policristalino, e dimensões de 1,952m de largura por 0,992m de altura.

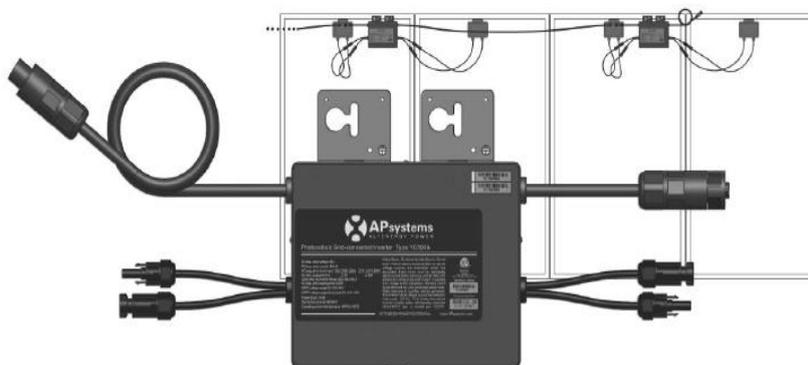
Figura 5 - Módulo fotovoltaico modelo do HR-315P-24/Ba.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O sistema conta também com 7 micro inversores modelo YC500A fabricados pela empresa APsystems, com 500W de potência nominal de saída e 2,27A de corrente máxima, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Micro inversor modelo YC500A.



Fonte: APsystems, 2019.

Os painéis ocupam uma área de 30 m<sup>2</sup>, instalados em um telhado com inclinação de 15°, com o intuito de obter melhores índices de insolação durante todo o dia. A geração média diária de energia através do sistema solar é de aproximadamente 33,63 kWh.

O local apresenta intenso tráfego de veículos, ocorrendo emissões de partículas que se depositam sobre os painéis, ocasionando redução de desempenho do sistema. Ambos os painéis possuem as mesmas condições de temperatura ambiente, incidência de vento e precipitação. O local do estudo é apresentado na Figura 7.

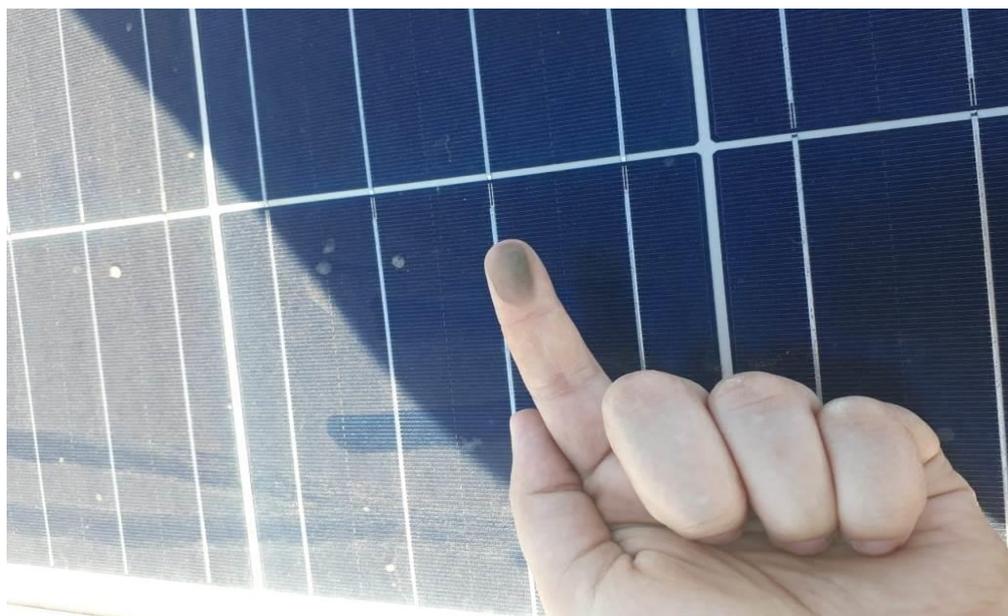
Figura 7 - Local de estudo na cidade de Pato Branco.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 8 demonstra a quantidade de sujeira presente nos painéis fotovoltaicos estudados, antes da realização da limpeza inicial, executada para uniformizar a superfície das placas, que estavam há 7 meses sem nenhum tipo de limpeza.

Figura 8 - Detalhe da sujeira nos módulos antes da limpeza.



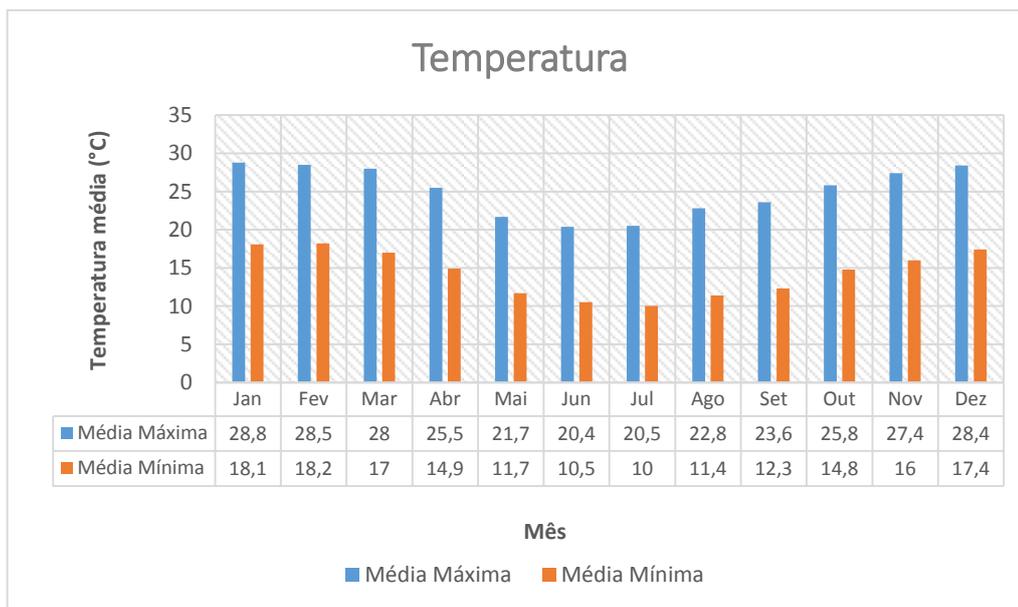
Fonte: Autoria própria, 2019.

#### 4.1.1 Clima

As condições climatológicas da área de estudo apresentam clima subtropical úmido, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C, e no mês mais quente acima de 22°C, com chuvas bem distribuídas ao longo de todo ano, onde os elementos climáticos mais significativos são ventos, umidade do ar, temperatura e as precipitações (IAPAR, 2019).

O Gráfico 1 demonstra o comportamento das temperaturas mensais, médias máximas e mínimas, durante os anos de 1979 a 2016.

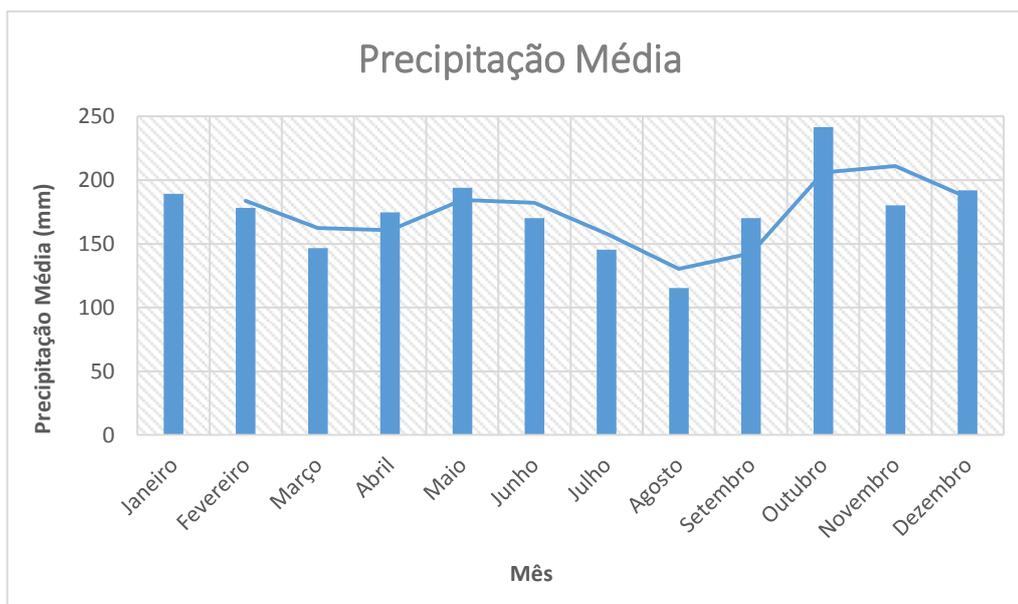
Gráfico 1 - Comportamento das temperaturas.



