

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA**

**IGOR RESSAI BASKOSKI  
ÍTALO RESSAI BASKOSKI**

**RENDIMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR  
COM RELAÇÃO AO ACÚMULO DE DETRITOS SOBRE MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS.**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2019**

**IGOR RESSAI BASKOSKI  
ÍTALO RESSAI BASKOSKI**

**RENDIMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR  
COM RELAÇÃO AO ACÚMULO DE DETRITOS SOBRE MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação de Tecnologia em Automação Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Macio Mendes Casaro

**PONTA GROSSA  
2019**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Tecnologia em Automação Industrial



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **RENDIMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR COM RELAÇÃO AO ACÚMULO DE DETRITOS SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

por

**IGOR RESSAI BASKOSKI**

e

**ÍTALO RESSAI BASKOSKI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 03 de outubro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Tecnologia em Automação Industrial. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr. Marcio Mendes Casaro  
Orientador(a)

---

Prof(a). Msc. Edison Luiz Salgado Silva  
Membro Titular

---

Prof(a). M.Eng. Percio Luiz Karam de Miranda  
Membro Titular

---

Prof. Dr. Josmar Ivanqui  
Responsável pelos TCC

---

Prof. Dr. Felipe Mezzadri  
Coordenador do Curso

Dedicamos este trabalho à nossa família,  
que nos deu todo o apoio necessário para  
que pudéssemos atingir o nosso objetivo  
e realizar nossos sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus e à nossa família, pois acreditamos que sem o apoio deles seria impossível vencer esse desafio e concluir essa importante etapa de nossas vidas.

Agradecemos também ao nosso orientador Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro, pela sabedoria com que nos guiou nesta trajetória.

Aos nossos colegas de sala, pelo apoio e companheirismo durante toda a nossa trajetória nesta instituição.

Agradecemos a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desse trabalho.

*“Para cada esforço disciplinado  
há uma retribuição múltipla.”  
- Jim Rohn*

## RESUMO

BASKOSKI, Igor Ressai; BASKOSKI, Ítalo Ressai. **Rendimento de sistemas de geração de energia solar com relação ao acúmulo de detritos sobre módulos fotovoltaicos.** 2019. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Tecnologia em Automação Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O trabalho consiste em um estudo realizado a partir de análises práticas de sistemas de geração distribuída, para verificar as perdas de rendimento de um módulo e de arranjos fotovoltaicos em função do acúmulo de detritos sobre os mesmos, através da variação da incidência na junção P-N. As perdas irão variar de acordo com a região, local instalado, inclinação e direção, a partir disso, será possível pré determinar o tempo de limpeza dos módulos e sua ineficiência de acordo com a condição de cada unidade de geração distribuída.

**Palavras-chave:** Energia solar. Fotovoltaico. Geração distribuída. Rendimento.

## **ABSTRACT**

BASKOSKI, Igor Ressai; BASKOSKI, Italo Ressai. **Yield of solar energy generation systems in relation to the accumulation of debris on photovoltaic modules.** 2019. 65 f. Course Completion Work (Graduation) - Technology in Industrial Automation. Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2019.

The work consists of a study based on practical analysis of distributed generation systems, to verify performance losses of a module and of photovoltaic arrangements due to the accumulation of debris over them, by varying the incidence at the P-N junction. The losses will vary according to the region, installed location, slope and direction, from this it will be possible to pre-determine the cleaning time of the modules and its inefficiency according to the condition of each unit of distributed generation.

**Keywords:** Solar energy. Photovoltaic. Distributed generation. Yield.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Célula fotovoltaica.....	21
Figura 2: Comparação de células.....	22
Figura 3: Composição do painel solar fotovoltaico .....	23
Figura 4: Sistemas on/off grid .....	24
Figura 5: Sombreamento na associação série.....	25
Figura 6: Direcionamento e inclinação ideal.....	26
Figura 7: Posicionamento ideal em um telhado.....	27
Figura 8: Circuito elétrico equivalente.....	28
Figura 9: Regulagem de inclinação do módulo e medidor solar.....	31
Figura 10: Módulo limpo.....	32
Figura 11: Medidas com módulo limpo.....	32
Figura 12: Módulo com detritos em estágio 1.....	33
Figura 13: Comparação de medidas entre módulo limpo e estágio 1.....	34
Figura 14: Módulo com detritos em estágio 2.....	35
Figura 15: Comparação de medidas entre módulo limpo e estágio 2.....	36
Figura 16: Módulo com detritos em estágio 3.....	37
Figura 17: Comparação de medidas entre módulo limpo e estágio 3.....	37
Figura 18: Arranjo UTFPR antes da lavagem.....	40
Figura 19: Módulo antes da lavagem UTFPR.....	40
Figura 20: Arranjo UTFPR após a lavagem.....	41
Figura 21: Arranjo da casa em condomínio antes da limpeza.....	43
Figura 22: Arranjo da casa em condomínio antes da limpeza 2.....	43
Figura 23: Arranjo da casa em condomínio após a limpeza.....	44
Figura 24: Arranjo do cliente BK Solar antes da lavagem.....	45
Figura 25: Arranjo do cliente BK Solar após da lavagem.....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Desenvolvimento da energia solar no período de 2016 à 2018.....	16
Gráfico 2 – Matriz energética brasileira.....	17
Gráfico 3: Gráfico da associação série de módulos.....	25
Gráfico 4: Gráfico da associação paralelo de módulos.....	26
Gráfico 5: Curva da corrente/potência x tensão.....	29
Gráfico 6: Comparação de perda de rendimento.....	38
Gráfico 7: Irradiância.....	41
Gráfico 8: Potência antes e depois.....	42
Gráfico 9: Irradiância antes e depois.....	44
Gráfico 10: Potência antes e depois.....	45
Gráfico 11: Potência cliente antes e depois.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação da perda de rendimento.....	38
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

PI	Potência com sistema limpo
Pmax	Potência Máxima
Ps	Potência com sistema sujo
Rp	Resistências em paralelo
Rs	Resistências em série

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Espuma Vinílica Acetinada
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i> (ponto rastreador potência máxima)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_{ph}$	Fotocorrente
$I_r$	Corrente de saturação reversa
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito por célula
$k$	Constante de Boltzmann
$P_{sun}$	Intensidade de radiação
$q$	Carga do elétron $1,6 \times C$
$T$	Temperatura ambiente K
$T_r$	Temperatura de referência, 298K
$V, I$	Tensão e corrente
$\alpha$	Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$
$I_{base}$	Corrente ideal (com módulo limpo)
$I_{medida}$	Corrente medida (com módulo sujo)
$n$	Fator de qualidade da junção P-N

## SUMÁRIO

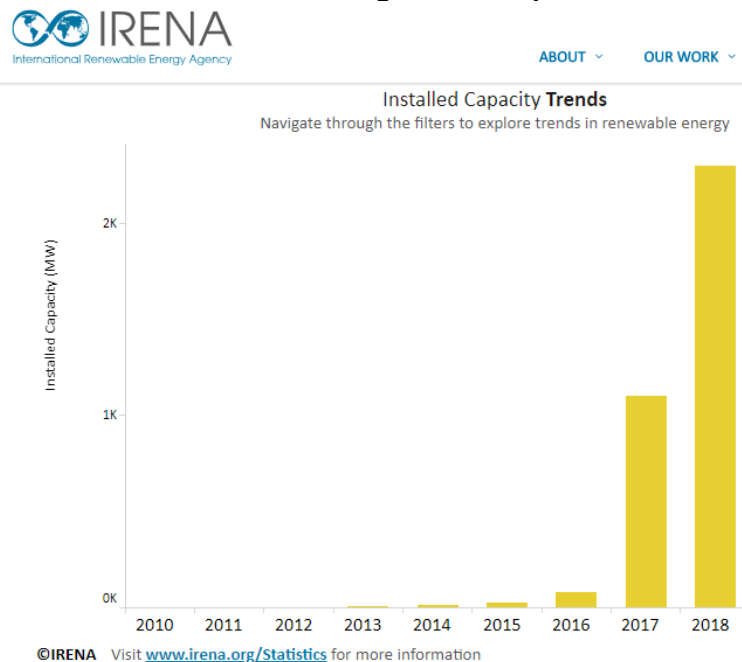
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1	PROBLEMA.....	18
1.2	HIPÓTESE.....	19
1.3	OBJETIVOS.....	19
1.3.1	Objetivo Geral.....	19
1.3.2	Objetivos Específicos.....	19
1.4	JUSTIFICATIVA.....	19
1.5	METODOLOGIA.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	EFEITO FOTOVOLTAICO.....	21
2.2	CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	21
2.3	INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS TÍPICAS.....	23
2.4	ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	24
2.5	DIRECIONAMENTO E INCLINAÇÃO DE MÓDULOS.....	26
2.6	CIRCUITO EQUIVALENTE.....	28
2.6.1	COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	28
<b>3</b>	<b>ENSAIOS COM MÓDULO FOTOVOLTAICO AVULSO (OFF-GRID).....</b>	<b>30</b>
3.1	EQUIPAMENTOS.....	31
3.2	ESTÁGIOS DE ACÚMULO DE DETRITOS.....	31
3.3	MEDIÇÕES COM MÓDULO LIMPO.....	32
3.4	ESTÁGIO 1 DE ACÚMULO DE DETRITOS.....	33
3.5	ESTÁGIO 2 DE ACÚMULO DE DETRITOS.....	34
3.6	ESTÁGIO 3 DE ACÚMULO DE DETRITOS.....	36
3.7	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	38
<b>4</b>	<b>ENSAIOS COM SISTEMAS INSTALADOS (ON-GRID).....</b>	<b>39</b>
4.1	ENSAIOS COM SISTEMAS INSTALADOS (ON-GRID).....	39
4.2	MEDIÇÕES NO SISTEMA 2.....	42
4.3	MEDIÇÕES NO SISTEMA 3 (Cliente BK Solar).....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um fator indispensável para a humanidade atualmente. Vários dispositivos estão sendo desenvolvidos com sistemas que necessitam de alimentação de energia elétrica, levando em consideração também o alto consumo de energia elétrica no Brasil, que apresentou um consumo anual, entre o período de março/2017 a fevereiro/2018, de 576.711 GWh. Para isso, algumas formas de geração de energia vêm se desenvolvendo para aumentar a acessibilidade em lugares mais isolados e baixar os altos custos com fatura de energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mostra em seu site que, o Brasil é um país com abundância em cursos d'água em seu território nacional, por isso a geração hidrelétrica é uma das mais importantes e está no topo da matriz elétrica do país. Como fonte geradora de energia elétrica, a energia solar tem se desenvolvido muito rapidamente no setor de energia renovável e proporcionado as pessoas uma forma de geração limpa e sustentável, como podemos observar no gráfico 1 (Empresa de pesquisa energética, 2019).

