

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FEELT – FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
LEONARDO HUMBERTO TAVARES PEREIRA

Análise dos efeitos da sujeira na performance de geração em uma usina fotovoltaica :
Um estudo de caso utilizando análises teóricas e práticas com dados obtidos através do
ensaio de curva IV

Uberlândia – MG

2024

LEONARDO HUMBERTO TAVARES PEREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso da
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia - UFU - Câmpus
Santa Mônica, como requisito para a
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica

Banca examinadora :

Prof. Dr. José Roberto Camacho

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Francisco Wellington Martins da Silva

Uberlândia – MG

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, pela sabedoria e pela fé que me sustentaram durante toda essa jornada, permitindo que eu superasse os desafios e alcançasse meus objetivos.

Agradeço com todo o meu coração à minha mãe, Rosemary de Fátima Tavares Pereira, por sua paciência, apoio incondicional e amor ao longo de todos esses anos. Sem a sua compreensão e incentivo constantes, essa conquista não teria sido possível.

Ao meu orientador, José Roberto Camacho, expresso minha sincera gratidão pela orientação, dedicação e pelas valiosas contribuições que foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Sua experiência e incentivo foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos amigos que fiz ao longo desta caminhada, que compartilharam comigo momentos de aprendizado, desafios e alegrias, sou eternamente grato. A amizade e o companheirismo de vocês tornaram essa jornada muito mais significativa e leve.

A equipe Arsol Energia pela persistência e confiança na minha capacidade.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Uberlândia por proporcionar o ambiente e os recursos que possibilitaram minha formação. Esta instituição foi essencial para minha evolução acadêmica e profissional, sendo um verdadeiro pilar na minha trajetória.

“Nada é permanente, exceto a mudança.”

Heráclito de Éfeso

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 - Composição de um módulo fotovoltaico	22
Figura 2 - Célula solar	23
Figura 3 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	25
Figura 4 – Exemplo de curva IV característica	25
Figura 5 - Módulo com vidro temperado trincado	26
Figura 6 - Material encapsulante	27
Figura 7 - Traseira de módulos fotovoltaicos	28
Figura 8 - Moldura de um módulo fotovoltaico	29
Figura 9 - Caixa de junção de um módulo fotovoltaico	30
Figura 10 - Inversor fotovoltaico e seus elementos	31
Figura 11 - Transformador em uma usina de mini-geração	33
Figura 12 - Exemplo de curva IV	37
Figura 13 - Anomalias na Curva IV	40
Figura 14 - Módulos com avaria identificados através da termografia	43
Figura 15 - Usina Fotovoltaica Atlas	43
Figura 16 - Medição com módulo sujo	44
Figura 17 - Medição com módulo limpo	45
Figura 18 - Forma da curva com módulo sujo	47
Figura 19 - Parâmetros medidos com módulo sujo	48
Figura 20 - Ensaio com módulo limpo	50
Figura 21 - Parâmetros medidos com o módulo limpo	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC - Corrente Alternada (Alternating Current)

AM - Massa de Ar (Air Mass)

BESS - Battery Energy Storage Systems (Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias)

BYD - Build Your Dreams (fabricante de módulos fotovoltaicos)

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DC - Corrente Contínua (Direct Current)

FF - Fator de Preenchimento (Fill Factor)

IEC - International Electrotechnical Commission

Isc - Corrente de Curto-Circuito (Short-Circuit Current)

IV - Corrente e Tensão (Current and Voltage)

kWp - Quilowatt Pico (potência de um sistema fotovoltaico)

MPP - Ponto de Máxima Potência (Maximum Power Point)

MW - Megawatt

NR - Norma Regulamentadora

PV - Fotovoltaico (Photovoltaic)

SMC - Subestação Matozinhos Centro

STC - Condições Padrão de Teste (Standard Test Conditions)

UFV - Usina Fotovoltaica

Vmp - Tensão no Ponto de Máxima Potência (Voltage at Maximum Power Point)

Voc - Tensão de Circuito Aberto (Open-Circuit Voltage)

W - Watt

Wp - Watt Pico

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o impacto da sujeira acumulada em módulos fotovoltaicos na eficiência de geração de energia e no retorno financeiro de sistemas solares, tanto em microgerações residenciais quanto em usinas de grande porte. Para isso, foi realizada uma avaliação detalhada da curva I-V de módulos limpos e sujos, além de cálculos sobre a energia gerada e o retorno financeiro em ambos os cenários. No estudo, foram comparados um sistema residencial de microgeração hipotético com 12 módulos e uma usina fotovoltaica de mini geração hipotética, composta por 6048 módulos. Os resultados mostraram que a sujeira pode reduzir a eficiência dos módulos em até 20%, gerando uma perda financeira significativa, especialmente em grandes usinas. A implementação de estratégias de manutenção, como limpeza periódica, uso de robôs de limpeza e drenagem eficiente de água, se mostra essencial para manter a eficiência dos sistemas e maximizar o retorno financeiro

Palavras-Chave: Usina-fotovoltaica, Sujeira, Curva I-V, Comissionamento, Manutenção

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the impact of accumulated dirt on photovoltaic modules in terms of energy generation efficiency and the financial return of solar systems, both in residential microgeneration and large-scale power plants. For this purpose, a detailed evaluation of the I-V curve for clean and dirty modules was carried out, along with calculations on the energy generated and the financial return in both scenarios. The study compared a hypothetical residential microgeneration system with 12 modules and a hypothetical mini-generation photovoltaic power plant composed of 6048 modules. The results showed that dirt can reduce module efficiency by up to 20%, leading to significant financial losses, especially in large plants. The implementation of maintenance strategies, such as periodic cleaning, the use of cleaning robots, and efficient water drainage, proves essential to maintain system efficiency and maximize financial returns

Keywords: Photovoltaic power plant, Dirt, I-V Curve, Commissioning, Maintenance

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
2.	EQUIPAMENTOS BÁSICOS DE UMA USINA FOTOVOLTAICA.....	21
2.1.	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	21
2.1.1.	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	22
2.1.2.	VIDRO.....	26
2.1.3.	MATERIAL ENCAPSULANTE	27
2.1.4.	<i>BACKSHEET</i>	28
2.1.5.	MOLDURA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	29
2.1.6.	CAIXA DE JUNÇÃO.....	30
2.2.	INVERSOR DE FREQUENCIA FOTOVOLTAICO.....	31
2.3.	TRANSFORMADOR.....	33
3.	COMISSIONAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	35
3.1.	REGIME DE ENSAIOS CATEGORIA 1.....	35
3.2.	REGIME DE ENSAIOS CATEGORIA 2.....	35
3.2.1.	ENSAIO DE CURVA IV	36
3.2.2.	INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	40
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.1.	LOCAL.....	43
4.2.	PRIMEIRA ETAPA: MEDIÇÃO COM O MÓDULO SUJO	44
4.3.	LIMPEZA DO MÓDULO.....	44
4.4.	SEGUNDA ETAPA: MEDIÇÃO COM O MÓDULO LIMPO.....	45
4.5.	COMPARAÇÃO E ANÁLISE.....	45
5.	RESULTADO.....	47
5.1.	ENSAIO COM MÓDULO SUJO	47
5.2.	ENSAIO COM MÓDULO LIMPO.....	50
5.3.	ANÁLISE RETORNO FINANCEIRO	52

5.3.1. RETORNO FINANCEIRO DE UM SISTEMA RESIDENCIAL DE MICROGERAÇÃO.....	53
5.3.2. RETORNO FINANCEIRO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE MINIGERAÇÃO.....	54
6. PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO.....	57
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO A – DATASHEET MÓDULO FOTOVOLTAICO	63
ANEXO B – DADOS IRRADIAÇÃO SOLAR MEDIA UBERABA - MG (CRESESB)	65
ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO TRAÇADOR DE CURVA IV	67
ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO SENSOR DE TEMPERATURA E IRRADIÂNCIA.....	69

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais fontes de energia renovável, oferecendo benefícios ambientais significativos e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

No início de 2023, a fonte solar fotovoltaica se tornou a segunda maior da matriz elétrica, com 39 gigawatts (GW) de potência operacional instalada, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). No entanto, a eficiência e a performance das usinas fotovoltaicas podem ser afetadas por diversos fatores, sendo a sujeira um dos mais relevantes e frequentemente negligenciados.