Fonte: IAPAR (2019).

Segundo os dados do IAPAR (2019), a média de precipitação anual no período entre os anos de 1979 e 2016 foi de 2098 mm/ano. Nas médias mensais de precipitação, o mês de outubro apresentou maiores índices pluviométricos conforme apresentado pelo Gráfico 2.

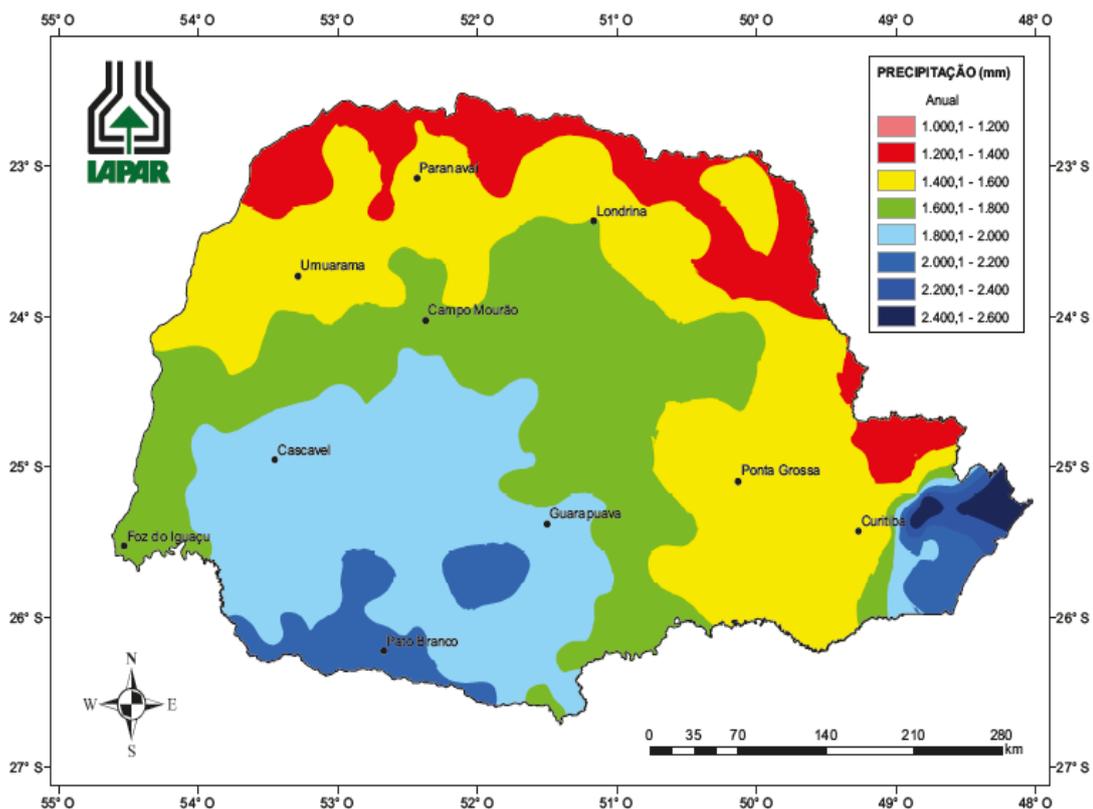
Gráfico 2 - Precipitação média.



Fonte: IAPAR (2019).

A Figura 9 apresenta a média de precipitação anual do Estado do Paraná, no qual o município de Pato Branco apresenta variações entre 2000,1 a 2200 mm/ano (IAPAR, 2019).

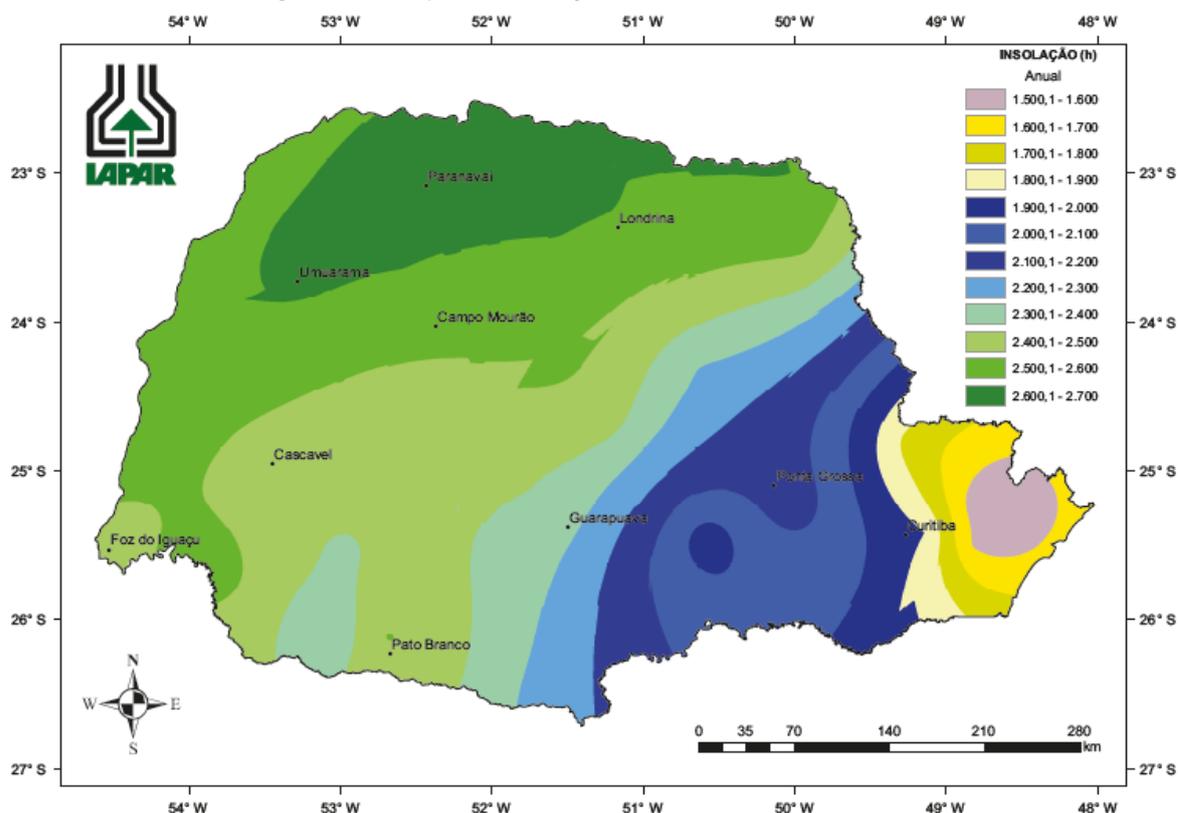
Figura 9 - Mapa da precipitação anual do estado do Paraná.



Fonte: IAPAR (2019).

O município de Pato Branco apresenta média de índice de insolação variando entre 2400 e 2500 horas ao ano, segundo dados do IAPAR (2019), conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Mapa da insolação anual do estado do Paraná.