**Gráfico 1: Desenvolvimento da energia solar no período de 2016 à 2018.**



**Fonte: (IRENA, 2019).**

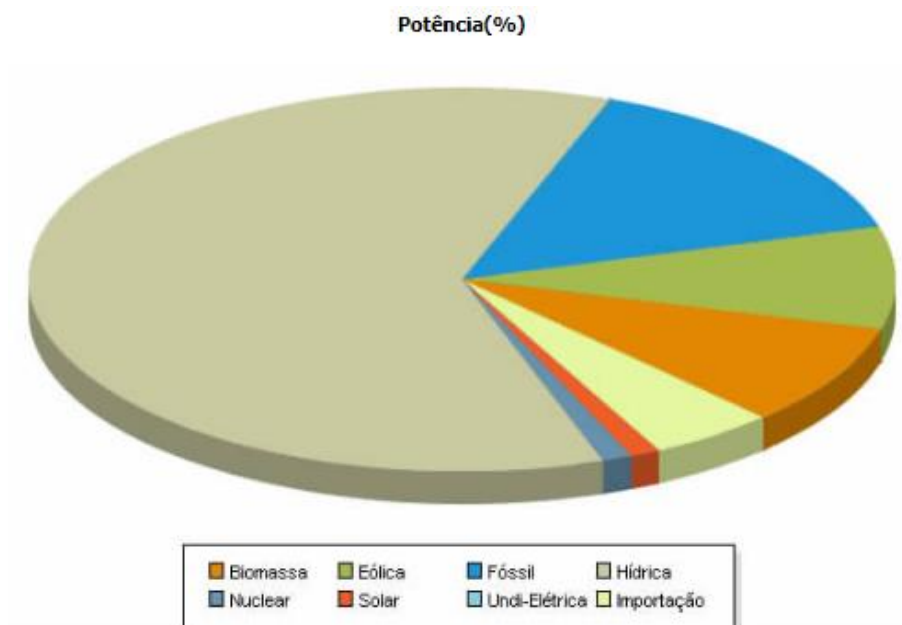


A energia solar pode ser captada por painéis solares, tanto no formato de módulos fotovoltaicos, como também, em painéis de aquecimento de água, pois essa forma de energia chega sobre o planeta Terra na forma térmica e luminosa. Porém a radiação solar tem algumas especificações a serem seguidas para que seja eficiente, pois ela não atinge o planeta de maneira uniforme. Como exemplo dessas especificações, a latitude, a orientação, a inclinação, a estação do ano e as condições atmosféricas são muito importantes e devem ser consideradas no momento do projeto de um sistema fotovoltaico.

O Brasil tem uma das melhores posições geográficas para obtenção de radiação solar, principalmente na região nordeste e também em regiões mais próximas à linha do Equador.

No gráfico 2, podemos observar que dentre as fontes de energia do país, a solar ainda está na base da matriz energética, com 1,20% de energia gerada em relação as outras fontes. Porém a estimativa para geração de energia solar no Brasil, é que até 2040 o país deve alcançar 32% da matriz energética, ultrapassando assim, a geração hídrica, com estimativa de 29% para o mesmo ano (Agência nacional de energia elétrica, 2015).

**Gráfico 2: Matriz energética brasileira.**



Fonte: Aneel (2017, [www2.aneel.gov.br](http://www2.aneel.gov.br)).

Em 2012 estabeleceu-se a resolução normativa da ANEEL (nº 482/2012), que permite ao consumidor a geração de energia elétrica para o próprio consumo,

denominando-se geração distribuída. Além disso a energia excedente gerada, ou seja, a energia não consumida, deve retornar para a concessionária através de um medidor bidirecional que fará a leitura de consumo e geração. Através dessa resolução normativa, houve um grande aumento na implantação de sistemas de geração de energia limpa e a previsão para os próximos anos é que o número de implantações cresça exponencialmente (Copel, 2019).

Nosso trabalho de conclusão de curso terá desenvolvimento a partir de pesquisas, estudos e ensaios práticos, realizados nos sistemas fotovoltaicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) de Ponta Grossa, no laboratório de energia solar da universidade, em módulos independentes e em sistemas de clientes da empresa BK Solar. Com isso acreditamos que um sistema de geração distribuída em condições de acúmulo de detritos, terá uma perda percentual suficiente para que ocorra um aumento no *payback*, trazendo assim uma baixa de rendimento econômico a quem possui um sistema de geração fotovoltaica.

O rendimento de sistemas fotovoltaicos é um fator muito importante no momento do projeto e instalação de um gerador, pois tem influência direta nos custos e pode diminuir exponencialmente o *payback* do sistema. Quando se leva em consideração esse assunto, um projeto bem pensado e avaliado, pode gerar um montante de energia superior que um sistema ineficiente, ou seja, aquele que apresenta sombreamento ou um elevado acúmulo de detritos.

O tema de “Rendimento em sistemas de geração distribuída com relação ao acúmulo de detritos sobre módulos fotovoltaicos” foi escolhido, pois com a percepção de baixa no rendimento de sistemas de energia solar, supomos que o acúmulo de sujeira sobre os módulos, será um dos principais motivos para essa perda de rendimento.

## 1.1 PROBLEMA

Perda de rendimento na eficiência da geração de energia solar através do acúmulo de detritos que se depositam sobre os módulos fotovoltaicos no decorrer do tempo, sobre condições climáticas, ambientais e geográficas.

## 1.2 HIPÓTESE

A manutenção periódica do arranjo de módulos favorece o efeito fotovoltaico nas junções P-N, que se encontram em cada célula que compõem um módulo. Assim, a energia solar é convertida em elétrica em uma maior proporção, na medida em que fótons não são interrompidos por resíduos ou detritos que possam estar depositados sobre o vidro que recobre os módulos.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

Verificar o ganho de rendimento com a remoção de detritos acumulados sobre os módulos fotovoltaicos e elaborar uma recomendação de manutenção periódica com base nas características de uma instalação e da quantidade de sujeira potencialmente prejudicial.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar aspectos relativos às características de instalação que podem influenciar na frequência de manutenção;
- Relacionar o acúmulo de impurezas com o sombreamento parcial de módulos fotovoltaicos a fim de simular o comportamento elétrico de módulos contaminados.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A redução do rendimento de um sistema fotovoltaico progride em função do acúmulo de impurezas sobre os módulos e em uma proporção que é desconhecida pelos instaladores e profissionais da área.

Da mesma forma, não se tem dados que permitam estimar com precisão o impacto que poeira, folhas ou outros tipos de impurezas causam na geração de energia a partir do sol. Assim, este trabalho visa elucidar estas questões que aparentemente são triviais e normalmente são tratados com total despreparo. Em

geral se foca nas questões tecnológicas e se despreza as questões que são naturalmente envolvidas no funcionamento do sistema exposto.

### 1.5 METODOLOGIA

Módulos fotovoltaicos avulsos e já instalados serão utilizados no levantamento de dados práticos que reflitam o rendimento de um sistema fotovoltaico na conversão da energia solar em energia elétrica. Diferentes tipos de impurezas, conforme o sombreamento que produzem, serão testados e o impacto que causam será registrado para uma classificação dos níveis de redução do rendimento em função do formato e quantidade de impurezas.

Serão utilizadas as medições disponibilizadas pelos próprios inversores fotovoltaicos e instrumentos de medição de radiação solar e multímetros.

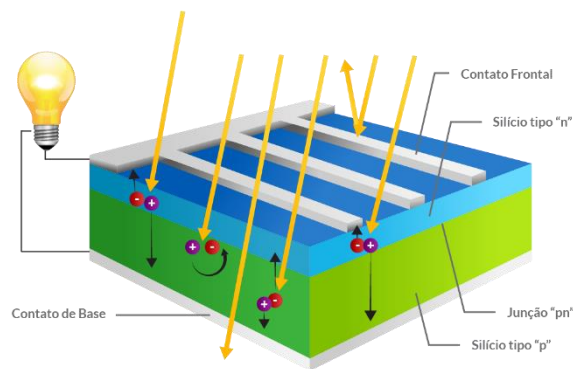
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

Em 1839, o físico Alexandre-Edmond Becquerel, observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico, concluindo que este é a conversão direta de radiação solar em energia elétrica (PINHO e GALDINO, 2014). A conversão de energia acontece no momento em que é aplicada uma incidência solar em um material semicondutor, dando origem a uma diferença de potencial, a partir de um campo elétrico originado por uma junção P-N.