A sujeira acumulada sobre as superfícies dos painéis solares pode reduzir a quantidade de radiação solar que chega às células dos módulos fotovoltaicos, afetando diretamente a quantidade de energia gerada. Essa redução na performance de geração pode resultar em perdas econômicas significativas e comprometer a viabilidade e o retorno financeiro dos projetos fotovoltaicos.

Diante dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso que investiga os efeitos causados pela sujeira na performance de geração de uma usina fotovoltaica. Serão realizadas análises teóricas e práticas, utilizando dados obtidos por meio do ensaio de curva IV, conforme as normas NBR16274, NR10 e NBR5410, e correlacionando-as por meio de boas práticas de engenharia.

A metodologia adotada compreende a coleta de dados experimentais em uma usina fotovoltaica, a caracterização da sujeira presente nos painéis solares, a análise dos resultados obtidos nos ensaios de curva IV e a comparação com os parâmetros de projeto e de desempenho esperados para a usina em condições ideais. Além disso, serão consideradas as normas e regulamentações vigentes, a fim de garantir a segurança elétrica e a conformidade com os padrões estabelecidos.

A importância desse estudo reside na identificação dos impactos da sujeira no desempenho das usinas fotovoltaicas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias eficientes de limpeza e manutenção, bem como para a otimização do projeto e do desempenho desses sistemas. Dessa forma, busca-se contribuir para a maximização da geração de energia solar e para a promoção de um setor fotovoltaico mais sustentável e eficiente.

No decorrer deste trabalho, serão apresentados os fundamentos teóricos relacionados à tecnologia fotovoltaica, à sujeira como agente limitante e com os ensaios de curva IV.

Em seguida, serão descritos os procedimentos experimentais adotados, os resultados obtidos e as análises realizadas. Por fim, serão apresentadas as conclusões e recomendações para futuros estudos e aplicações práticas.

Espera-se que este estudo possa contribuir para o aprimoramento do conhecimento científico e tecnológico na área de energia solar fotovoltaica, bem como para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção e gestão de usinas, visando à otimização do aproveitamento da energia solar e à sustentabilidade do setor energético.

2. EQUIPAMENTOS BÁSICOS DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

Para que uma usina fotovoltaica entre em operação, são necessários equipamentos que desempenham papéis específicos e interdependentes, contribuindo para a captação, conversão e distribuição da energia solar de forma segura e confiável.

No decorrer deste tópico, serão explorados detalhadamente os equipamentos básicos de uma usina fotovoltaica, apresentando suas características, funcionalidades e interações.

2.1. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O módulo fotovoltaico é o equipamento responsável por captar a luz solar e gerar a energia através do efeito fotovoltaico que foi descoberto por Becquerel (Cientista francês) em 1839, ao observar que iluminando uma solução ácida, surgia uma diferença de potencial entre dois eletrodos presentes na solução.

Esses módulos são compostos por diversos elementos que desempenham funções específicas, sendo eles, as células fotovoltaicas, vidro, *backsheet* (filme traseiro), material encapsulante, *frame* (moldura) de alumínio e a caixa de junção, em conjunto esses componentes asseguram o funcionamento adequado dos painéis fotovoltaicos, garantindo a conversão eficiente da luz solar em eletricidade utilizável. Cada elemento desempenha um papel específico na proteção, isolamento, conexão elétrica e resistência mecânica do painel, contribuindo para a durabilidade e o desempenho do sistema fotovoltaico conforme descrito na figura 1.

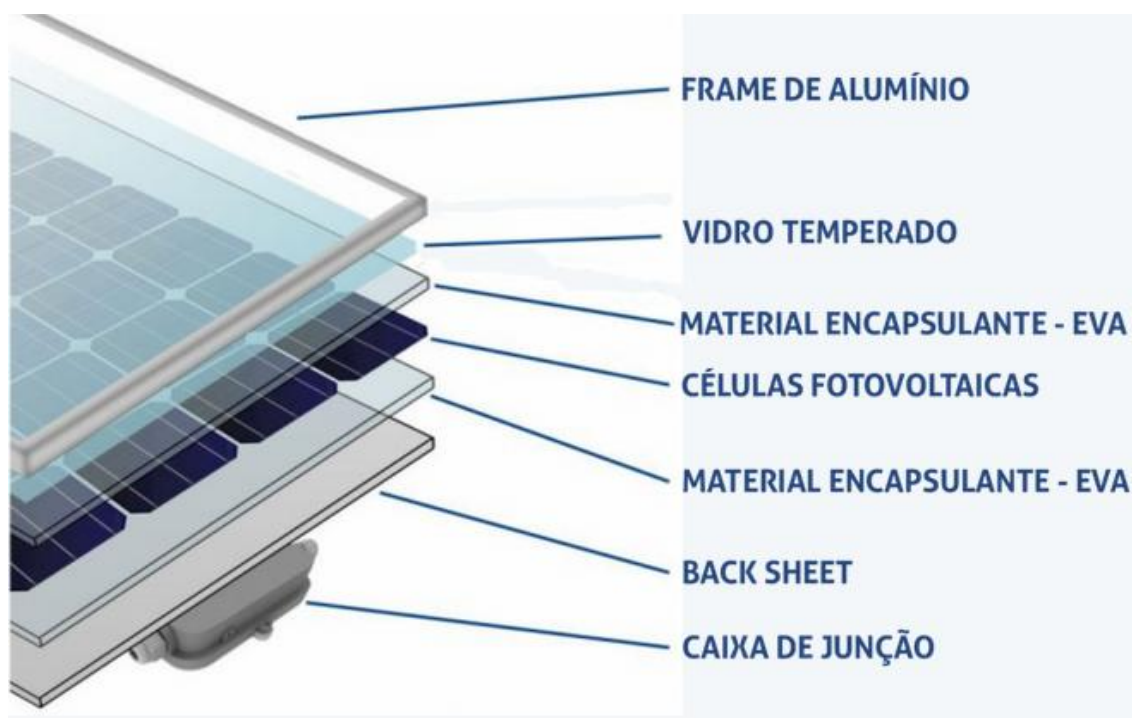


Figura 1 - Composição de um módulo fotovoltaico

Fonte : SHAREENERGY 2024

2.1.1. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica desempenha um papel central no funcionamento dos módulos fotovoltaicos, sendo responsável pela conversão da energia solar em eletricidade. Essa conversão ocorre por meio do fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico, um processo físico no qual a incidência da luz solar na célula gera a geração de uma corrente elétrica. A tensão e a corrente de um módulo dependem do número de células presentes e da forma como estão interconectadas. O número de células conectadas em série determina a tensão total do módulo, enquanto o número de células conectadas em paralelo determina a corrente total. Na figura 2 podemos observar um exemplo de célula fotovoltaica utilizada em um painel solar.



Figura 2 - Célula solar

Fonte: Do autor

O silício (Si) é o material mais comumente utilizado na fabricação das células fotovoltaicas devido às suas propriedades semicondutoras e à disponibilidade desse elemento na crosta terrestre.