Fonte: IAPAR (2019).

#### 4.1.2 Irradiação Solar

A coleta de dados para o cálculo da irradiação solar diária média em qualquer ponto do território nacional é realizada pelo programa SunData do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito, como ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. A Tabela 2 apresenta os dados da média mensal diária de irradiação do município de Pato Branco (CRESESB, 2019).

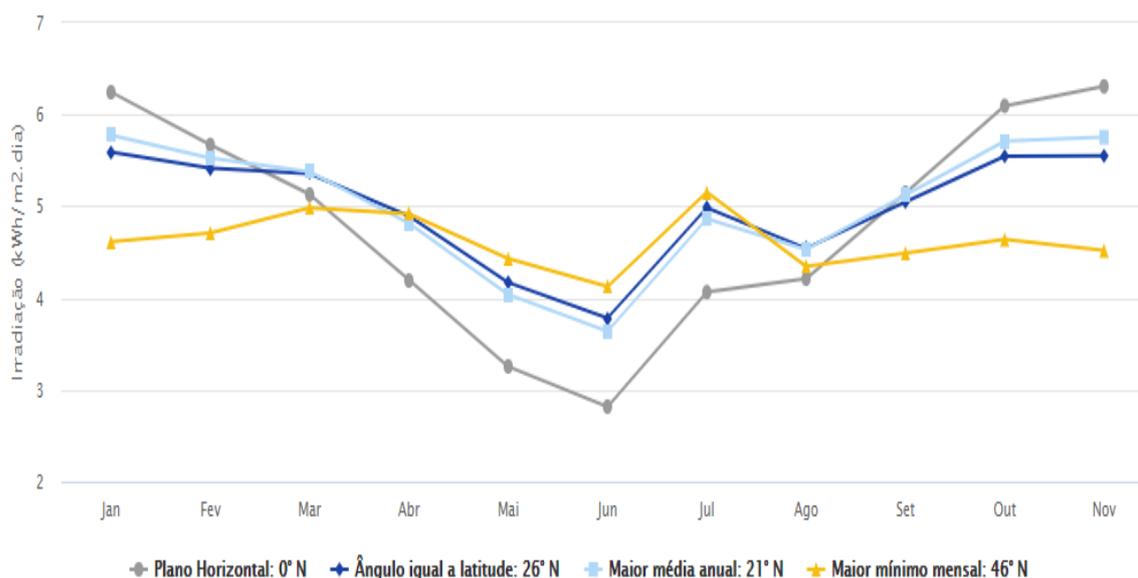
Tabela 2 - Dados de irradiação solar em Pato Branco.

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	6,3	5,7	5,1	4,2	3,3	2,8	3,1	4,1	4,2	5,2	6,1	6,3	4,7
Ângulo igual a latitude	26° N	5,6	5,4	5,4	4,9	4,2	3,8	4,1	4,9	4,5	5,1	5,6	5,6	4,9
Maior média anual	21° N	5,8	5,5	5,4	4,8	4,0	3,6	3,9	4,9	4,5	5,1	5,7	5,8	4,9
Maior mínimo mensal	46° N	4,6	4,7	4,9	4,9	4,4	4,1	4,4	5,2	4,4	4,5	4,6	4,5	4,6

Fonte: CRESESB (2019).

A Figura 11 apresenta a irradiação solar no plano inclinado de Pato Branco segundo os dados da CRESESB (2019).

Figura 11 - Irradiação solar no plano inclinado Pato Branco.



Fonte: CRESESB (2019).

## 4.2 SISTEMAS DE MANUTENÇÃO E COLETA DE DADOS

Dos 14 painéis instalados na empresa, apenas 12 foram utilizados no experimento. Os painéis foram separados em três tratamentos, conforme o sistema de manutenção, com quatro painéis fotovoltaicos pertencentes a cada tratamento, sendo que cada dois painéis havia um micro inversor.

O experimento teve início no dia 15 de agosto de 2019, com a realização da limpeza prévia dos painéis, com objetivo de uniformizar a superfície das placas. A limpeza inicial consistiu na aplicação de água não pressurizada, com auxílio de mangueira, rodo de espuma, e detergente neutro conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Processo de limpeza prévia.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Destaca-se que 18 dias antes da realização da limpeza prévia, constante na Figura 12, foram coletados dados com o propósito de utilizá-los para comparação aos demais dados a serem coletados no decorrer da pesquisa (Tabela 3).

Imediatamente após limpeza prévia ocorreu a primeira coleta de dados, que foi realizada por meio do software de gerenciamento fotovoltaico Energy Monitoring & Analysis (EMA) System.

Na sequência, as coletas foram realizadas em períodos de 18 dias a partir do dia 16 de agosto de 2019, até o dia 27 de outubro de 2019, resultando em cinco coletas para cada, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Datas de coleta de dados e manutenção das placas.

Coleta de dados e manutenção	Data
1º	16/08/2019
2º	03/09/2019
3º	21/09/2019
4º	09/10/2019
5º	27/10/2019

Fonte: Autoria própria, 2019.

Os dados coletados por meio do software foram: geração diária de energia (kW), geração acumulada no período (kW). A cada 18 dias foram realizadas novas coletas de dados e aplicados os diferentes sistemas de manutenção (tratamentos). O modelo esquemático dos tratamentos aplicados na pesquisa é apresentado na Figura 13.

Figura 13- Esquemático dos sistemas de manutenção.



Fonte: Autoria própria, 2019.

No primeiro tratamento (T1) ocorreram limpezas manuais dos painéis, com a aplicação de água não pressurizada, com auxílio de mangueira, rodo de espuma, e detergente neutro, conforme Figura 14.

Figura 14 - Primeiro tratamento (T1).



Fonte: Autoria própria, 2019.

No segundo tratamento (T2) foram realizadas limpezas manuais por meio do escoamento de água não pressurizada, com auxílio de mangueira, na superfície dos painéis, simulando um aspersor de água por um período de 60 segundos, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Segundo tratamento (T2).



Fonte: Autoria própria, 2019.

No terceiro tratamento (T3), não foi realizada nenhuma intervenção nos painéis durante todo o período de estudo, possibilitando o comparativo da interferência da sujidade na geração de energia dos módulos fotovoltaicos.

#### 4.3 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Os dados coletados, de cada um dos painéis, submetidos aos três diferentes tipos de tratamento, foram tabulados e submetidos a análise estatística descritiva (média, desvio padrão, índices máximos e mínimos). Além disso, foi realizada a análise estatística por meio da ANOVA, seguindo com comparações múltiplas de médias por meio do teste Tukey, a 5% de significância, a fim de verificar a existência de diferenças estatísticas entre os sistemas de manutenção (tratamentos).

#### 4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE MANUTENÇÃO

A quantidade total de energia elétrica gerada em kW nos módulos (painéis) submetido ao tratamento T3, ao longo de todo o experimento, foi utilizada como base do cálculo. As quantidades totais de energia elétrica fornecidas em kW de potência, geradas nos tratamentos T1 e T2 são subtraídas da quantidade gerada em T3 e o resultado multiplicado pelo valor, em reais, de kW para o consumidor caracterizado pela tarifa monômnia, subgrupo B3, da Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL, para o município de Pato Branco-PR.

Do valor obtido é descontado o custo aproximado dos processos de manutenção adotados. Considerando o sistema de maior viabilidade econômica aquele que apresentar o maior saldo positivo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 SISTEMAS DE MANUTENÇÃO, COLETAS E ANÁLISE DOS DADOS

Para avaliar o impacto da sujidade na performance do sistema, comparou-se a geração de energia aliada a três processos de manutenção distintos. O Tratamento 3 foi tomado como referência, assim, seu conjunto de placas manteve o acúmulo de sujidade desde o início do período de análise até sua conclusão, ou seja, não houve interferência humana sobre as condições do conjunto para o T3.