Após a geração do campo elétrico, se ligada as duas camadas externas da junção P-N, é possível aproveitar toda a corrente elétrica formada pelo fluxo de elétrons existente na transição de camadas. A corrente elétrica sofrerá variação na mesma proporção em que as células recebem a incidência solar (do Nascimento, 2004).

**Figura 1: Célula fotovoltaica.**



**Fonte: (BOAVENTURA, 2013).**

### 2.2 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O silício contido na célula fotovoltaica não é o mesmo presente em diodos. É um material com uma capa de óxido transparente que tem uma alta condutividade

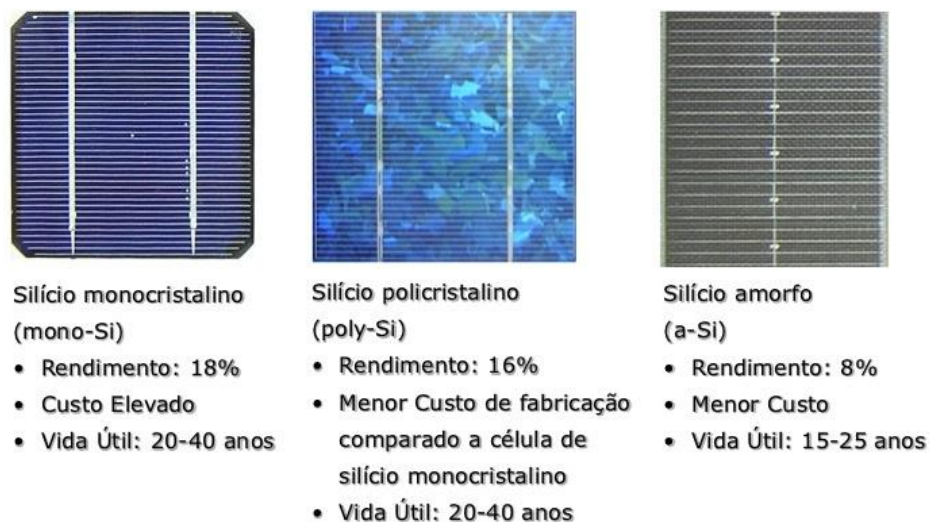
elétrica. Os cristais policristalinos presentes nos módulos são microgrãos de um material semiconductor, material este que prova criar um campo elétrico com uma alta condutividade (do Nascimento, 2004). As células mais convencionais no uso fotovoltaico são as de silício policristalino, monocristalino e de silício amorfo.

O silício policristalino é formado pela fundição do elemento, passando por vários processos de aquecimento e resfriamento, finalmente chegando à consistência de um cristal. Como há formação de vários cristais nesse processo de fabricação, podemos chamar de policristalino, pois o silício se cristaliza de forma livre (Souza, 2017).

O silício amorfo é a célula com o menor potencial de geração elétrica, variando entre 8% e 15% sua capacidade de geração, porém é a que apresenta menor custo entre todas as células. Normalmente usada em construções por ter uma fácil maleabilidade e serem formadas por películas finas de silício (Reis, 2017).

A célula monocristalina tem uma capacidade maior de produção de energia elétrica, chegando a ter um ganho de 23% em relação as outras. São fabricadas a partir de cilindros de silício em forma de pastilhas. Porém é a célula com maior custo do mercado, pois exige um material totalmente puro e uma perfeita estrutura de cristal (Reis, 2017).

**Figura 2: Comparação de células.**

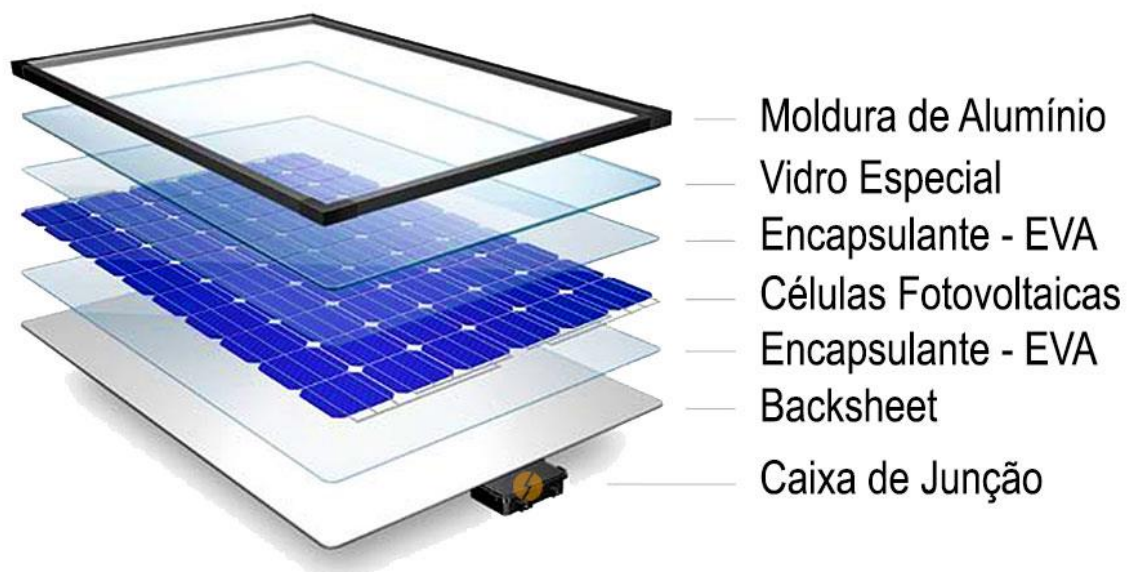


Fonte: (Copel, 2011).

As placas solares são formadas por uma moldura de alumínio, camadas de vidro, EVA e células de silício, formando o conjunto gerador que denominados de módulo fotovoltaico. Essas várias camadas que citamos, tem a função de proteger a camada de células, pois é a parte mais importante e que mais agrega valor ao módulo. Alguns fabricantes fornecem garantia de geração de até 25 anos, por decorrência de testes em laboratório e certificações que comprovam os dados. No Brasil por exemplo, para que um módulo seja inserido no mercado, ele necessariamente deve ter a certificação do INMETRO, seja para produto nacional ou importado.

Na figura 3 podemos observar todas as camadas de um módulo e a sua moldura de montagem.

**Figura 3: Composição do painel solar fotovoltaico.**



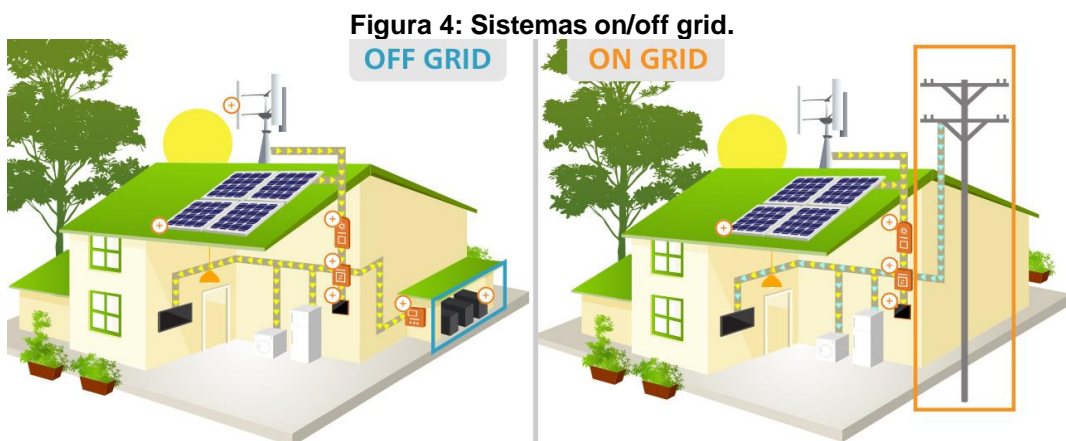
**Fonte: (Portal solar, 2019).**

### 2.3 INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS TÍPICAS

As instalações mais típicas são as ON-GRID e OFF-GRID. O sistema on-grid consiste em um conjunto de módulos fotovoltaicos que se conectam a um inversor de CC/CA, os quais se conectam à rede da unidade consumidora. Após esse processo a energia gerada é injetada na rede e gerida pela concessionária de energia da região.

O sistema off-grid é formado por um conjunto de módulos fotovoltaicos que se conectam ao controlador de carga, esse controlador fica conectado a um banco de baterias estacionárias que serão responsáveis por armazenar a energia elétrica para o consumo durante a noite e em dias de baixa geração de energia (BK Solar, 2019).

Para ficar mais claro o entendimento, os sistemas estão detalhados abaixo na figura 4.



Fonte: (Strom Brasil, 2019).

## 2.4 ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

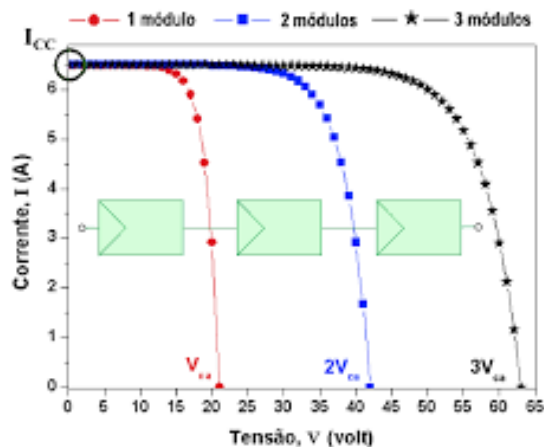
A associação de módulos para um sistema fotovoltaico, é um elemento imprescindível e deve ser levado em consideração no momento da realização do projeto. A fim de que a unidade geradora tenha um rendimento ideal, os módulos devem atingir a sua potência máxima ( $P_{max}$ ), que dependerá exclusivamente da associação correta de módulos, fornecendo assim o maior valor possível de energia ao sistema, garantindo o rendimento e eficiência de geração para a unidade consumidora da geração distribuída (Carneiro, 2010).