A estrutura básica da célula fotovoltaica consiste em uma camada fina de silício dopado, ou seja, silício com pequenas quantidades de outros elementos, chamados de impurezas ou dopantes, que mudam drasticamente as propriedades elétricas do material, e que é dividida em duas regiões: a região p (positivamente dopada) e a região n (negativamente dopada). Essa estrutura é conhecida como junção p-n.

Devido à diferença de potencial entre as camadas p e n, surge um campo elétrico interno que propicia a separação e o movimento dos elétrons e das lacunas. Os elétrons migram da camada n para a camada p, enquanto as lacunas se deslocam em sentido oposto. Essa migração eletrônica resulta em uma diferença de potencial conhecida como tensão fotovoltaica, que pode ser medida quando a célula é deixada em circuito aberto.

Ao conectar uma carga externa aos terminais da célula fotovoltaica, a tensão fotovoltaica é aproveitada para impulsionar a circulação de elétrons e, conseqüentemente, a geração de uma corrente elétrica contínua. Essa corrente elétrica pode ser utilizada para alimentar dispositivos elétricos diretamente ou ser integrada a um sistema de energia elétrica.

Os fabricantes de módulos solares oferecem modelos com diferentes quantidades de células fotovoltaicas, sendo os mais comuns, atualmente, fabricados com 60, 66 e 72 células ou, no caso de módulos solares *Half-Cell*, com 120, 132 e 144 “meias células” que são organizadas em série e/ou paralelo de acordo com os parâmetros elétricos requeridos para a aplicação específica do módulo. Essa configuração em série ou paralelo das células é determinada com base em critérios como a tensão e a corrente necessárias para a aplicação em que o módulo será utilizado.

a) MODELAGEM MATEMÁTICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Segundo Lasnier e Ang (1990), ao considerar a célula fotovoltaica como um diodo cuja junção P-N é exposta à radiação solar, a corrente resultante que a célula pode fornecer para uma carga é determinada pela soma algébrica da corrente fotogerada (I_L) quando a junção da célula está iluminada e a corrente da célula com a junção no escuro (I_D).

$$I = I_L - I_D \quad (1)$$

Onde I é a corrente da célula fotovoltaica.

Uma abordagem comumente utilizada para determinar a corrente da célula no escuro é empregar a equação (2), que considera uma única exponencial. Essa formulação é mencionada por diversos autores, incluindo Kapica (1998), Singer, Rozenshtein e Surazi (1984) e Watkins e Burgess (1978). Essa equação é do tipo:

$$I_D = I_o * \left[\exp\left(\frac{eV}{m k T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Onde:

I_o = Corrente de saturação reversa (A)

e = Carga elétrica do elétron ($1,6022 * 10^{-16} \text{C}$)

V = Tensão nos terminais da célula (V)

m = Fator de idealidade do diodo

k = Constante de Boltzman ($1,3808 * 10^{-23} \text{J/K}$)

T = Temperatura da junção da célula ($^{\circ}\text{C}$)

Desta forma, temos que a corrente na célula fotovoltaica é dada pela equação (3) :

$$I = I_L - I_o * \left[\exp\left(\frac{eV}{m k T}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Ao considerarmos a foto corrente como sendo positiva, podemos observar que o primeiro quadrante dos eixos cartesianos na curva característica I-V da célula fotovoltaica

representa o seu funcionamento como gerador, onde tanto a tensão quanto a corrente são positivas conforme no exemplo da figura 4.

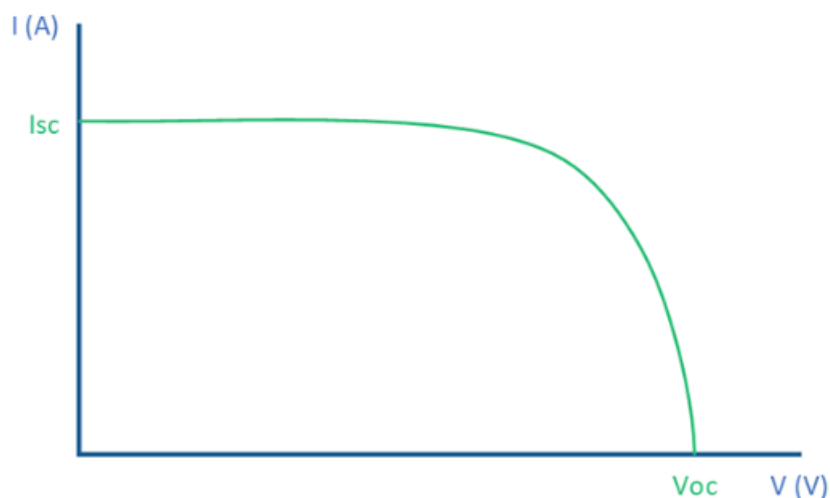


Figura 4 – Exemplo de curva característica IV

FONTE: CleverSD 2024

Nesse quadrante, à medida que a tensão aplicada à célula aumenta, a corrente gerada também aumenta proporcionalmente. Isso indica que a célula está convertendo a energia solar em eletricidade de forma eficiente, atuando como um gerador de corrente contínua.

b) CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica permite analisar seu comportamento elétrico, determinar a corrente e a tensão de operação em diferentes condições de iluminação e carga, e otimizar o sistema fotovoltaico para máxima eficiência de conversão de energia solar em eletricidade. Como em uma situação real, a corrente da célula apresenta perdas por fuga de corrente, é adicionado no circuito uma resistência em paralelo (R_p) com o diodo no circuito equivalente como apresentado na Figura 4.

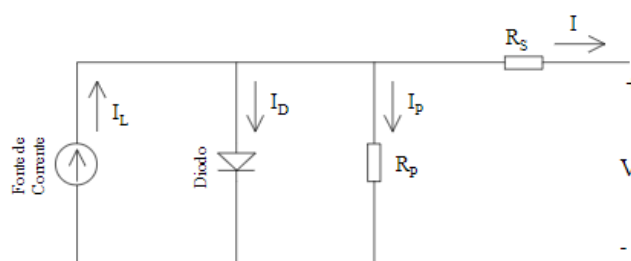


Figura 4 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica

Fonte: Manual de Engenharia 2024

Desta forma, analisando o circuito equivalente da célula, a equação da corrente elétrica para uma dada tensão de polarização, é definida pela equação 4:

$$I = I_L - I_o * \left[\exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (4)$$

2.1.2. VIDRO

A principal função do vidro é proteger as células fotovoltaicas presentes no módulo contra danos físicos, como impactos, poeira, umidade e outros elementos ambientais. Ele atua como uma barreira física, impedindo a entrada de substâncias indesejadas que poderiam afetar o desempenho e a vida útil do módulo. Na figura 5, podemos observar um módulo com o vidro danificado.



Figura 5 - Módulo com Vidro temperado trincado

Fonte : Do autor

Além disso, o vidro deve ser transparente para permitir a passagem eficiente da luz solar até as células fotovoltaicas. Ele precisa ter alta transmitância para o espectro de luz solar, o que significa que deve permitir a passagem da maior quantidade possível de radiação solar para que as células possam convertê-la em eletricidade.

O vidro utilizado nos módulos fotovoltaicos também é projetado para ter baixa refletância, o que significa que ele minimiza a quantidade de luz solar refletida de volta para o ambiente. Isso aumenta a eficiência da captação de luz pelas células fotovoltaicas.

Outra característica importante do vidro é sua resistência à intempéries, como raios UV, variações de temperatura e umidade. O vidro temperado é processado termicamente

para aumentar sua resistência e durabilidade, tornando-o mais adequado para aplicações em módulos fotovoltaicos expostos a condições ambientais adversas.