As placas do Tratamento 2, por sua vez, foram limpas por jateamento de água, pois segundo Pavan et al. (2011), este método de limpeza é considerado um dos mais eficazes entre as práticas existentes, uma vez que apresenta-se menos nocivo à superfície do painel solar, mais econômico e possui impacto ambiental reduzido.

A limpeza com água e 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). Deste modo optou-se por esta prática na aplicação do Tratamento 1. A Figura 16 demonstra a limpeza prévia realizada nos painéis fotovoltaicos.

As técnicas que surgem para o processo de limpeza dos painéis solares baseiam-se na criação de métodos alternativos por meio de avanços em estudos e inovações em vários setores da tecnologia. Além disso, tem com finalidade reduzir os custos de manutenção, especialmente os relacionados ao consumo de água e mão de obra, mantendo, assim, a eficiência dos painéis solares em níveis satisfatórios. O alto custo com a água e a mão de obra em sistemas de limpeza automatizada faz com que esta prática esteja ameaçada, havendo a necessidade do uso de métodos alternativos de limpeza (JU e FU, 2011).

Figura 16 - Limpeza prévia dos painéis fotovoltaicos.

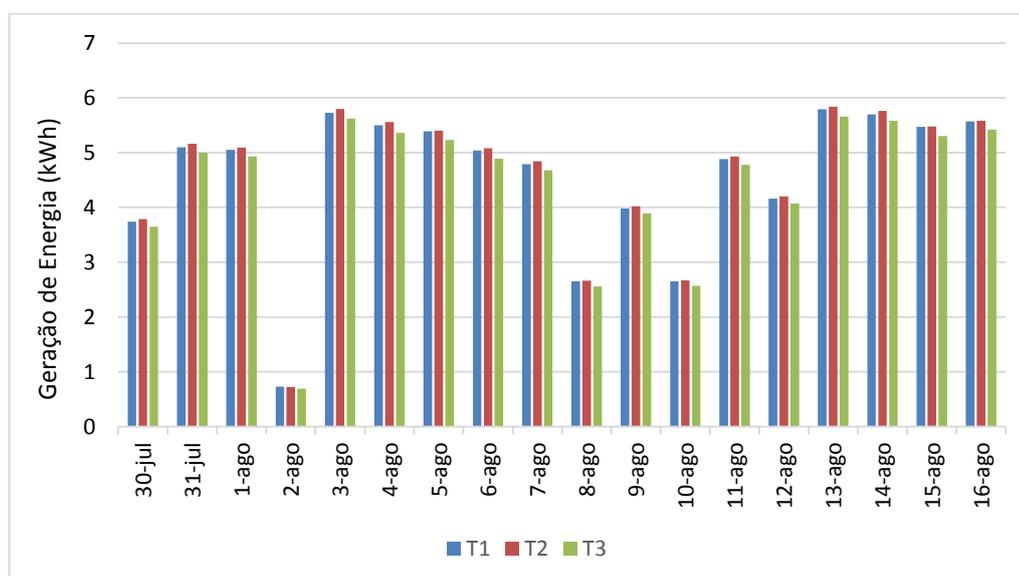


Fonte: Autoria própria, 2019.

Cumprе mencionar que foram coletados dados de geração de energia, antes do processo de limpeza prévia das placas, no período compreendido entre os dias 30 de julho a 16 de agosto de 2019, momento em que foi verificada a existência de uma pequena variação de geração de energia entre os grupos de placas. Contudo, tal fato não compromete a análise dos dados, tendo em vista a uniformidade da variação entre o grupo de placas.

O Gráfico 3 apresenta a geração de energia nos grupos de painéis separados por tratamento, antes da limpeza prévia.

Gráfico 3 - Geração de energia anterior ao processo de limpeza.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na coleta de dados, após a limpeza prévia, foi possível identificar índices de geração de energia superiores aos anteriores, com a presença de picos não identificados nas leituras precedentes a limpeza prévia, demonstrando que a sujidade das placas estava interferindo na geração de energia, conforme apresentado na Tabela 4.

No Tratamento 3, é possível observar que após a limpeza prévia, ocorreu aumento na geração de energia. Porém, com o acúmulo de sujidade no decorrer do estudo, a geração de energia passou a ser inferior aos demais tratamentos. A Tabela 4 apresenta os maiores valores de geração de energia, em três etapas do estudo, aplicando os três tratamentos.

Tabela 4 - Geração de energia em diferentes etapas do estudo.

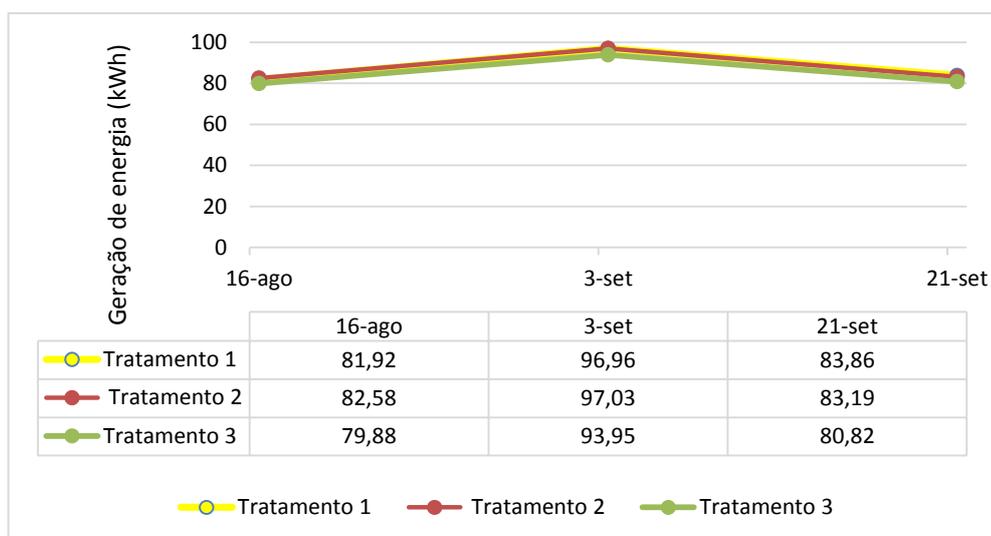
Etapa	Data	Tratamento1 (kWh)	Tratamento2 (kWh)	Tratamento3 (kWh)
Anterior a limpeza prévia	03/ago	1,43	1,45	1,41
	04/ago	1,38	1,39	1,34
	13/ago	1,45	1,46	1,42
	14/ago	1,43	1,44	1,40
Após limpeza prévia	25/ago	1,75	1,75	1,61
	02/set	1,75	1,75	1,70
Após 1º manutenção	22/set	1,99	1,97	1,50
	23/set	1,97	1,95	1,60

Fonte: Autoria própria, 2019.

No período entre os dias 16 de agosto a 21 de setembro de 2019, os dados demonstram pequena variação na geração acumulada de energia entre os tratamentos (Gráfico 4), indicando que neste período, após duas aplicações dos tratamentos, não ocorreram grandes alterações na geração de energia.

O mesmo comportamento pode ser observado na pesquisa realizada por Soares Junior (2018), na qual, e de acordo com o autor, a pequena variação na geração de energia, indicaria que a limpeza das placas pode ocorrer em intervalos de tempo superiores a 15 dias.

Gráfico 4 - Variação na geração acumulada de energia.