A associação série dos módulos, permite que o sistema tenha um maior valor de tensão, pois as mesmas são somadas. Enquanto isso, a corrente se mantém aos padrões de fábrica do módulo.

Podemos ver no gráfico 3 a demonstração de gráfico para a associação de módulos em série.



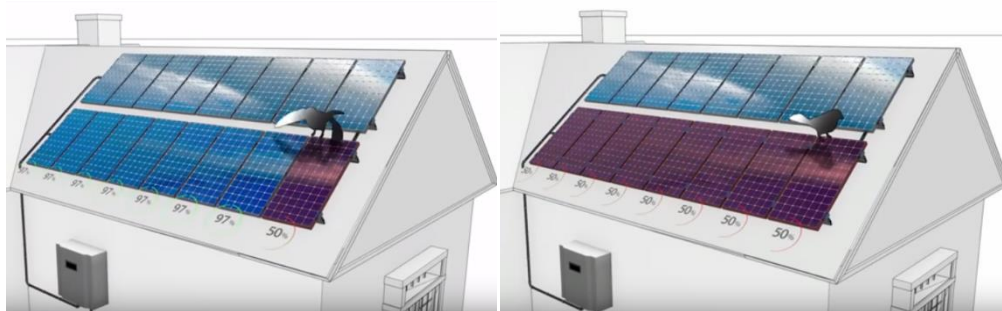
**Gráfico 3: Gráfico da associação série de módulos.**



Fonte: (Carneiro, 2010).

Levando em consideração o sombreamento na associação em série, quando um módulo é sombreado, o mesmo acaba afetando todo o resto do sistema, causando uma perda exponencial na geração de energia. Como podemos ver na figura 5, o sombreamento causado por um pombo em um módulo, afetou significativamente todo o arranjo fotovoltaico.

**Figura 5: Sombreamento na associação série.**



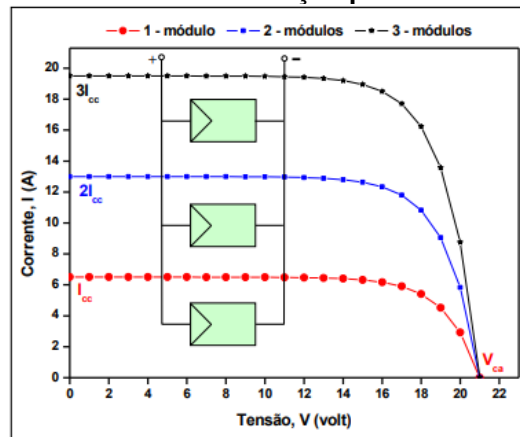
Fonte: (Canal Solar, 2018).

A associação de módulos em paralelo é exatamente ao contrário da associação em série, pois são as correntes que se somam e a tensão se mantém aos padrões de fábrica do módulo. A forma mais usual atualmente é a associação série, pois o arranjo precisa alcançar uma determinada faixa de tensão, para que a MPPT ligue o inversor.

Na associação paralelo isso não seria possível, já que a soma se dá pelas correntes, a única forma seria realizar um sistema misto, colocando alguns módulos em série, para que seja alcançada a tensão nominal de ligamento do inversor.

No gráfico a seguir (gráfico 4) podemos ver a associação em paralelo e a reação das correntes em relação com as tensões.

**Gráfico 4: Gráfico da associação paralelo de módulos.**



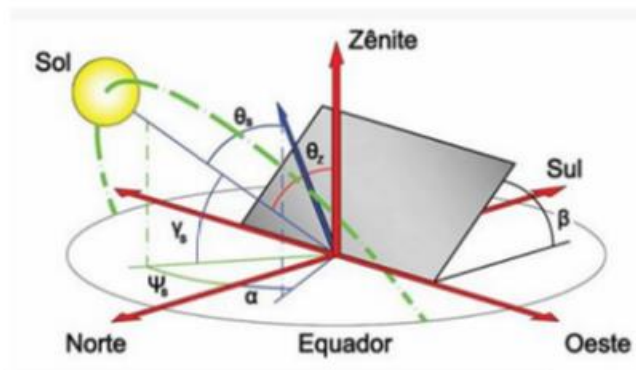
Fonte: (Carneiro, 2010).

## 2.5 DIRECIONAMENTO E INCLINAÇÃO DOS MÓDULOS

No Brasil, abaixo da linha do Equador, a melhor posição geográfica para os módulos é a posição Norte, pois o sol nasce no Leste se inclinando ao Norte e se põe no Oeste, como pode ser observado na figura 6.

Para regiões mais ao Norte do país e acima da linha do Equador, as posições geográficas mudam, sendo mais viável a instalação dos sistemas orientados ao Sul (Portal Solar, s.d.).

**Figura 6: Direcionamento e inclinação ideal.**



Fonte: (BBS Solar, s.d.).

A orientação para sistemas geradores é muito importante, pois quando se tem um sistema não orientado corretamente, ele pode se tornar ineficiente e acaba sendo inviável a instalação. Os exemplos abaixo podem demonstrar melhor essas perdas:

- Perdas em orientações com face Noroeste e Nordeste vão de 3% a 8%;
- As perdas em telhados orientados a Leste ou Oeste vão de 12% a 20%;
- E as perdas para orientação Sul são muito mais significativas, por isso não são recomendadas, a não ser que o local de instalação esteja no Norte do Brasil. (Portal Solar, s.d.).

No momento do projeto, deve ser feita toda a medição do telhado, posicionamento geográfico, inclinação e disposição das placas para maior eficiência do sistema gerador.

Na figura 7, é representado um modelo ideal de instalação para que as perdas sejam praticamente nulas de acordo com a orientação geográfica.

**Figura 7: Posicionamento ideal em um telhado.**

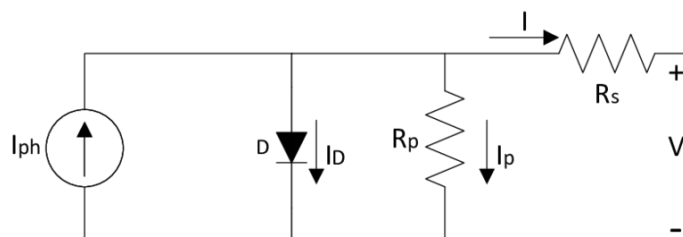


Fonte: (Lucas Mendes, s.d.).

## 2.6 CIRCUITO EQUIVALENTE

Inicialmente para melhor entendimento, representamos o circuito eletrônico equivalente de uma forma simplificada, que nada mais é do que um diodo em paralelo com a fotocorrente ( $I_{ph}$ ). Para completar o modelo de circuito e melhorar a precisão, são representadas as resistências em série e paralelo ( $R_s, R_p$ ) como podemos observar na figura 8 (Casaro & Martins, 2008).

**Figura 8: Circuito elétrico equivalente.**



Fonte: (Research Gate, s.d.).

O equacionamento do circuito é representado por:

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n.k.T}} - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

V, I	- Tensão e corrente;
$I_{ph}$	- Fotocorrente;
$I_r$	- Corrente de saturação reversa;
$R_s, R_p$	- Resistências série e paralelo;
q	- Carga do elétron $1,6 \times 10^{-19}$ C;
n	- Fator de qualidade da junção P-N ;
k	- Constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;
T	- Temperatura ambiente K.

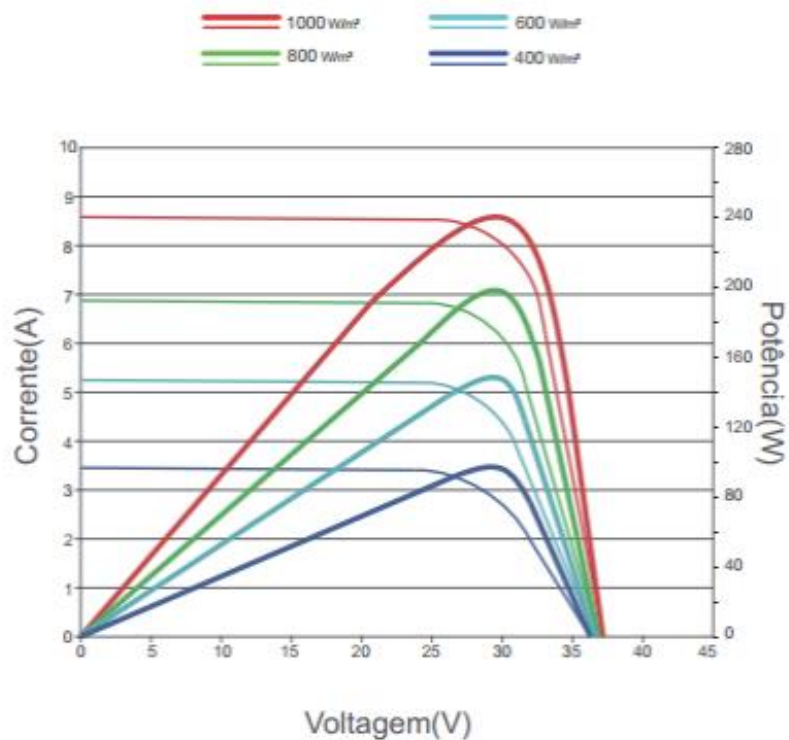
### 2.6.1 COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A incidência solar sobre um módulo fotovoltaico é variável ao longo do dia, tendo seu ponto de pico em torno de  $1000 \text{ W/m}^2$  ao horário do meio dia (12h).