2.1.3. MATERIAL ENCAPSULANTE

O material encapsulante utilizado nos módulos fotovoltaicos tem função de proteger as células fotovoltaicas contra condições ambientais adversas, como umidade e impactos físicos. Além disso, ele melhora a eficiência da absorção de luz, garante a conexão elétrica adequada e proporciona estabilidade estrutural ao módulo. O material encapsulante atua como uma barreira física, um isolante elétrico e ajuda a minimizar perdas ópticas, contribuindo para o desempenho e a durabilidade dos módulos fotovoltaicos. A figura 6 mostra um exemplo de material encapsulante utilizado no módulo fotovoltaico



Figura - 6 Material encapsulante

FONTE: Portal Solar 2024

Existem diferentes tipos de materiais encapsulantes utilizados na indústria fotovoltaica, sendo o EVA (Etileno Acetato de Vinila) um dos mais comuns. O EVA é um polímero termoplástico transparente e flexível, amplamente utilizado devido às suas propriedades de isolamento elétrico, transparência à luz solar e aderência a outros materiais do módulo.

2.1.4. *BACKSHEET*

Backsheet é a camada traseira, é um componente essencial nos módulos fotovoltaicos, desempenhando diversas funções de suma importância. Ele consiste em uma camada de material plástico resistente e isolante eletricamente, posicionada na parte traseira do módulo conforme a figura 7.



Figura 7 - Traseira de módulos fotovoltaicos

FONTE: Do autor

Uma das principais funções do *backsheet* é fornecer um isolamento elétrico eficaz, evitando o contato direto das células fotovoltaicas com o ambiente externo. Essa camada atua como uma barreira de proteção, impedindo a entrada de umidade e evitando o risco de curtos-circuitos e danos elétricos.

Além disso, o *backsheet* desempenha um papel fundamental na preservação e durabilidade do módulo fotovoltaico. Ele protege as células fotovoltaicas contra os efeitos prejudiciais de condições ambientais adversas, como a exposição aos raios UV, variações de temperatura, umidade e corrosão. Essa proteção contribui para a manutenção da eficiência e do desempenho do módulo ao longo do tempo.

Outro aspecto relevante é a função estética do *backsheet*. Sendo visível na parte traseira do módulo, essa camada é projetada para ter uma aparência limpa e atrativa, contribuindo para a estética geral do sistema fotovoltaico.

2.1.5. MOLDURA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

A moldura do módulo fotovoltaico tem como objetivo fornecer suporte estrutural e proteção adicional para as células fotovoltaicas e outros componentes internos do módulo. A moldura é geralmente feita de alumínio, um material que oferece alta resistência mecânica, durabilidade e leveza. É fixada nas laterais dos módulos, como apresenta a figura 8.



Figura 8 - Moldura de um módulo fotovoltaico

FONTE: Do autor

Uma das principais funções da moldura de alumínio é garantir a integridade física do módulo, protegendo as células fotovoltaicas contra possíveis danos causados por impactos físicos, vibrações, ventos fortes e outras condições adversas. Além disso, a moldura ajuda a suportar o peso do módulo e a resistir às cargas mecânicas aplicadas durante o transporte, instalação e operação do sistema fotovoltaico.

A moldura também desempenha um papel importante na vedação e proteção dos componentes internos do módulo contra a entrada de umidade, poeira e outros agentes ambientais. Isso contribui para a preservação da vida útil do módulo e para a manutenção de seu desempenho ao longo do tempo.

Além de sua função prática, a moldura também tem um aspecto estético. Ela fornece um acabamento visual ao módulo, conferindo uma aparência mais profissional e harmoniosa ao sistema fotovoltaico.

2.1.6. CAIXA DE JUNÇÃO

Como mostra a figura 9 caixa de junção é uma unidade compacta, geralmente fabricada com materiais robustos e resistentes a condições ambientais adversas. Ela é projetada para abrigar os componentes internos necessários à sua operação, tais como diodos de proteção que evitam corrente reversa e terminais de conexão para os cabos condutores.



Figura 9 – Caixa de junção de um módulo fotovoltaico

FONTE: Do autor

A função primária da caixa de junção é proteger o módulo fotovoltaico contra o fluxo de corrente reversa, utilizando diodos de *by-pass* que impedem a circulação de corrente na direção oposta, evitando possíveis danos, superaquecimento e redução da eficiência energética. Esses diodos são particularmente relevantes quando células fotovoltaicas individuais estão sombreadas ou danificadas, evitando que a corrente flua através delas em sentido contrário.

Além disso, a caixa de junção também desempenha um papel fundamental na facilitação da conexão elétrica entre os cabos condutores dos painéis solares e o sistema de conversão de energia, geralmente composto pelo inversor fotovoltaico. Essa conexão permite que a energia elétrica gerada pelos painéis solares seja transferida de forma eficiente para o inversor, onde ocorre a conversão de corrente contínua para corrente alternada, tornando-a compatível com a rede elétrica.

2.2. INVERSOR DE FREQUENCIA FOTOVOLTAICO

Como mostra a figura 10, inversor fotovoltaico é um dispositivo eletrônico que está diretamente ligado à conversão da corrente contínua (CC), gerada pelos painéis solares, em corrente alternada (CA), que é compatível com a rede elétrica convencional. Essa conversão é necessária para permitir a utilização da energia solar para alimentar dispositivos elétricos residenciais, comerciais ou industriais ou para injetar o excesso de energia na rede elétrica.

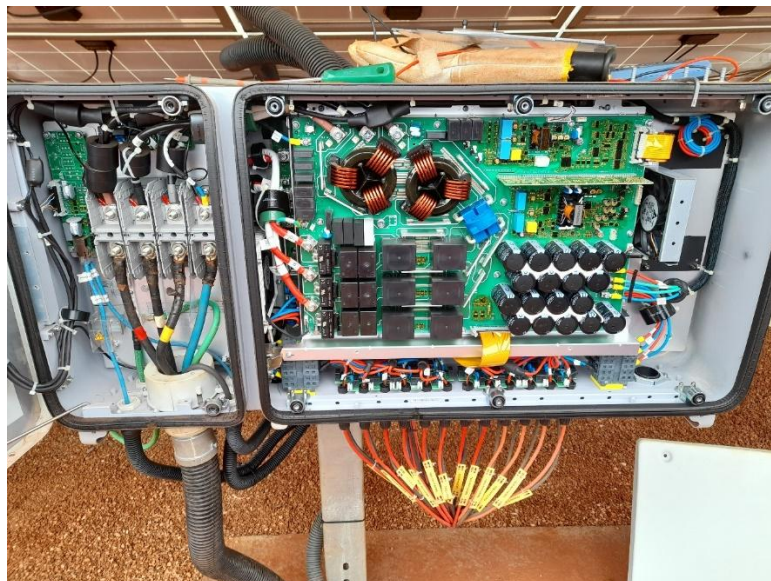


Figura 10 - Inversor fotovoltaico e seus elementos

FONTE : Do autor

O inversor fotovoltaico possui uma série de elementos e circuitos projetados para garantir um desempenho eficiente e confiável. Esses elementos incluem:

Retificador: O retificador é responsável por converter a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente contínua retificada. Esse processo visa otimizar a eficiência energética e minimizar as perdas durante a conversão.

Circuitos de Controle: Os circuitos de controle monitoram e regulam o funcionamento do inversor. Esses circuitos são responsáveis por detectar a tensão e a frequência da rede elétrica, sincronizar a corrente alternada produzida pelo inversor com a rede e implementar algoritmos de controle para otimizar o desempenho e a eficiência do sistema.