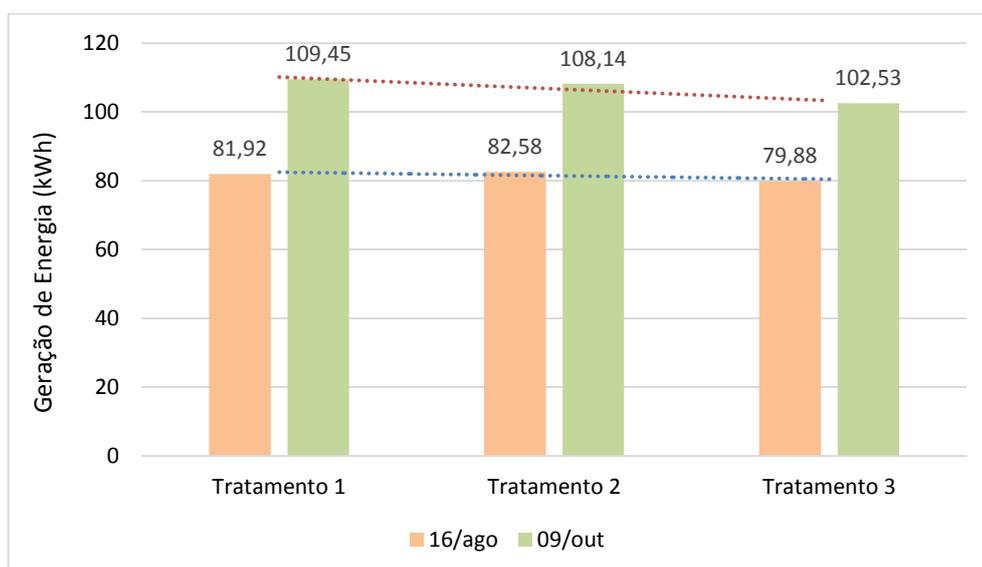


Fonte: Autoria própria, 2019.

Na leitura realizada ao término do experimento, observa-se que os tratamentos que envolviam a limpeza das placas demonstraram maior variação quanto a geração de energia.

No Gráfico 5, observa-se a variação de energia acumulada no período gerado em cada Tratamento, sendo constatado que o Tratamento 3 teve uma geração inferior aos Tratamentos 1 e 2, situação que evidencia que o acúmulo de sujeira ao longo do tempo afeta consideravelmente a eficiência da produção de energia por meio dos painéis solares.

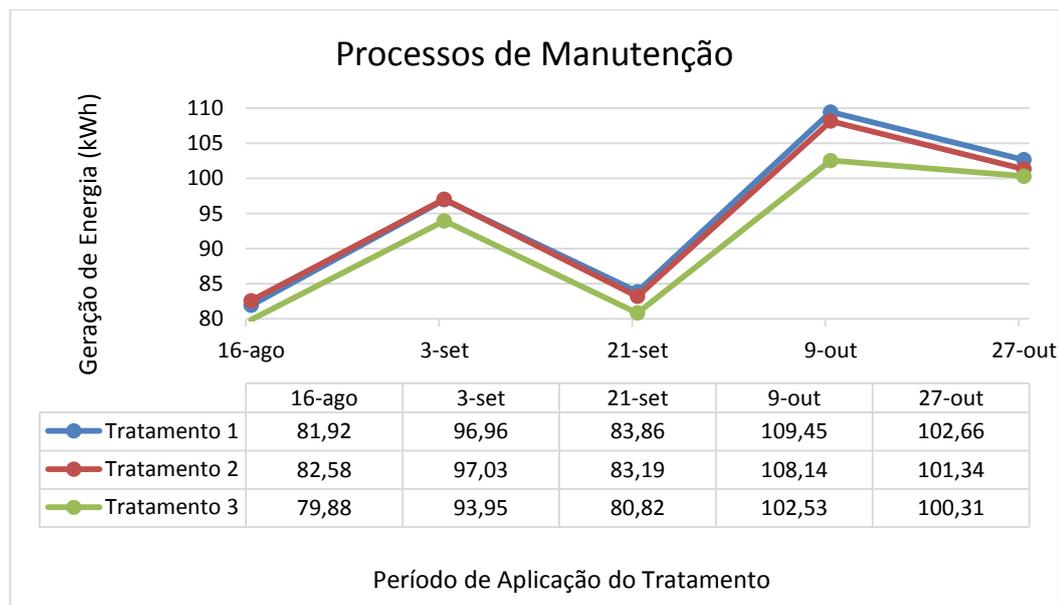
Gráfico 5 - Geração de energia acumulada ao longo do experimento.



Fonte: Autoria própria, 2019.

No Gráfico 6, é possível observar as variações acumuladas, da geração de energia, decorrentes da aplicação dos tratamentos e ao longo de todo o período de estudo. Nota-se reduzida variação na geração de energia acumulada no início do experimento, entre os processos de manutenção. Contudo ao final, a referida variação torna-se mais expressiva.

Gráfico 6 - Processos de manutenção durante todo período de estudo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

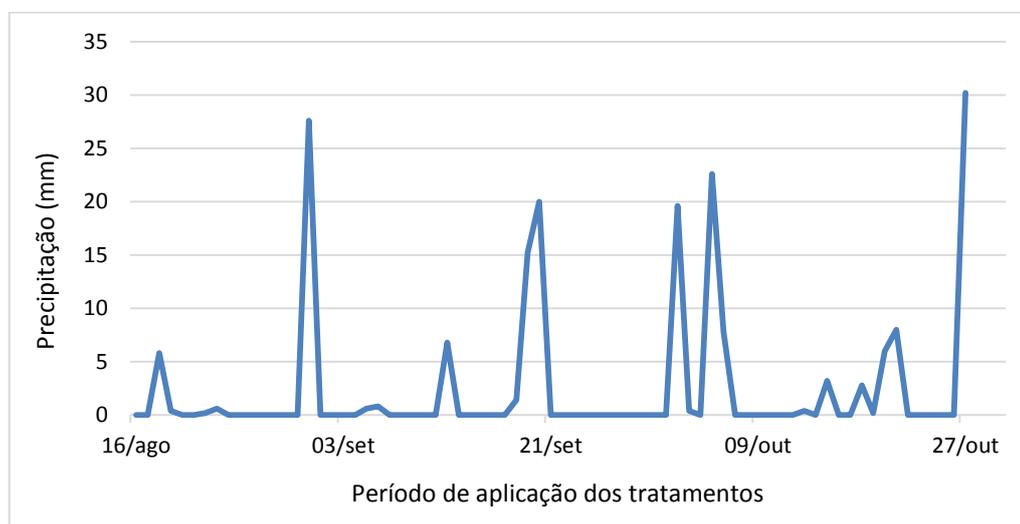
Ao longo do estudo foram constatadas diferenças de geração de energia entre os três tipos de tratamentos, sendo que, tal fato, pode ser decorrente das interferências climáticas e do processo de acúmulo de sujeira nos módulos fotovoltaicos, pois, segundo Soares Junior (2018) em períodos de chuvas frequentes com intervalo inferiores a 15 dias, o processo de limpeza manual pode ser dispensado, pois períodos de chuvas fornecem uma limpeza eficiente e natural.

O comportamento observado no Gráfico 6 está relacionado as condições climáticas, visto que em períodos de estiagem com maior incidência de radiação solar, os painéis geram mais energia. Em contrapartida, em períodos com grande intensidade de precipitação, a geração de energia é reduzida devido a menor incidência de radiação.

Dos 73 dias do estudo, não houve precipitação chuvosa em 51 dias. Nos dias 31 agosto e 27 outubro, foram registrados os maiores índices pluviométricos, com

27,6 e 30,2 mm, respectivamente. O Gráfico 7 apresenta o comportamento da precipitação de chuva ao longo do estudo.