Alguns aspectos afetam essa incidência de luz solar, reduzindo a fotocorrente que pode ser gerada pelo módulo. A passagem de luz pode ser obstruída por obstáculos como árvores, folhas, poeira e detritos sólidos, afetando na produção da fotocorrente pelo circuito interno do módulo, conseqüentemente diminuindo a capacidade de geração de um sistema fotovoltaico, acarretando em perdas significativas.

No gráfico 5 podemos observar o fenômeno da fotocorrente ( $I_{ph}$ ) em relação a tensão (V) através das curvas obtidas. Os dados representam um módulo de 260 W e é perceptível que o aumento da corrente na junção P-N é proporcional ao aumento da incidência solar ( $W/m^2$ ) sobre o módulo (Brito & Bertinato, 2017).

**Gráfico 5: Curva da corrente/potência x tensão.**



Fonte: (Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos).

### 3 ENSAIOS COM MÓDULO FOTOVOLTAICO AVULSO (OFF-GRID)

Para dar início à fase de testes e ensaios práticos, primeiramente realizamos os mesmos em módulos fotovoltaicos avulsos, que não se conectam à rede elétrica. Essa fase do processo de testes tem como objetivo comprovar a perda de rendimento na geração de energia elétrica através do acúmulo de sujeiras e detritos, para então viabilizar os testes em sistemas on-grid (conectados à rede elétrica).

Para simulação do acúmulo de detritos, separamos determinadas quantidades e tipos de sujeiras em estágios, para que pudéssemos obter a porcentagem de perda de rendimento através do grau de sujeira acumulada no vidro superior do módulo fotovoltaico.

Equação de perda de rendimento:

$$\text{Perda de rendimento (\%)} = \left( \frac{I_{medida} * 100\%}{I_{base}} \right) - 100 \quad (2)$$

Onde:

- $I_{medida}$  - Corrente medida (com módulo sujo);
- $I_{base}$  - Corrente ideal (com módulo limpo).

Quando se mede com um multímetro a corrente de curto-circuito de um módulo, se lê o valor da fotocorrente produzida, pois nesta condição  $I_{módulo} = I_{ph}$ .

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha (T - T_r)] * \frac{P_{sun}}{1000} \quad (3)$$

Onde:

- $I_{sc}$  - Corrente de curto-circuito por célula;
- $\alpha$  - Coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$ ;
- $T_r$  - Temperatura de referência, 298K;
- $P_{sun}$  - Intensidade de radiação solar, W/m<sup>2</sup>.

Embora não tenha sido medida, a tensão elétrica também se reduz com a redução de irradiância, ou seja, diminuindo a intensidade de radiação solar incidente sobre as células fotovoltaicas. Isso significa que o impacto sobre a potência elétrica

convertida, se dá num percentual inferior aos percentuais registrados nos estágios de acúmulo.

Todas as simulações foram realizadas em dias de tempo firme e sem nuvens no horário entre 10h15min e às 10h40min, para padronizar a incidência solar em todos os testes. A angulação do módulo e do medidor de energia solar foi regulada em 25° baseado na latitude da cidade de Ponta Grossa – PR, inclinados ao hemisfério norte.

**Figura 9: Regulagem de inclinação do módulo e medidor solar.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.1 EQUIPAMENTOS

- 1 Multímetro digital - ENERBRAS MD-E1;
- 2 Medidor de energia solar - ICEL Manaus SP-2000;
- 3 Módulo fotovoltaico policristalino – AKTHON 55W;
- 4 Aplicativo de medida de nível – IOS 12.3.1;

### 3.2 ESTÁGIOS DE ACÚMULO DE DETRITOS

- Estágio 1: Quantidade pequena de pó de cascalho;
- Estágio 2: Quantidade elevada de pó de cascalho;
- Estágio 3: Quantidade elevada de pó de cascalho e folhas de árvore.

### 3.3 MEDIÇÕES COM MÓDULO LIMPO

Inicialmente, com todos os equipamentos ligados e corretamente regulados na direção e inclinação correta, realizamos o primeiro teste para servir de base e comparar com os testes de módulo sujo em seus determinados estágios de acúmulo de detritos.

**Figura 10: Módulo limpo.**



Fonte: Autoria própria.

Como podemos observar na imagem a seguir, o módulo apresenta uma corrente de 2,50 A à 770 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 11: Medidas com módulo limpo.**



Fonte: Autoria própria.



### 3.4 ESTÁGIO 1 DE ACÚMULO DE DETRITOS

Nessa etapa de ensaios, determinamos que o módulo deveria ter um acúmulo pequeno de poeira, simulando um arranjo fotovoltaico com pouca sujeira, ou seja, um sistema com aproximadamente seis meses de uso ou em algum local longe de ameaças de acúmulo de detritos e com grande decorrência de chuvas.

O material utilizado para sujar o módulo foi o pó de cascalho, cobrindo levemente a superfície de vidro e com alguns pontos mais acumulados.

**Figura 12: Módulo com detritos em estágio 1.**

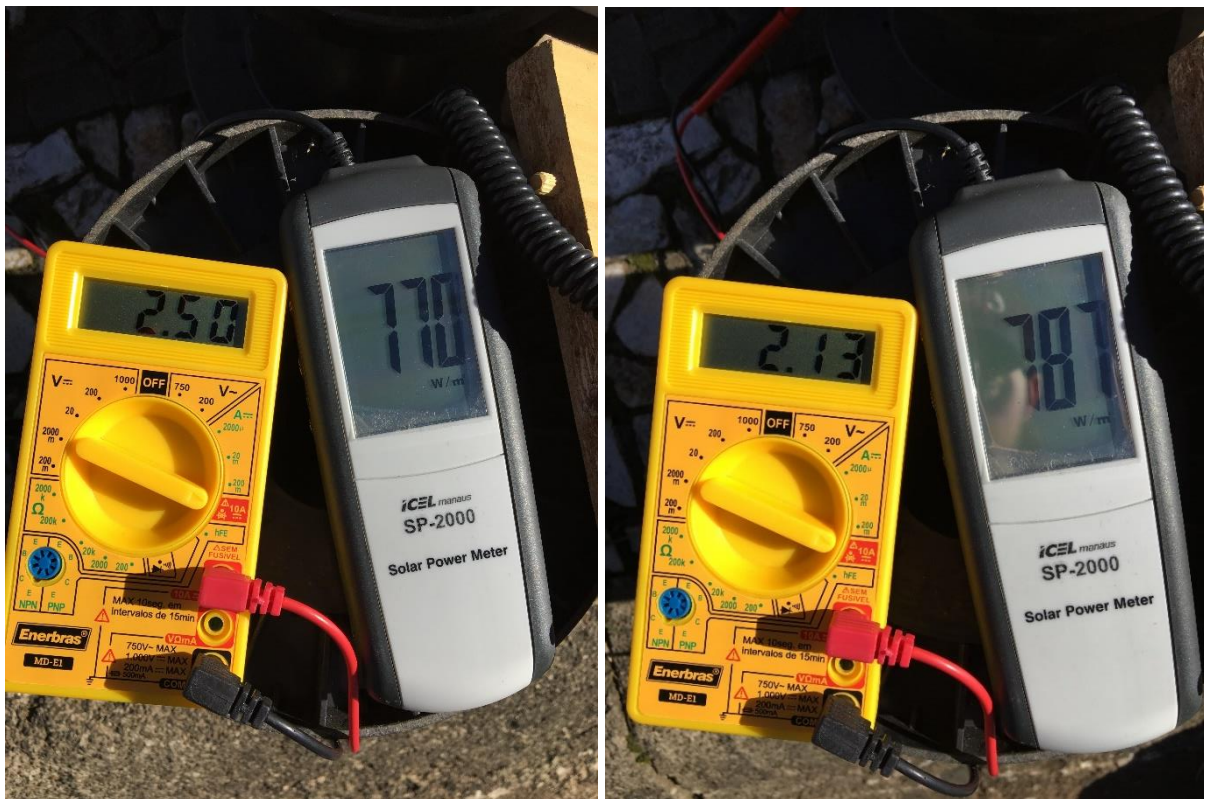


**Fonte: Autoria própria.**

A medição foi realizada logo após a deposição do pó de cascalho sobre o módulo, apresentando resultado de perda de rendimento com base no medidor de energia solar e na corrente fornecida no instante.

Na imagem a seguir podemos observar o resultado dos medidores e comparar com o tópico anterior em que o módulo estava limpo. O acúmulo de pó de cascalho causou cerca de 16% de queda na corrente, impactando diretamente no rendimento e na geração de energia do módulo.

Figura 13: Comparação de medidas entre módulo limpo e estágio 1.



Fonte: Autoria própria.

### 3.5 ESTÁGIO 2 DE ACÚMULO DE DETRITOS

No estágio dois, determinamos como simulador de detritos uma quantidade mais elevada de pó de cascalho, para simular um sistema com maior sujidade, consequentemente acarretando numa perda maior na geração de energia. Esse estágio de acúmulo pode ser comparado com um sistema com mais de 1 ano sem limpeza dos módulos ou próximo de áreas rurais e de grande fluxo de veículos em estradas de terra e cascalho.