Circuitos de Chaveamento: Os circuitos de chaveamento são empregados para modular a corrente contínua retificada em uma forma de onda de corrente alternada senoidal. Utilizando dispositivos semicondutores, como transistores de potência

(geralmente do tipo *IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor*), esses circuitos alternam rapidamente a polaridade da corrente para gerar uma corrente alternada de alta qualidade.

Transformador de Saída: O transformador de saída tem a finalidade de ajustar a tensão da corrente alternada gerada pelo inversor para um nível adequado à rede elétrica. Além disso, proporciona isolamento galvânico entre o sistema fotovoltaico e a rede, oferecendo segurança e proteção contra surtos de tensão.

Sistema de Monitoramento e Proteção: O inversor é equipado com um sistema de monitoramento e proteção, composto por sensores e dispositivos de proteção. Esse sistema tem como objetivo detectar e responder a eventos indesejados, como sobretensão, sobrecorrente, curto-circuito ou falhas de conexão. Tais dispositivos são projetados para garantir a segurança operacional do sistema e evitar danos ao inversor ou outros componentes.

Ademais, é válido ressaltar que inversores modernos frequentemente incorporam recursos avançados, como o rastreamento máximo do ponto de potência (*MPPT - Maximum Power Point Tracking*). Esse recurso permite otimizar a eficiência do sistema ao ajustar a tensão e a corrente dos painéis solares para maximizar a geração de energia.

2.3. TRANSFORMADOR

O transformador é um componente utilizado em sistemas fotovoltaicos quando há a necessidade de ajustar a tensão da corrente alternada (CA) gerada pelos inversores para um nível adequado à rede elétrica ou para fornecer energia a cargas específicas. A figura 11 apresenta um exemplo de transformador utilizado em uma UFV.



Figura 11 - Transformador em uma usina de Mini-geração

FONTE: Do autor

É importante salientar que o transformador, quando necessário nos sistemas fotovoltaicos, está em geral conectado a um sistema inversor, e a especificação do transformador deve ser feita levando-se em consideração a possível circulação de componentes harmônicas que afetarão o desempenho desse equipamento.

A principal função do transformador em um sistema fotovoltaico é realizar a conversão da tensão. Isso é especialmente relevante quando a tensão produzida pelos inversores é diferente da tensão exigida pela rede elétrica ou pelos dispositivos que serão alimentados pela energia solar. O transformador permite elevar ou reduzir a tensão de saída do inversor para um nível adequado, garantindo a compatibilidade entre as fontes de energia e as cargas elétricas.

É importante ressaltar que nem todos os sistemas fotovoltaicos requerem a utilização de transformadores. Em pequenos sistemas conectados à rede (*on-grid*) de baixa tensão, por exemplo, é comum que os inversores já possuam transformadores integrados para fornecer a tensão adequada à rede elétrica. Em sistemas autônomos (*off-grid*), onde não há conexão com a rede, os transformadores podem ser usados para ajustar a tensão para as cargas específicas que serão alimentadas.

3. COMISSIONAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos *on-grid* possuem vida útil de vinte a trinta anos, entretanto para garantir a longevidade, é necessário que seja realizado o comissionamento, processo que deve validar o projeto, a implantação e os equipamentos utilizados estejam em conformidade com as normas, leis e boas práticas de engenharia.

A NBR 16274:2014, intitulada "Sistemas Fotovoltaicos - Processo de Comissionamento", define diretrizes e requisitos para o comissionamento de sistemas fotovoltaicos no Brasil. De acordo com a norma, os ensaios são divididos em categorias sendo adequados para a escala, o tipo, a localização e a complexidade do sistema.

3.1. REGIME DE ENSAIOS CATEGORIA 1

O conjunto de ensaios categoria 1 pode ser definido como a sequência mínima de ensaios que deve ser aplicado em todos os sistemas, independente de escala, tipo ou complexidade, eles devem ser conduzidos antes da energização do sistema. Esses ensaios são voltados para a verificação da segurança e da conformidade com as normas técnicas e os requisitos regulamentares.

Sendo eles :

- a) Continuidade dos condutores de aterramento de proteção em todos componentes da UFV;
- b) Ensaio de polaridade das séries fotovoltaicas;
- c) Ensaio das caixas de junção;
- d) Medição de tensão de circuito aberto das séries fotovoltaicas
- e) Medição da corrente de curto-circuito das séries fotovoltaicas
- f) Medição de resistência de isolamento em todos condutores CC e CA

3.2. REGIME DE ENSAIOS CATEGORIA 2

O regime de ensaios de Categoria 2 destina-se a sistemas de maior porte ou com maior complexidade, sendo realizado após a conclusão dos ensaios de Categoria 1, quando o sistema já está energizado e operando plenamente. Esses ensaios têm como foco principal a verificação do desempenho do sistema fotovoltaico.

Sendo eles :

- a) Ensaio de curva IV da(s) série(s) fotovoltaica(s);

b) Inspeção termográfica;

3.2.1. ENSAIO DE CURVA IV

A curva I-V (corrente-tensão) é uma representação gráfica que descreve a relação entre a corrente elétrica (I) e a tensão (V) em um dispositivo fotovoltaico, como uma célula ou módulo solar. Para traçar essa curva, utiliza-se um traçador de curva I-V, um equipamento especializado que mede a resposta elétrica do sistema sob diferentes condições de carga. Além disso, o traçador pode coletar dados de temperatura do módulo e irradiância, possibilitando ajustar os resultados para as Condições Padrão de Teste (*STC Standard Test Conditions*).

As *STC* são condições ideais usadas como referência para medir e comparar o desempenho dos módulos fotovoltaicos. Elas incluem:

- Irradiância solar de 1000 W/m^2 , que representa a intensidade da luz solar em um dia ensolarado com luz direta incidente sobre o módulo.
- Temperatura da célula fotovoltaica de 25°C , simulando condições de operação ideais e permitindo comparações precisas com outros módulos.

A curva I-V é fundamental para caracterizar o desempenho elétrico dos sistemas fotovoltaicos, pois permite identificar o comportamento do dispositivo em diferentes condições de iluminação e carga. Em condições de operação reais, a curva I-V revela parâmetros essenciais, como a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e o ponto de máxima potência (MPP), os quais são cruciais para otimizar a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade. A análise dessa curva possibilita a identificação de possíveis falhas, degradação ou ineficiências no sistema, sendo amplamente utilizada em ensaios de comissionamento, diagnóstico e manutenção de usinas solares. Ao ajustar esses parâmetros para *STC*, é possível comparar o desempenho real dos módulos com os valores de referência especificados pelos fabricantes, garantindo uma avaliação mais precisa e confiável do sistema.

A figura 12 mostra uma curva IV medida de uma *string* (conjunto de módulos ligados em série), acompanhada de uma curva de potência em função da tensão. O gráfico revela o comportamento elétrico típico de um módulo fotovoltaico, onde a corrente se mantém praticamente constante até atingir o ponto de máxima potência (P_{mpp}), indicada pelo ponto vermelho, e então cai abruptamente após esse ponto, à medida que a tensão se aproxima da tensão de circuito aberto (V_{oc}).