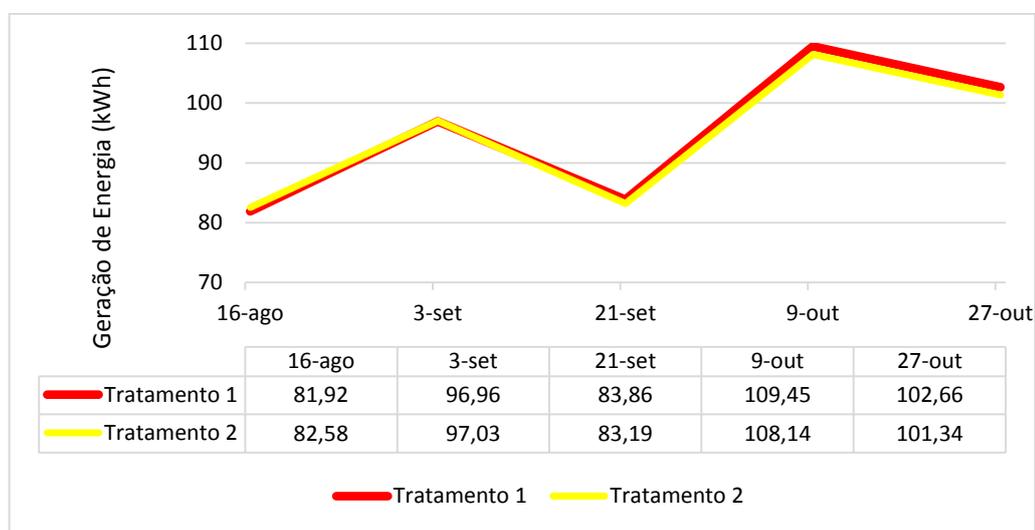
Gráfico 7 - Dados de precipitação de chuva.



Fonte: IAPAR, 2019.

Deste modo, o Tratamento 1 mostrou-se mais eficiente em relação aos demais, tendo em vista que a manutenção foi realizada com água, detergente e espuma, ao passo que o Tratamento 2 recebia apenas jateamento de água. Os dados de geração acumulada dos Tratamento 1 e 2 apresentaram resultados satisfatórios e reduzida variação de geração de energia entre ambos, conforme demonstrado no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Geração de energia acumulada dos tratamentos 1 e 2.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O Tratamento 3, apresentou dados de geração de energia inferior aos demais tratamentos, especialmente nos períodos de estiagem, quando ocorreu acúmulo de sujeira nos painéis, conforme demonstra a Figura 17.

Figura 17 - Terceiro tratamento (T3).



Fonte: Autoria própria, 2019.

O impacto da sujeira na geração de energia pelos módulos deve ser levado em consideração na gestão de um sistema fotovoltaico, podendo acarretar perdas de 0,6% em um mês, chegando até 10% em maiores períodos dependendo da localidade, sujeitos aos efeitos de sujeira (REZENDE, 2018).

Segundo Lemos (2016), apesar de ser pouco estudado, o impacto da sujeira em painéis solares pode ser bastante significativo em áreas com alta concentração de partículas e longos períodos de estiagem, podendo causar uma redução de 4% a 26,3%, dependendo do material da placa.

Para Chen et al. (2018), poeira com densidade de  $10\text{g/m}^2$  pode reduzir a potência máxima dos painéis fotovoltaicos em cerca de 34%, pois com o aumento da densidade da poeira, se perde a eficiência de conversão progressivamente.

Os painéis fotovoltaicos quando instalados em ambiente urbano com clima árido, podem sofrer perdas significativas devido ao acúmulo de sujeira em períodos de estiagem. Sujеiras consequentes de matéria vegetal, poeira e excremento de animais, podem criar perdas semipermanentes, as quais não são completamente

recuperadas com eventos de chuva severas. Conforme a intensidade da poluição e do custo para realização da limpeza, deve-se optar por uma ou duas limpezas no período seco, podendo recuperar parte das perdas por sujeira (MILLER, 2009).

## 5.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Os dados referentes a geração de energia acumulada, para cada intervalo de dezoito dias, foram tabulados e submetidos a análise estatística descritiva, conforme apresentados na Tabela 5. O maior índice de geração de energia foi observado no Tratamento 1, com 109,45 kWh, acumulado no período de 18 dias, e o menor índice ocorreu no Tratamento 3, com 79,88 kWh.

Tabela 5 - Geração de energia acumulada nos tratamentos.

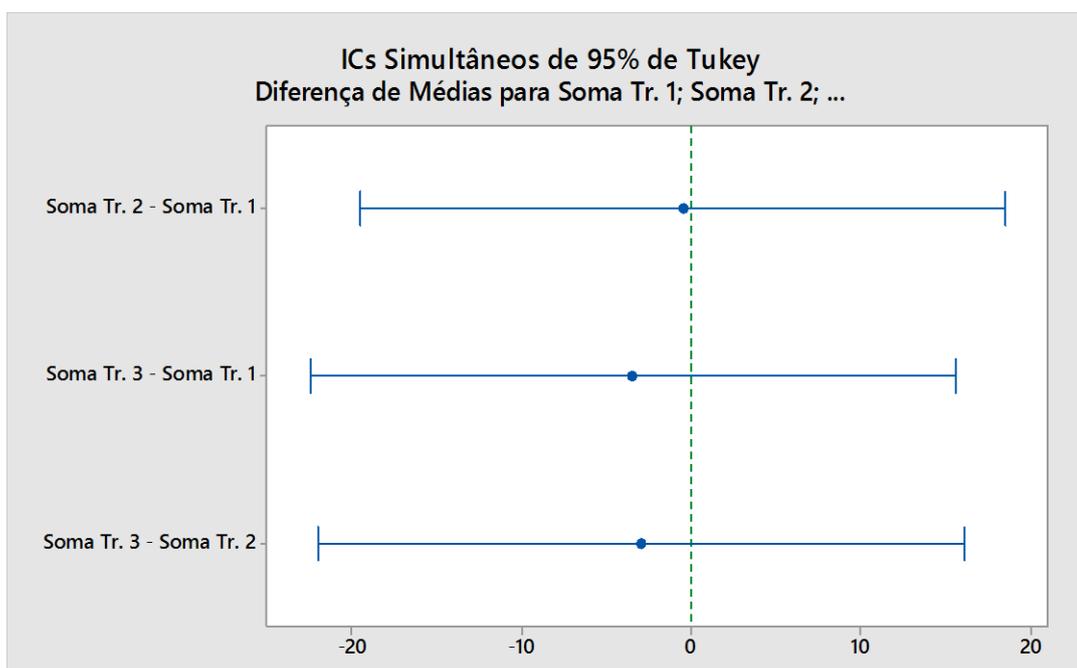
Data/intervalo	T1 (kWh)	T2 (kWh)	T3 (kWh)
29/jul – 16/ago	81,92	82,58	79,88
17/ago – 03/set	96,96	97,03	93,95
04/set – 21/set	83,86	83,19	80,82
22/set – 09/out	109,45	108,14	102,53
10/out – 27/out	102,66	101,34	100,31
Média	94,97 <sup>a</sup>	94,46 <sup>a</sup>	91,50 <sup>a</sup>
Desvio Padrão	11,90	11,28	10,66
Índices Máximos	109,45	108,14	102,53
Índices Mínimos	81,92	82,58	79,88

<sup>a</sup> - Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna, não apresentam diferença estatística pelo teste de Tukey com probabilidade de 5% ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autoria própria (2019).

A análise estatística por meio da ANOVA, seguindo do teste Tukey, a 5% de significância, usado para determinar os intervalos prováveis das diferenças e para avaliar a significância prática dessas diferenças, demonstrou que não existiram diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de manutenção T1, T2 e T3. O Gráfico 9 apresenta o comportamento estatístico entre os tratamentos.

Gráfico 9 - Análise estatística pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: Autoria própria, 2019.

### 5.3 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE MANUTENÇÃO

A quantidade total de energia elétrica gerada em kW nos painéis fotovoltaicos submetido aos tratamentos, ao longo de todo o experimento pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 - Geração total de energia elétrica para cada tratamento.

Data	Soma Tr. 1 (kWh)	Soma Tr. 2 (kWh)	Soma Tr. 3 (kWh)
16/08	81,92	82,58	79,88
03/09	96,96	97,03	93,95
21/09	83,86	83,19	80,82
09/10	109,45	108,14	102,53
27/10	102,66	101,34	100,31
<b>Geração Total</b>	<b>474,85</b>	<b>472,28</b>	<b>457,49</b>

Fonte: Autoria própria (2019).