**Figura 14: Módulo com detritos em estágio 2.**

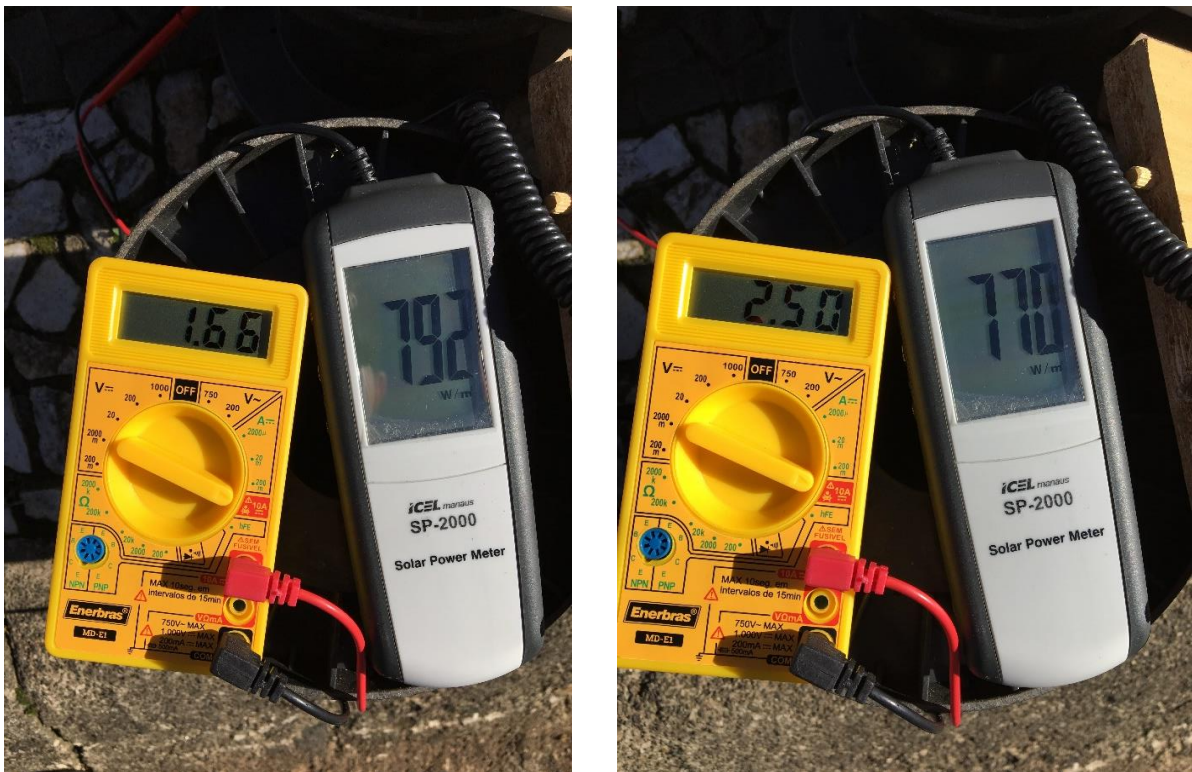


**Fonte: Autoria própria.**

Como resultado do estágio 2 de acúmulo de detritos, obtivemos uma queda de corrente de aproximadamente 33,6%, o que pode-se considerar um número bem elevado na perda de rendimento em função do custo de instalação de um sistema fotovoltaico.

Podemos observar os resultados dos medidores no estágio 2 e comparar com os resultados do módulo limpo. O cálculo de perda é baseado na potência em  $W/m^2$  e na corrente, determinando a porcentagem de diminuição na geração de energia elétrica pelo módulo.

Figura 15: Comparação de medidas entre módulo limpo e estágio 2.



Fonte: Autoria própria.

### 3.6 ESTÁGIO 3 DE ACÚMULO DE DETRITOS

No estágio 3 simulamos um acúmulo de detritos similar ao estágio 2, com bastante pó de cascalho mas acrescentamos também folhas de árvore, comparando a situação com um sistema instalado próximo de uma vegetação arbórea.

As folhas demonstraram uma sujidade mais intermitente, pois se trata de algo leve e não fica por um longo período de tempo na superfície do módulo. Porém, durante o período em que está depositada sobre o vidro, causa uma perda significativa ao gerador.

Figura 16: Módulo com detritos em estágio 3.

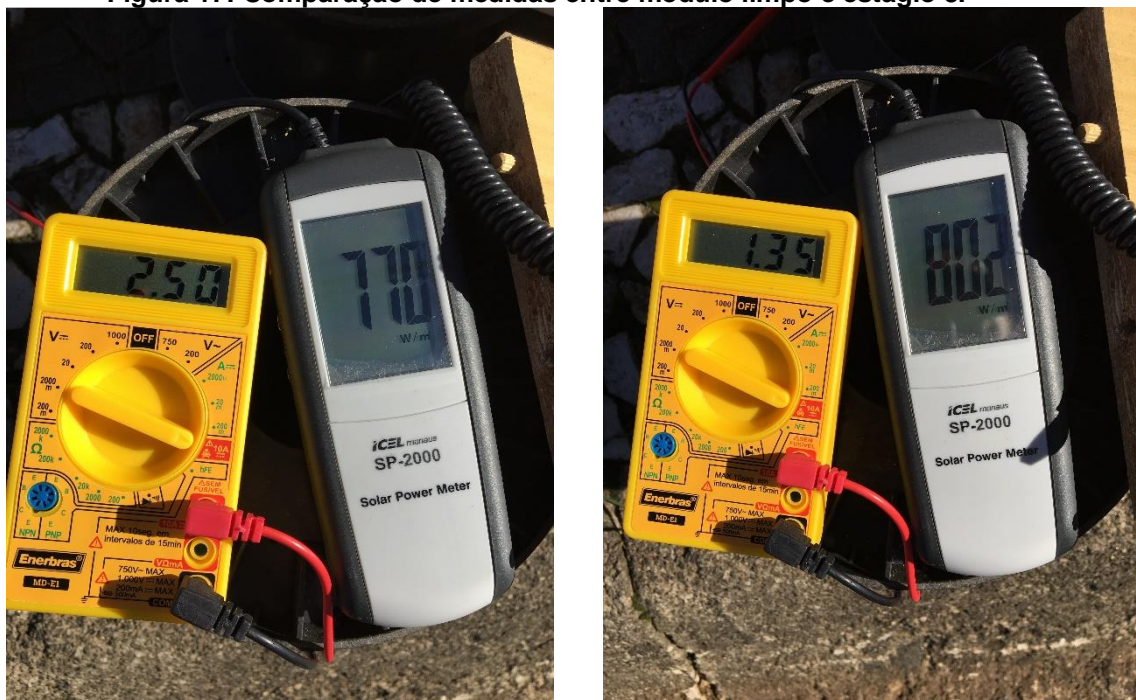


Fonte: Autoria própria.

As medidas do estágio 3, demonstraram uma perda de aproximadamente 46% na geração do módulo, o que pode causar grande impacto econômico e inviabilidade de instalação do sistema gerador de energia.

Na figura a seguir podemos observar a variação na corrente fornecida pelo módulo e assim chegamos à conclusão de que a variação é elevada quando há presença de folhas e detritos sólidos sobre a superfície de vidro.

Figura 17: Comparação de medidas entre módulo limpo e estágio 3.



Fonte: Autoria própria.

### 3.7 ANÁLISE DE RESULTADOS

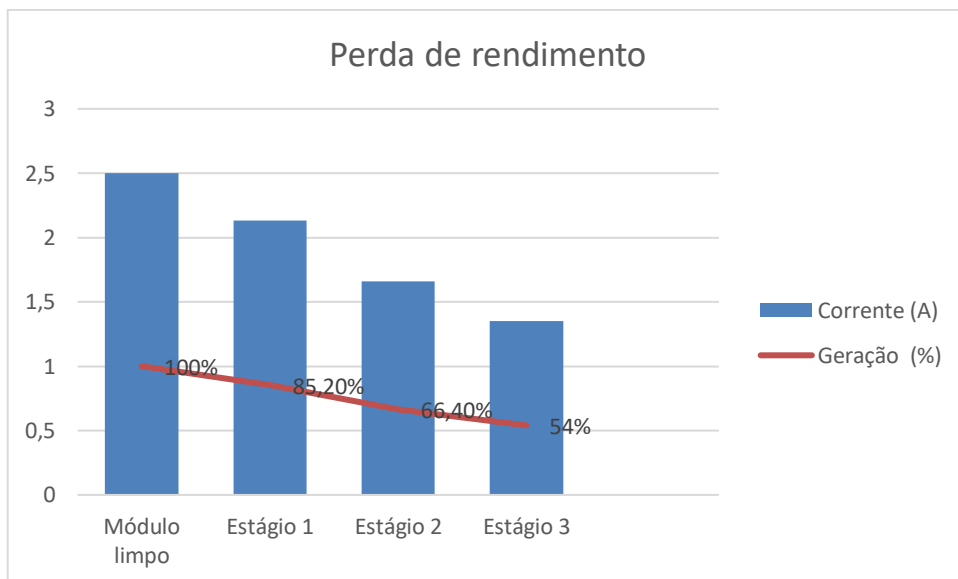
Analisando os dados da tabela 1, podemos observar a perda de rendimento na geração do módulo fotovoltaico, tendo como base o módulo limpo comparado aos dados obtidos em cada estágio de acúmulo.

**Tabela 1: Comparação da perda de rendimento.**

	Módulo limpo	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
Corrente (A)	2,5	2,13	1,66	1,35
Geração (%)	100%	85,20%	66,40%	54%

Notamos através do gráfico 6 que a corrente e a geração de energia mantêm relação direta na perda de rendimento, chegando a 46% da capacidade do módulo no estágio 3 do acúmulo de detritos.