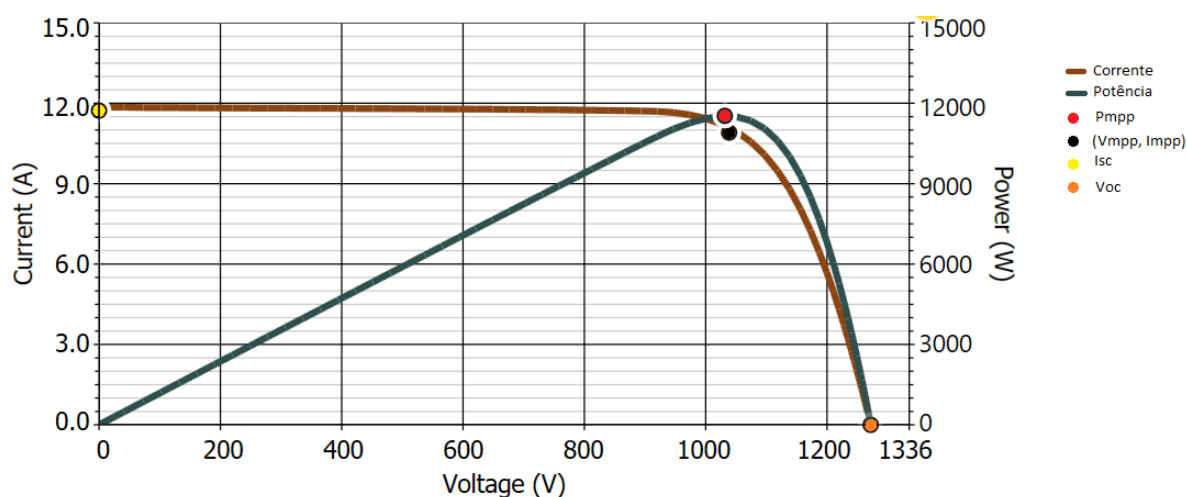


Figura 12 - Exemplo de curva IV de um conjunto de módulos

FONTE: Do autor

Os requisitos para a realização do ensaio de curva I-V são definidos por normas técnicas, tanto nacionais quanto internacionais, embora haja diferenças entre elas quanto aos limites mínimos de irradiância exigidos para a medição.

De acordo com a norma NBR 16274:2014, as medições devem ser realizadas com uma irradiância mínima de 700 W/m² no plano dos módulos, considerando a inclinação destes, que não deve ultrapassar 22,5°.

a) CORRENTE DE CURTO CIRCUITO (I_{sc})

A corrente de curto-circuito, representada pela sigla I_{sc} (do inglês *short-circuit current*), é a maior corrente elétrica que um dispositivo fotovoltaico pode gerar quando seus terminais estão em curto-circuito, ou seja, quando a resistência entre eles é praticamente zero. No contexto de um módulo ou célula fotovoltaica, I_{sc} ocorre quando há máxima incidência de luz solar sobre a célula, mas sem uma carga conectada para consumir a energia gerada. Esse valor é de extrema importância, pois indica a capacidade máxima de geração de corrente do dispositivo sob condições ideais de irradiância e temperatura.

b) TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO (V_{oc})

A tensão de circuito aberto, representada pela sigla V_{oc} (do inglês *open-circuit voltage*), é a maior tensão elétrica que um dispositivo fotovoltaico pode produzir quando não há corrente fluindo pelo circuito, ou seja, quando o circuito está aberto. Esse valor é

medido nos terminais do módulo ou célula fotovoltaica quando eles não estão conectados a nenhuma carga ou dispositivo de consumo. A V_{oc} é um parâmetro crucial para avaliar o desempenho do dispositivo fotovoltaico, pois ela indica a máxima diferença de potencial que pode ser gerada em condições ideais de iluminação e temperatura. A medição da V_{oc} é uma etapa essencial nos ensaios de comissionamento e manutenção de sistemas fotovoltaicos, permitindo a análise da integridade do módulo e a detecção de possíveis falhas, como desconexões ou degradação do material

c) PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA (MPP)

O ponto de máxima potência (MPP , do inglês *Maximum Power Point*) é o ponto da curva I-V onde o módulo fotovoltaico opera com a maior eficiência, gerando a máxima quantidade de energia elétrica possível sob determinadas condições de irradiância e temperatura. Nesse ponto, a combinação de corrente (I) e tensão (V) resulta no maior valor de potência elétrica (P), que é o produto da tensão pela corrente. Os valores associados a esse ponto são chamados de V_{mp} (tensão de máxima potência) e I_{mp} (corrente de máxima potência), que são estimados a partir da corrente de curto-circuito (I_{sc}) e da tensão de circuito aberto (V_{oc}). Esses parâmetros são essenciais para calcular a máxima transferência de potência, conforme a equação adaptada de (Goetzberger; Hoffmann, 2005).

$$V_{mp} \approx (0,75 - 0,90) \times V_{oc} \quad (5)$$

$$I_{mp} \approx (0,85 - 0,95) \times I_{sc} \quad (6)$$

Onde:

V_{mp} : Tensão de máxima potência;

V_{oc} : Tensão de circuito aberto;

I_{mp} : Corrente de máxima potência;

I_{sc} : Corrente de curto-circuito.

O MPP é um parâmetro essencial em sistemas fotovoltaicos, pois determina o ponto ótimo de operação do módulo para maximizar a conversão de energia solar em eletricidade. Ele é encontrado ao traçar a curva I-V e, matematicamente, é calculado pela equação:

$$P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad (7)$$

Onde:

P_{max} : É a potência máxima gerada pelo módulo;

V_{mpp} : É a tensão no ponto de máxima potência;

I_{mpp} : É a corrente no ponto de máxima potência.

Equipamentos como o traçador de curva I-V são utilizados para identificar esse ponto automaticamente, fornecendo dados que permitem o ajuste fino do sistema para operar sempre próximo ao MPP. Além disso, muitos inversores fotovoltaicos modernos possuem um recurso chamado rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), que ajusta continuamente a operação do sistema para manter o módulo no MPP, garantindo o máximo de eficiência em diferentes condições de operação.

d) DIAGNOSTICO DA CURVA IV

A curva I-V é obtida a partir de medições realizadas em diferentes condições de carga, variando a tensão do circuito aberto (V_{oc}) até o curto-circuito (I_{sc}). A curva traçada oferece uma visão clara de como o módulo opera em diversas condições de radiação solar e temperatura.

O comportamento da curva I-V pode variar de acordo com as condições ambientais e com a saúde do módulo fotovoltaico. Em módulos novos e operando sob condições ideais, a curva apresenta uma forma suave, sem distorções significativas. No entanto, em módulos degradados ou com falhas, podem ser observadas anomalias, como as apresentadas na figura 13.

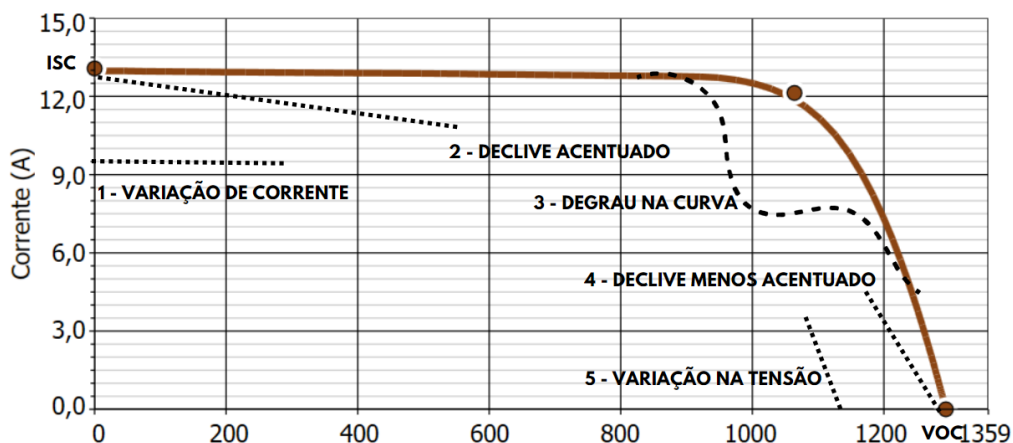


Figura 13 - Anomalias na Curva IV

FONTE: Do autor

1. Variação de Corrente: A corrente pode apresentar flutuações devido a fatores como sombreamento parcial ou diferenças nos módulos, resultando em uma redução ou aumento inesperado na corrente da série fotovoltaica.