O Tratamento 3 foi utilizado como base, por não sofrer nenhuma intervenção externa nas superfícies das placas durante todo o estudo, a fim de demonstrar as

diferenças de geração de energia e valores obtidos. As quantidades totais de energia elétrica (kW), geradas nos tratamentos T1 e T2 foram subtraídas da quantidade gerada em T3, o resultado multiplicado pelo valor (Tabela 7), em reais, do kW para o consumidor caracterizado pela tarifa monômnia, subgrupo B3, da Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL, para o município de Pato Branco-PR conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Tarifa convencional subgrupo B3.

<b>CONVENCIONAL</b>	<b>Resolução ANEEL N° 2.559, de 18 de junho de 2019</b>	
<b>Tarifa em R\$/kWh</b>	<b>Resolução ANEEL(*)</b>	<b>com Impostos: ICMS e PIS/COFINS</b>
<b>B3 - Demais Classes</b>	<b>0,51761</b>	<b>0,79878</b>
<b>Vigência em 24/06/2019</b>		

Fonte: Copel, 2019.

Considerando o valor de R\$0,79878/kWh, foram obtidos os valores totais em reais da energia gerada em cada tratamento, assim como as diferenças de valores dos Tratamentos 1 e 2 em relação ao Tratamento 3 (Tabela 7).

Tabela 7- Valores obtidos pela geração de energia.

<b>Tratamentos</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
<b>Geração Total (kWh)</b>	<b>474,85</b>	<b>472,28</b>	<b>457,49</b>
<b>Valores acumulados (R\$)</b>	<b>379,30</b>	<b>377,25</b>	<b>365,43</b>
<b>Subtração do T3 (R\$)</b>	<b>13,87</b>	<b>11,81</b>	<b>0,00</b>

Fonte: Autoria própria (2019).

Considerando o período de 73 dias de estudo e os meses em média 30,4 dias durante o ano, a Tabela 8 apresenta a média mensal de geração de energia, valores monetários dos Tratamentos 1, 2 e 3, assim como as médias mensais das diferenças de valores dos Tratamentos 1 e 2 em relação ao Tratamento 3.

Tabela 8 - Média mensal dos valores obtidos pela geração de energia.

Tratamentos	T1	T2	T3
Geração média mensal (kWh)	203,32	202,22	195,88
Valores médios mensal (R\$)	162,40	161,53	156,47
Subtração do T3 (R\$)	5,94	5,06	0,00

Fonte: Autoria própria (2019).

Os custos do Tratamento 1 (aquisição de balde, mangueira e rodo de espuma) foram deduzidos pelo método linear de depreciação, dividindo os valores de aquisição pelo tempo estimado de vida útil de cada item. Nesse caso, foram considerados 12 meses de vida útil de cada item.

Para a mão de obra, foi considerado um acréscimo salarial no valor de R\$100,00 mensais para um funcionário já contratado pela empresa, agregando a função de manutenção dos painéis. Os gastos com detergente e água foram estimados para a realização de duas manutenções mensais. O custo da manutenção dos módulos totalizou em R\$106,58 mensais, dos quais R\$103,08 são custos fixos e R\$3,50 são custos variáveis, assim apresentados individualmente na Tabela 9.

Tabela 9 - Custo para aplicação do tratamento 1.

Tipo de Custo	Custos	Valor (R\$)	Valor (R\$/mês)
Custos Fixos	Mão de obra	R\$ 100,00	R\$ 100,00
	Mangueira	R\$ 30,00	R\$ 2,50
	Rodo de espuma	R\$ 4,00	R\$ 0,33
	Balde	R\$ 3,00	R\$ 0,25
Custos Variáveis	Água	R\$ 3,00	R\$ 3,00
	Detergente	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Total			R\$ 106,58

Fonte: Autoria própria (2019).

Para o Tratamento 2, os custos com balde, espuma e detergente foram desconsiderados, totalizando R\$105,50 mensais, dos quais R\$102,50 (mão de obra e mangueira) são custos fixos e R\$3,00 (água) é custo variável. Do valor obtido pela

geração de energia foram deduzidos os custos dos processos de manutenção adotados, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Valores obtidos para cada processo de manutenção.

Tratamentos	T1	T2	T3
Valores de geração de energia mensal (R\$)	162,40	161,53	156,47
Custo total/mês (R\$)	106,58	105,50	0,00
Valores após dedução dos custos mensais (R\$)	55,82	56,03	156,47

Fonte: Autoria própria (2019).

Os dados demonstram, em um primeiro momento, que a melhor opção em termos econômicos, é observada no Tratamento 3, pois não há necessidade de investimentos em aquisição de insumos e pagamento de mão-de-obra. No entanto, os custos fixos de mão de obra, mangueira, balde e rodo de espuma podem ser dissolvidos com o acréscimo de módulos fotovoltaicos. Através da Equação 1 é possível calcular o número de módulos necessários para que os tratamentos 1 e 2 sejam economicamente superiores ao tratamento 3.

$$n^{\circ} \text{ módulos} > \frac{\text{Custo fixo } Tx}{\text{Geração } Tx - \text{Custo variável } Tx - \text{Geração } T3} \quad (1)$$

Os dados para custos fixos, custos variáveis e valores médios mensais de geração de energia para todos os tratamentos são apresentados nas Tabelas 8 e 9. Deste modo, ao utilizar a Equação 1, obtém-se o número de módulos necessários, para que os Tratamentos 1 e 2 sejam economicamente superiores ao Tratamento 3, ou seja, 43 e 50 módulos respectivamente.

Com estas quantidades os valores fixos de R\$103,08/mês para o Tratamento 1 e R\$102,50/mês para o Tratamento 2 são absorvidos pela diferença de valores obtidos pela geração de energia em relação ao Tratamento 3, conforme Tabela 8. O Tratamento 1 gera R\$5,94/mês a mais que o Tratamento 3. Posteriormente, deduzindo os custos variáveis (R\$3,50/mês - os quais variam proporcionalmente ao número de módulos), obtém-se o valor de R\$2,44/mês. O número de módulos

multiplicado por esse valor deve absorver os custos fixos, resultando para o Tratamento 1, R\$103,08/mês.

Para Rezende (2018), quando constatado elevados níveis de perda em produtividade, decisões econômicas são importantes, como por exemplo decisões relacionadas a escolha entre a limpeza no sistema fotovoltaico ou aumentar a capacidade de geração, com a inserção de mais painéis fotovoltaicos, mantendo os mesmos sem limpeza.

Quando o custo para limpeza for muito elevado em comparação ao custo do kW e for possível a instalação de mais módulos, analisa-se a melhor opção, entre aumentar a potência de todo o sistema ao invés de realizar a limpeza buscando reduzir a perda por sujeira acumulada por longo período de tempo. Entretanto, um custo baixo para limpeza levaria a ocorrência de limpezas periódicas, evitando as perdas de energia resultantes da sujeira (REZENDE, 2018).

## 6 CONCLUSÕES

Os dados coletados neste trabalho indicaram maior geração de energia nos Tratamentos 1 e 2 (com manutenção), em relação ao Tratamento 3 (sem manutenção), porém, a análise estatística indicou a inexistência de diferenças significativas entre os tratamentos.

Na análise de viabilidade econômica, o Tratamento 3, apresentou a melhor relação entre geração de energia e custo de manutenção, sendo financeiramente mais viável que os demais. Entretanto, com relação a eficiência, o Tratamento 1 apresentou-se com a maior geração de energia.

Recomenda-se estudos futuros com a aplicação dos sistemas de tratamento adotados nesta pesquisa, por um período de tempo mais longo, em uma instalação com maior número de painéis fotovoltaicos.

## REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: ANEEL. **Energia Solar**. 2005. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/3\\_2.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm)>. Acesso em: 15 de junho 2019.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: ANEEL - **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª edição. Brasília: ANEEL, 2008. 236p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 15 de maio 2019.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: ANEEL - **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>>. Acesso em: 15 de maio 2019.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: ANEEL - **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 de maio 2019.