**Gráfico 6: Comparação de perda de rendimento.**



**Fonte: Autoria própria.**

## 4 ENSAIOS COM SISTEMAS INSTALADOS (ON-GRID)

Neste capítulo, realizamos estudos em sistemas on-grid com apoio da empresa BK Solar, nos fornecendo dados e gráficos de geração coletados dos sistemas de monitoramento da empresa com seus clientes. A partir das medições de radiação solar e da potência monitorada, obtemos o ganho de geração de energia após a limpeza do arranjo fotovoltaico.

Nessa fase, o processo para aquisição de dados foi realizada de maneira inversa ao capítulo anterior. Iniciamos com um sistema sujo por tempo de uso, efetuamos a coleta de dados e logo após a limpeza, coletando os resultados finais para a comparação e cálculo do ganho de rendimento, através de gráficos criados no software MATLAB.

Equação do ganho de rendimento:

$$\text{Ganho de rendimento (\%)} = 100 - \left(\frac{P_s}{P_l}\right) \times 100\% \quad (4)$$

Onde:

$P_s$  - Potência com sistema sujo (medida antes da limpeza);

$P_l$  - Potência com sistema limpo (medida após a limpeza).

Os dados foram coletados exatamente no mesmo horário, para que as medições se mantenham sob as mesmas condições de inclinação e radiação solar. Utilizamos a potência do conjunto de módulos em função da radiação solar para obter o ganho de rendimento após a limpeza no sistema fotovoltaico.

### 4.1 MEDIÇÕES NO SISTEMA 1 (UTFPR)

A primeira aquisição de dados em sistemas On-Grid foi efetuada nas dependências da UTFPR no Câmpus Ponta Grossa. O gerador encontra-se instalado no telhado do bloco V, direcionado 300° à Noroeste com inclinação do telhado de 17°. O sistema entrou em funcionamento em Novembro de 2016 e ainda

não havia sido efetuado limpeza ou manutenção preventiva, sendo assim, o mesmo ficou durante dois anos e sete meses sob acúmulo de detritos.

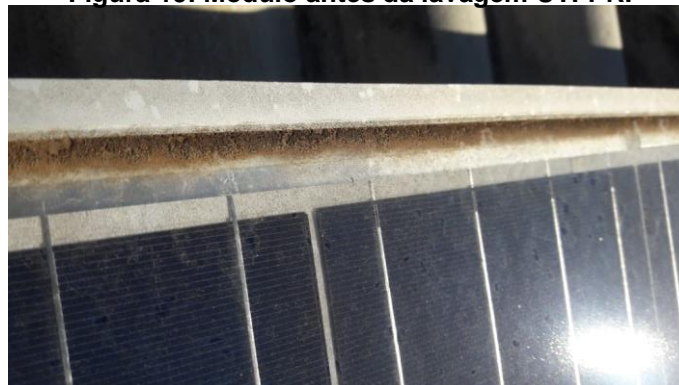
Nas próximas imagens podemos observar a diferença de limpeza e do acúmulo de sujeira sob o sistema antes e depois da lavagem ser efetuada.

**Figura 18: Arranjo UTFPR antes da lavagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 19: Módulo antes da lavagem UTFPR.**



**Fonte: Autoria própria.**

O sistema apresentou um acúmulo de detritos significativo, mas com uma condição melhor do que normalmente é encontrado com dois anos e sete meses de utilização sem a devida lavagem, pois está instalado em um ponto bem alto do bloco, mantendo-se mais protegido de poeira e fuligem.

Após a lavagem, tiramos fotos do sistema limpo e, logo após iniciamos a aquisição de dados de potência e radiação para efetuar a comparação com os dados do arranjo em condições de sujeira.



**Figura 20: Arranjo UTFPR após a lavagem.**

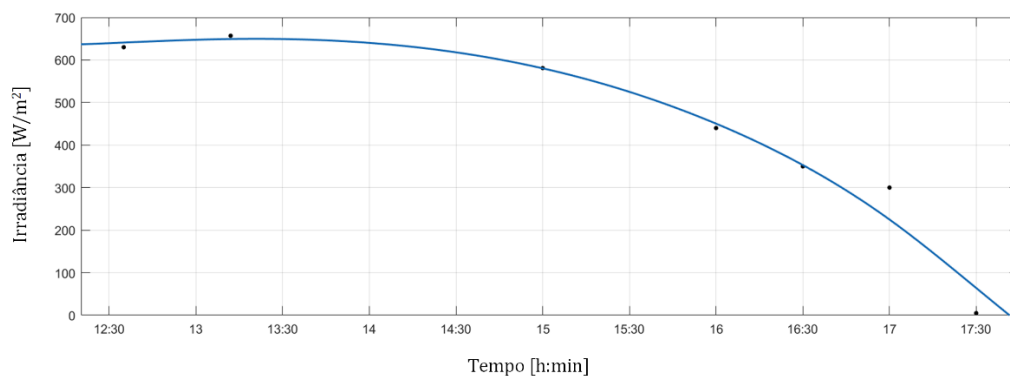


**Fonte: Autoria própria.**

Com a diferença visual da limpeza, é possível supor que o rendimento do sistema aumentou significativamente, e é isso que os gráficos com os dados adquiridos nos mostram a seguir.

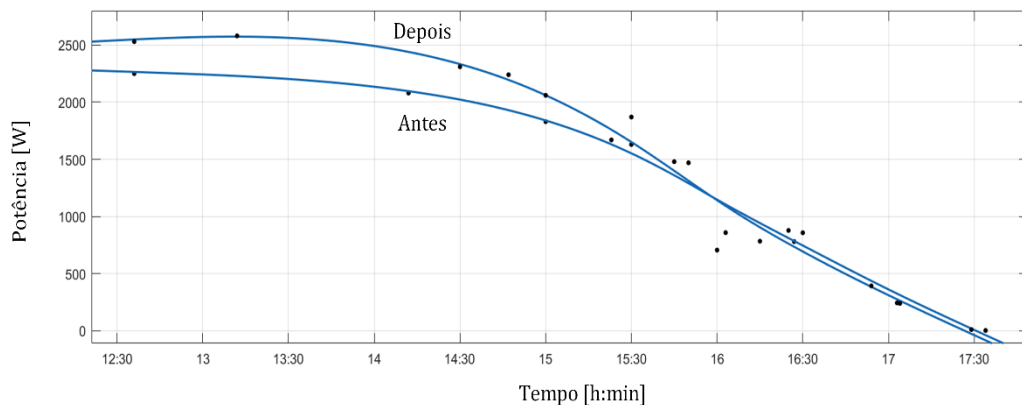
O primeiro dado a ser coletado foi a irradiância, que mostra como o dia de coleta de dados antes da limpeza apresenta as mesmas condições do dia após a limpeza.

**Gráfico 7: Irradiância**



**Fonte: Autoria própria.**

Tendo todos os dados como base para os cálculos, o gráfico da diferença entre a potência medida antes e depois da limpeza, mostra como a perda de rendimento é significativa quando temos um sistema limpo.

**Gráfico 8: Potência antes e depois.**

**Fonte: Autoria própria.**

Analisando o gráfico 8, é possível perceber como a diferença de potência antes e depois da limpeza é em média 300 W. Esse valor equivale aproximadamente com a potência de um módulo inteiro de 72 células que fornece 325 Wp de potência. No horário de 12:00 horas, tem-se o pico da irradiância do dia, a partir desse horário essa irradiância pode oscilar e deverá decair com o decorrer da tarde.

Entre as 12:30 até as 15:30 horas, fica claro observar a diferença no rendimento. A partir desse horário a irradiância é baixa e a potência tende a cair até o desligamento do inversor, que ocorre entre as 17:30 e 18:00 horas para esse sistema especificamente.

## 4.2 MEDIÇÕES NO SISTEMA 2

O segundo sistema mensurado foi residencial, conjunto formado por cinco módulos que estava em funcionamento desde novembro de 2017 sem manutenções ou limpezas. O conjunto ficou um ano e oito meses sob acúmulo de detritos, por mais que está localizado em um condomínio, relativamente longe de fontes de sujeira, já estava com uma perda significativa de geração.

Nas figuras 21 e 22 é possível observar como estava a situação do sistema antes da lavagem.

**Figura 21: Arranjo da casa em condomínio antes da limpeza.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 22: Arranjo da casa em condomínio antes da limpeza 2.**



**Fonte: Autoria própria.**

Na figura 23 é possível observar o sistema após a limpeza e a diferença visual na coloração refletida pelos módulos.