2. Declive Mais Acentuado: Uma inclinação maior na curva sugere uma resistência interna aumentada, podendo ser causada por problemas nos módulos ou conexões, que dificultam o fluxo eficiente da corrente.
3. Degraus na Curva: A presença de degraus pode indicar módulos ou células com comportamento diferente dos demais, possivelmente devido a degradação, defeitos ou sombreamento parcial.
4. Declive Menos Acentuado: Um declive mais suave pode ser observado em sistemas com boa condição elétrica e baixa resistência de contato, indicando um fluxo de corrente mais constante.
5. Variação de Tensão: Alterações na tensão de circuito aberto (V_{oc}) podem resultar de conexões soltas ou danos nos módulos, afetando a consistência do valor da tensão ao longo do sistema.

A norma NBR 16274:2014 especifica os principais desvios que podem ser causados na curva I-V, permitindo a identificação de problemas.

3.2.2. INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

A termografia é uma técnica não destrutiva amplamente utilizada no comissionamento de usinas fotovoltaicas para identificar falhas ocultas e pontos de superaquecimento nos módulos solares. Através do uso de uma câmera termográfica, a técnica permite visualizar e medir a radiação infravermelha emitida pelos módulos, transformando essas informações em um termograma. O termograma revela diferenças de temperatura nas superfícies dos módulos, ajudando a detectar defeitos que poderiam comprometer o desempenho do sistema, como conexões soltas, falhas nas células solares, delaminação, ou até mesmo possíveis pontos de incêndio.

Durante o comissionamento, a termografia auxilia na identificação de anomalias térmicas causadas por defeitos de fabricação ou instalação, permitindo que os reparos sejam realizados antes que o sistema entre em operação plena. Além disso, a termografia pode detectar problemas de eficiência, como sombreamento parcial, sujeira acumulada ou degradação das células fotovoltaicas. A grande vantagem dessa técnica é que ela pode ser realizada com o sistema em pleno funcionamento, sem a necessidade de interrupção.

A termografia é especialmente útil em grandes usinas, onde a inspeção visual ou outros métodos de verificação seriam demorados ou ineficientes. A técnica é combinada com outros ensaios, como a medição da curva I-V, garantindo uma avaliação completa

da usina fotovoltaica, e contribuindo para a manutenção preditiva ao longo da vida útil do sistema.

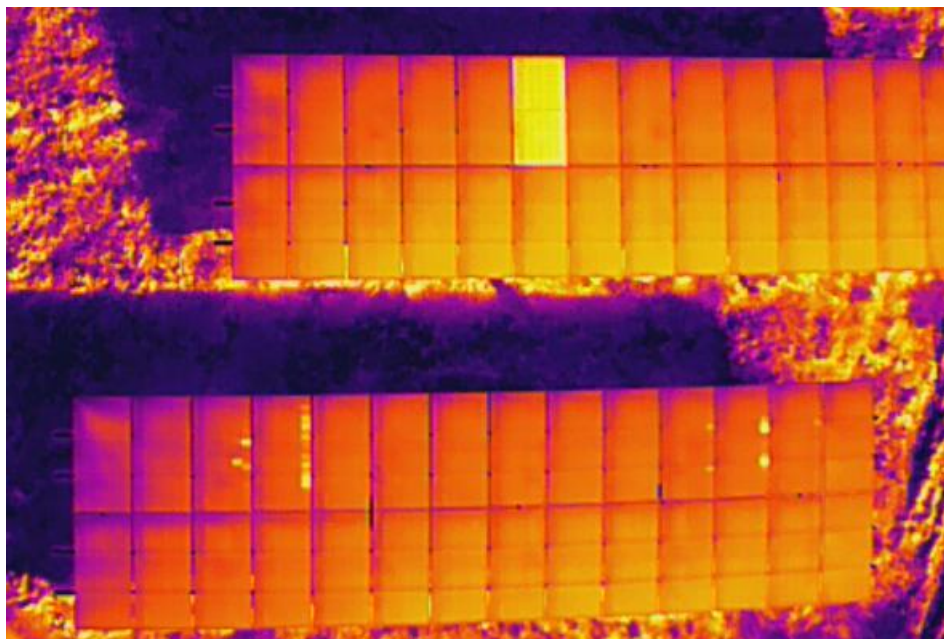


Figura 14 – Módulos com avaria identificados através da termografia
FONTE: Do autor

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para quantificar o impacto da sujeira no módulo fotovoltaico, foi realizado um ensaio prático em duas etapas principais: a medição da curva I-V com o módulo sujo e, posteriormente, a mesma medição após a limpeza do módulo, com intervalo de 30 minutos entre os ensaios.

4.1. LOCAL

Os ensaios foram realizados na mesma UFV na cidade de Uberaba - MG. A usina é composta 6048 módulos fotovoltaicos, incluindo modelos BYD 335P6K-36-5B de 335 Wp e BYD360M6K-36-5B de 360 Wp, sendo um ambiente adequado para a realização dos testes de curva I-V devido às condições reais de operação e ao histórico de monitoramento já estabelecido. A UFV está localizada próxima a uma fábrica que libera alta quantidade de sujeira sob os módulos fotovoltaicos, comprometendo a eficiência dos mesmos.



Figura 15 – Usina Fotovoltaica Atlas

FONTE: Do autor

Para o ensaio em questão, foi escolhido um módulo BYD 335P6K-36-SERIE-5BB em condições de alta sujidade.

4.2. PRIMEIRA ETAPA: MEDIÇÃO COM O MÓDULO SUJO

Inicialmente, foi realizada a medição da curva I-V do módulo em condições normais de operação, sem qualquer tipo de intervenção ou limpeza, indicado na figura 16. A sujeira presente no módulo, acumulada por um período típico de operação, foi mantida para simular as condições reais em que muitos sistemas fotovoltaicos operam diariamente. A curva I-V foi traçada utilizando o TRAÇADOR de curva I-V, com medições corrigidas para as Condições Padrão de Teste (*STC*).



Figura 16 – Medição com módulo sujo

Fonte: Do autor

4.3. LIMPEZA DO MÓDULO

Após a coleta de dados com o módulo sujo, foi realizada uma limpeza cuidadosa da superfície do módulo, utilizando água e materiais adequados para evitar qualquer tipo de dano físico, visando garantir que a sujeira fosse completamente removida.

4.4. SEGUNDA ETAPA: MEDIÇÃO COM O MÓDULO LIMPO

Após a limpeza, conforme a figura 17, foi aguardado um período de 1 hora para garantir a estabilização das condições ambientais e permitir que o módulo atingisse o equilíbrio térmico. Em seguida, foi realizado um novo ensaio de curva I-V, repetindo o mesmo procedimento da primeira etapa, e correção dos resultados para *STC*.



Figura 17 – Medição com módulo limpo

Fonte : Do autor

4.5. COMPARAÇÃO E ANÁLISE

Os dados obtidos nas duas etapas foram comparados para quantificar as perdas de eficiência causadas pela sujeira no módulo. A análise foi realizada com base nos principais parâmetros da curva I-V, como corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), ponto de máxima potência (MPP), entre outros, obtidos através do software PV Analyzer,. A partir dessa comparação, foi possível calcular as perdas de desempenho e identificar o impacto direto da sujeira na capacidade de geração de energia do módulo fotovoltaico, além do impacto financeiro em grande escala.