ALONSO, R. **Posicionamento eficiente de módulos fotovoltaicos em plantas solares no ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-26082016-151946/publico/RafaelHerreroAlonsoCorr16.pdf>>. Acesso em 20/10/2019.

ALVES, F.R.R. **Estudo do efeito da sujidade na eficiência de módulos fotovoltaicos**. 2018. 99f. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia de Produção e Sistemas. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2018

APSYSTEMS. **YC500A Microinversor**. Seattle. 2019. 2p.

ARAMIZU, J. **Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899: Energia solar fotovoltaica — Terminologia**. Rio de Janeiro. 2006.

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>>

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

CAVALCANTE, M. M. et al. **Protótipo de um sistema automatizado para higienização de painéis solares planos agrupado a um sistema de reaproveitamento de água**. V SINGEP, São Paulo, São Paulo. 2016. Disponível em: <<https://www.saneamentobasico.com.br/sistema-automatizado-higienizacao-paineis-solares-sistema-de-reaproveitamento-de-agua>>. Acesso em: 13 de junho 2019.

CELESTINO, V. et al. **Modelagem conceitual para identificação de áreas com potencial para geração de energia por fonte renovável**. Revista de Geografia e Ordenamento do Território, n.9. Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, p. 65-89, 2016. Disponível em: <[dx.doi.org/10.17127/got/2016.9.004](https://doi.org/10.17127/got/2016.9.004)>. Acesso em: 04 de junho 2019.

CHEN, Y. et al. Experimental Study on the Effect of Dust Deposition on Photovoltaic Panels. **Energy Procedia**. n. 158, 483-489, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811630132X>>. Acesso em: 12 de junho 2019.

COPEL. **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Facopel%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F5BAFDCF77F92F5A5032573EC006C3074>>. Acesso em: 13 de junho 2019.

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Potencial Solar – SunData v 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 15 de junho 2019.

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**.2000. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)>. Acesso em: 10 de junho 2019.

DUPONT, Fabrício Hoff. et al. **Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. v. 19, n. 1, Ed. Especial, p. 70 – 81. Santa Maria, 2015. Disponível em: <[periodicos.ufsm.br/reget/article/download/19195/pdf](http://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/19195/pdf)>. Acesso em: 01 de maio 2019.

EPE. **Balço Energético Nacional 2015**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2015>>. Acesso em: 22 de maio 2019.

EPE. **Balço Energético Nacional 2015**. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 15 de outubro 2019.

FOUAD M.; SHIHATA L.; MORGAN E. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Energy Procedia** n. 80, 1499-1511, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307803>>. Acesso em: 12 de maio 2019.

GALDINO, M.A.E. et al. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**. Energias Renováveis. Revista da Direng. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/direng.pdf>>. Acesso em 01 de maio 2019

GEA - **Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future**. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. 2012.

GOLDEMBERG, José. et al. **Energia e meio ambiente no Brasil. Introdução: energias renováveis e sustentabilidade**. Estudos avançados 21. 2007. Disponível em: <[www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a02v2159.pdf](http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a02v2159.pdf)>. Acesso em: 01 de maio 2019.

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

IAPAR. **Atlas climático do Estado do Paraná**. 2019. Disponível em: <[http://www.iapar.br/arquivos/File/zip\\_pdf/AtlasClimaticoPR.pdf](http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/AtlasClimaticoPR.pdf)>. Acesso em: 10 de junho 2019.

IEA. **2019 - Snapshot of Global Photovoltaic Markets**. International Energy Agency. 2019. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/332606669\\_2019\\_Snapshot\\_of\\_Global\\_Photovoltaic\\_Markets](https://www.researchgate.net/publication/332606669_2019_Snapshot_of_Global_Photovoltaic_Markets)>. Acesso em: 28 de outubro 2019.

IRENA. **Global energy transformation – A roadmap to 2050**. International Renewable Energy Agency. 2018. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA\\_Report\\_GET\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf)>. Acesso em: 10 de junho 2019.

IPARDES. “Anuário Estatístico do Paraná 2013”, 2013, disponível em <[www.ipardes.pr.gov.br/anuario\\_2013/estrutura.html](http://www.ipardes.pr.gov.br/anuario_2013/estrutura.html)>. Acesso em: 20 de outubro de 2019.

JU, F., FU, X. “**Research on impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance**”, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/c4UEL5>>. Acesso em: 23 de outubro 2019.

Lemos, L. O., Ferreira, Â. M., Jota, P. R. S., Silva, A. G. V., 2016. **Efeitos da sujidade no desempenho de módulos fotovoltaicos, Belo Horizonte – Minas Gerais**, VI CBENS - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Minas Gerais.

MAGHAMI, M. R. et al. **Power loss due to soiling on solar panel: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000745>>. Acesso em: 14 de maio 2019.

MERLO, Adriano Feltre. **Instalação e operação das Usinas Solares do Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ: um estudo de caso**. 2017. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso Superior de Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MILLER, J. T. A. et al. **Impact of Soiling and Pollution on PV Generation Performance**. Sandia National Laboratories. San José, USA, 2009. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/f839/f78ce4b9b2fec0b352595f471e7dbbd98fe0.pdf> . Acesso em: 03 de junho 2019.

MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo – Ano de referência – 2015**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 de junho 2019.

MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo – Ano de referência – 2016**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 de junho 2019.

MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo – Ano de referência – 2017**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 16 de junho 2019.

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>>. Acesso em: 23 de outubro 2019.

MUNDO EDUCAÇÃO. Semicondutores. Disponível em <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/semicondutores>>. Acesso em: 14 de junho 2019.

PALZ, W. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. 1ed. 358p. Ed. Hemus.1981.

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>>. Acesso em: 14 de outubro 2019.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. “**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**”. CRESESB. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/2gC9GQ>>. Acesso em: 23 de maio 2019.

PORTAL SOLAR. **Como Funciona o Pannel Solar Fotovoltaico – Placas Fotovoltaicas**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-pannel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 23 de maio 2019.

RAO, A. et al. Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance. **Energy Procedia** n. 54, 690 – 700, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214011874>>. Acesso em: 12 de junho 2019.

REN 21. **Energias renováveis 2016 - Relatório da situação mundial**. Paris, França. 2016. Disponível em: <[www.ren21.net/wp-content/uploads/.../REN21\\_GSR2016\\_KeyFindings\\_port\\_02.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/.../REN21_GSR2016_KeyFindings_port_02.pdf)>. Acesso em: 12 de junho 2019.

REN21, “Renewable 2014 – Global Status Report”, 2014, Disponível em <http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx>, Acesso em: 14 outubro de 2019.

RENEWENERGIA. **Eficiência e Sustentabilidade para um mundo melhor. “Manutenção preventiva: Solar fotovoltaico, poeira e pombos”**. 2015. Disponível em: < <http://renewenergia.com.br/manutencao-preventiva-solar-fotovoltaico-poeira-e-pombos>>. Acesso em: 13 de junho 2019.

REZENDE, V. G. S. **Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/181>>. Acesso em: 10 de junho 2019.

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

SANTOS, Juliane B. et al. **Adoção da energia solar fotovoltaica em hospitais: revisando a literatura e algumas experiências internacionais**. Saúde Soc. São Paulo, v.22, n.3, p.972-977, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sausoc/v22n3/26.pdf>>. Acesso em: 3 de junho 2019.

SOARES JUNIOR, J.G. et al. **Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, Rio Grande do Sul. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/123>>. Acesso em: 20 de maio 2019.

SONAI, Gabriela G. et al. Células solares sensibilizadas por corantes naturais: um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. **Quim. Nova**, v. 38, n. 10, 1357-1365, 2015. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422015001001357&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422015001001357&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 12 de junho 2019.

SOUSA, Emanuella Maria R. **Análise da influência da deposição superficial de detritos e comparativo entre tipos de limpeza na eficiência de painéis fotovoltaicos em uma região semiárida**. Revista de Engenharia e Tecnologia. v.10, n.3. 2018. Disponível em: < <http://www.revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/12053>>. Acesso em: 11 de junho 2019.

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.