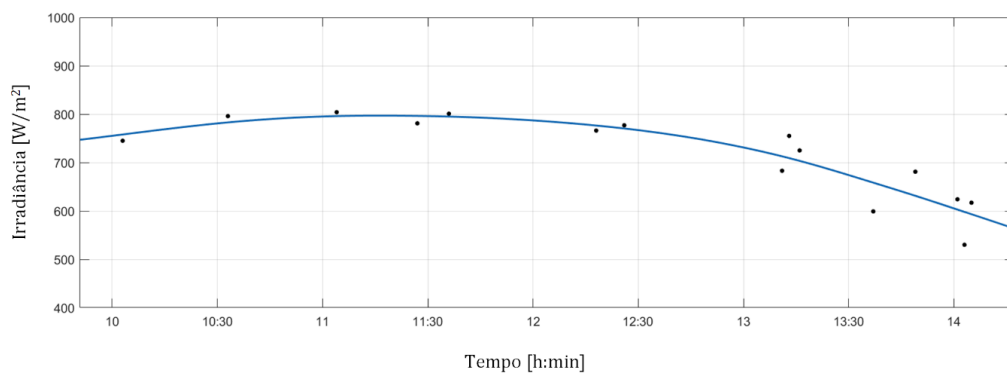
**Figura 23: Arranjo da casa em condomínio após a limpeza.**



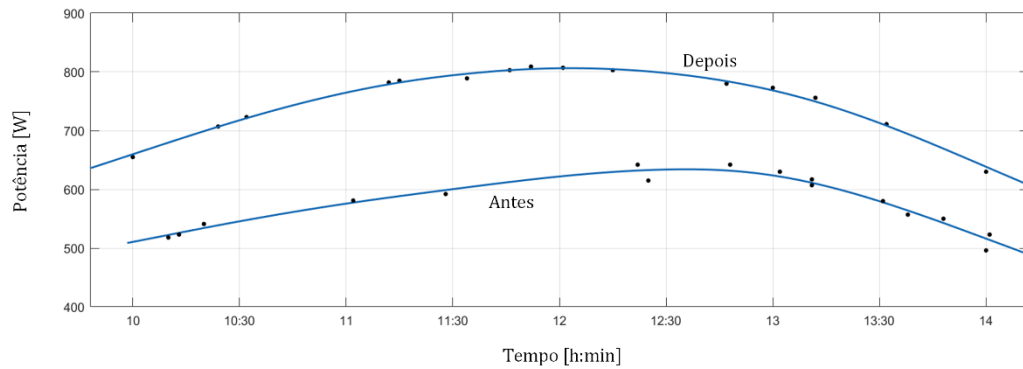
**Fonte: Aatoria própria.**

Visualmente a limpeza foi muito eficaz, assim como também apresentou uma boa melhora nos dados de rendimento da geração. No gráfico 9 é possível analisar como foi a irradiância no dia após a limpeza, para usá-la como base para a observação do gráfico 10, que mostra a potência durante cada coleta de irradiância simultaneamente.

**Gráfico 9: Irradiância antes e depois.**



**Fonte: Aatoria própria.**

**Gráfico 10: Potência antes e depois.**

**Fonte: Autoria própria.**

O aumento da potência após a limpeza chega em torno de 21%, trazendo maior benefício e economia para a unidade geradora. O ganho de potência na limpeza mantém o *payback* sem atrasos e a qualidade do arranjo fotovoltaico.

#### 4.3 MEDIÇÕES NO SISTEMA 3 (Cliente BK Solar)

A terceira fase de medições foi realizada na cidade de Imbituva-PR, na residência de um cliente da BK Solar, que adquiriu o sistema em agosto de 2018, ou seja, estava em funcionamento à 11 meses.

Nesse cliente conseguimos observar que a quantidade de sujeira era bem pequena, pois o telhado é alto e com uma angulação maior, tornando mais fácil a auto limpeza através das chuvas. Mesmo assim os resultados apresentaram ganho de potência. Na figura 24 podemos observar o telhado antes da lavagem.

**Figura 24: Arranjo do cliente BK Solar antes da lavagem.**

**Fonte: Autoria própria.**

Após a lavagem podemos observar um ganho de potência de aproximadamente 15%. Em um sistema como esse, podemos estimar que o tempo de lavagem tenha intervalos de 12 meses, pois não há fonte de sujeira próximos e que causem danos e perdas ao conjunto gerador.

Na figura 25 podemos analisar os módulos após a lavagem.

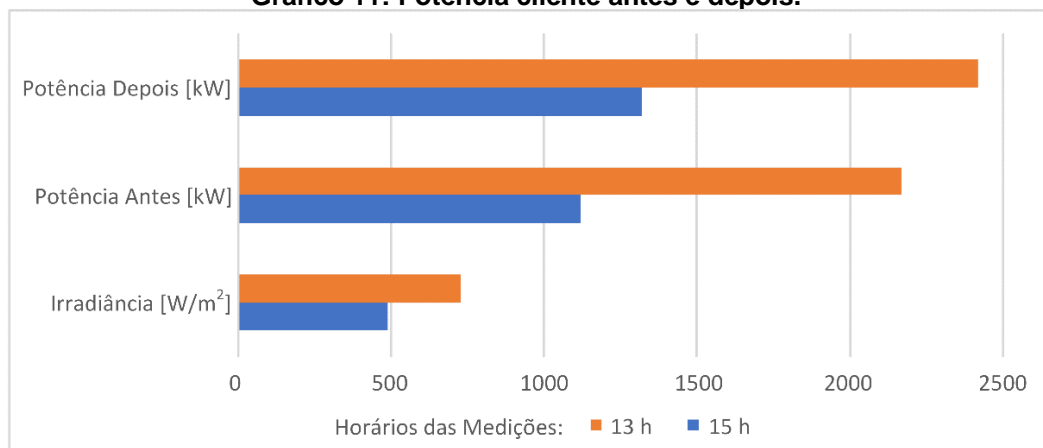
**Figura 25: Arranjo do cliente BK Solar após da lavagem.**



Fonte: Autoria própria.

O ganho de 15% para o sistema gerador pode ser analisado no gráfico 11 que apresenta a irradiação e a potência medida no sistema antes e depois da lavagem.

**Gráfico 11: Potência cliente antes e depois.**



Fonte: Autoria própria.

## 5. CONCLUSÃO

Concluindo as pesquisas e ensaios com base nos resultados, determinamos que o período para limpeza dos módulos deve ser dimensionado com relação ao local instalado, região, clima, inclinação e orientação, pois cada um dos fatores pode influenciar diretamente no acúmulo de detritos sobre a superfície de vidro dos módulos.

Com os dados e acompanhamentos de sistemas fotovoltaicos já instalados pudemos também observar que para sistemas que estão pouco expostos aos fatores que influenciam na sujeira, como lugares altos (prédios, casas de dois pisos, residências localizadas em locais de maior altitude da cidade, etc), lugares acima do nível das árvores (como o sistema instalado nas dependências da UTFPR Campus Ponta Grossa), localizados em cidades com baixo nível de poluição, longe de lugares onde tenha alto fluxo de veículos por estradas de terra ou cascalho, são sistemas que necessitam de uma manutenção de limpeza de 6 a 9 meses no máximo de intervalo entre as limpezas. Com esse tempo médio para lugares pouco expostos, o proprietário do sistema tem uma geração com uma variação quase insignificante por perdas decorrentes de sujeiras.

Por meio da comparação entre os sistemas instalados e os ensaios de laboratório, conseguimos determinar um estágio de criticidade para cada condição de acúmulo de detritos, facilitando a forma de avaliar a condição do sistema e determinar o tempo necessário para que sejam realizadas as manutenções.

Esse trabalho nos proporcionou grande obtenção de conhecimento, por estar pesquisando um assunto pouco abordado, porém de extrema importância para a vida útil de um sistema solar, gerando diretamente um impacto financeiro. A atuação no mercado de energia solar facilitou a aquisição de dados, contribuindo para um melhor desenvolvimento do trabalho e trazendo todas as informações necessárias.

## REFERÊNCIAS

- Agência nacional de energia elétrica. (28 de 09 de 2015). *aneel*. Fonte: agência nacional de energia elétrica: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>
- BBS Solar. (s.d.). *BBS Solar*. Acesso em 23 de 04 de 2019, disponível em BBS Solar: <http://bbssolar.com.br/curso>
- BK Solar. (06 de 04 de 2019). *BK Solar*. Fonte: BK Solar: [www.bksolar.com.br](http://www.bksolar.com.br)
- Brito, L. P., & Bertinato, P. J. (2017). *Influência de condições meteorológicas na eficiência de sistemas fotovoltaicos*. Monografia, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de sistemas elétricos e energia, Itajubá. Acesso em 08 de 05 de 2019, disponível em <https://saturno.unifei.edu.br>
- Canal Solar. (07 de 05 de 2018). *Canal Solar*. Acesso em 23 de 04 de 2019, disponível em Canal Solar: <https://www.youtube.com/watch?v=Gtwf6-a2axs>
- Carneiro, J. (2010). Electromagnetismo B módulos fotovoltaicos características e associações. *Departamento de física da Universidade do Minho*, 8-12. Acesso em 23 de 04 de 2019, disponível em <https://core.ac.uk/download/pdf/55618427.pdf>
- Casaro, M. M., & Martins, D. C. (03 de 08 de 2008). Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação.
- Copel*. (01 de 02 de 2019). Fonte: Copel: [www.copel.com](http://www.copel.com)
- do Nascimento, C. A. (2004). *PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA*. Monografia, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Lavras - MG.
- Empresa de pesquisa energética*. (06 de 08 de 2019). Fonte: EPE: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)
- Lucas Mendes. (s.d.). *Astra Solar*. Acesso em 23 de 04 de 2019, disponível em Astra Solar: <https://astrasolar.com.br/energia-solar/energia-solar-no-projeto-arquitetonico/>
- Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. (s.d.). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (1 de Março de 2018). Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico Brasileiro. *Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico Brasileiro*.
- Portal Solar. (s.d.). *Portal Solar*. Acesso em 23 de 04 de 2019, disponível em Portal Solar: <https://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>
- Reis, P. (27 de 10 de 2017). *Portal Energia*. Fonte: Portal Energia: [www.portal-energia.com](http://www.portal-energia.com)
- Research Gate. (s.d.). *Research Gate*. Acesso em 08 de 05 de 2019, disponível em Research Gate: <https://www.researchgate.net>
- Souza, R. d. (23 de 02 de 2017). *Blue Sol*. Fonte: Blog Blue Sol: [www.blog.bluesol.com.br](http://www.blog.bluesol.com.br)