5. RESULTADO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise da curva I-V para um módulo fotovoltaico, considerando duas condições distintas: com o módulo sujo e após a limpeza. A comparação entre as curvas I-V medidas em ambas as situações permite quantificar o impacto da sujeira acumulada sobre o desempenho do sistema, em termos de eficiência de conversão de energia.

Os dados obtidos permitem identificar as diferenças no comportamento do módulo e estimar as perdas energéticas causadas pela sujeira, fornecendo informações essenciais para a definição de estratégias de manutenção e limpeza que otimizem a produção de energia em usinas fotovoltaicas.

5.1. ENSAIO COM MÓDULO SUJO

Podemos observar nas figuras 18 e 19, a curva -IV e os parâmetros obtidos com a medição com o módulo sujo.

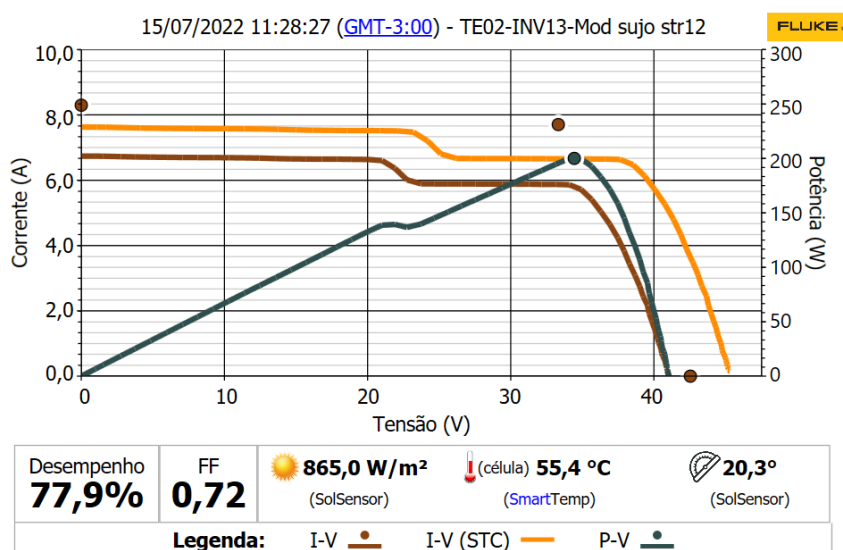


Figura 18 – Forma da curva com módulo sujo.

Fonte : Do autor

	Medido	Previsto	Med. convertida par STC
Desempenho (%)	77,9	---	---
Fat. de Preench	0,72	0,72	0,75
P _{máx} (W)	200,0	256,7	262,42
Irr (W/m ²)	865,0 (SolSensor)	---	1000
I _{sc} (A)	6,74	8,30	7,63
Temp. da Cell(°C)	55,4 (SmartTemp)	---	25
V _{oc} (V)	41,05	42,55	45,33
I _{mp} (A)	5,81	7,70	6,72
V _{mp} (V)	34,44	33,32	39,08
Inclinação	20,3 (SolSensor)	---	---
Rel. de Ten.	0,86	0,92	0,88
Rel. de Volt.	0,83	0,78	0,86

Figura 19 – Parâmetros medidos com módulo sujo

Fonte: Do autor

A análise desta curva I-V e P-V, obtida para um módulo fotovoltaico sujo, revela várias informações importantes sobre o desempenho do sistema sob essas condições:

O desempenho medido do módulo é de 77,9%, o que indica uma perda significativa em relação ao valor previsto para um módulo limpo. Essa redução pode ser atribuída à sujeira acumulada, que impacta diretamente a eficiência do módulo. Quando ajustado para STC, o desempenho previsto estaria próximo dos 100%, com um valor convertido de 262,42 W de potência máxima (P_{máx}).

O valor medido da corrente de curto-circuito (*I_{sc}*) é 6,74 A, bem abaixo do valor previsto para o módulo limpo (8,30 A), o que indica uma queda na capacidade de geração de corrente. Quando ajustado para STC, o valor convertido é 7,63 A, mostrando que, mesmo nas condições padrão, o módulo está operando com uma eficiência reduzida devido à sujeira. As deformações na curva I-V, especialmente na parte inicial da curva (região de *I_{sc}*), mostram uma perda na eficiência de coleta de luz.

A tensão de circuito aberto (*V_{oc}*) medida é 41,05 V, ligeiramente inferior ao valor previsto (42,55 V) e ao ajustado para STC (45,33 V). Embora a *V_{oc}* não seja tão impactada quanto a *I_{sc}*, a queda ainda é notável e pode estar relacionada à sujeira ou à degradação térmica das células, como evidenciado pela alta temperatura do módulo.

A corrente no ponto de máxima potência (*I_{mp}*) medida é 5,81 A, que está abaixo do valor previsto de 7,70 A e ajustada para STC (6,72 A). A tensão no ponto de máxima potência (*V_{mp}*) medida é 34,44 V, próxima do valor previsto de 33,32 V, mas abaixo do valor ajustado de 39,08 V. Isso indica que a sujeira está reduzindo significativamente a

corrente que o módulo pode gerar no ponto de máxima potência, causando uma perda de eficiência geral

O ponto de máxima potência (*MPP*) ocorre em torno de 6 A de corrente e 30 V de tensão, resultando em uma potência máxima de aproximadamente 180 W. Este valor está bem abaixo do que seria esperado para um módulo fotovoltaico operando em condições ideais (ou seja, sem sujeira), indicando uma redução na capacidade de geração de energia.

O Fator de Forma (FF) medido é 0,72, que está de acordo com o valor previsto, mas um pouco inferior ao valor ajustado para *STC* (0,75). O fator de preenchimento indica a qualidade da curva I-V, e uma leve redução nesse valor sugere que há deformações na curva, possivelmente causadas pela sujeira ou por diferenças de temperatura. Um FF menor do que o esperado pode indicar que a curva não está se comportando de maneira ideal, mostrando perdas na capacidade de maximização da potência.

A inclinação da curva e as relações de tensão e corrente também mostram discrepâncias entre os valores medidos e os previstos. A relação de tensão medida é 0,86 comparada com 0,92 prevista e 0,88 ajustada para *STC*, o que mostra que há uma deformação na curva em termos de tensão. Da mesma forma, a relação de corrente medida de 0,83 está abaixo dos valores previstos e ajustados, sugerindo que o módulo não está operando com a máxima eficiência em termos de geração de corrente

As deformações na curva I-V, como a queda no ponto de I_{sc} e a redução da corrente no *MPP* (I_{mp}), indicam que a sujeira acumulada no módulo está causando uma obstrução à radiação solar, reduzindo a corrente gerada. Além disso, a forma da curva perto do "joelho" (ponto de máxima potência) é mais inclinada do que deveria ser em um módulo limpo, sugerindo perdas na eficiência de conversão de energia.

Essas deformações são esperadas em um módulo sujo, e os dados ajustados para *STC* mostram que, em condições ideais, o módulo deveria operar com uma eficiência muito maior.

A partir dos dados da Figura 19 é possível observar que a sujeira pode reduzir em 20% a capacidade da usina de forma global, que é uma quantidade apreciável quando se considera a capacidade total da instalação. O que comprova a necessidade de limpeza dos módulos com uma determinada frequência, com intervalos obtidos a partir da observação “in loco” do padrão de acúmulo da sujeira.

5.2. ENSAIO COM MÓDULO LIMPO

Observa-se os parâmetros obtidos através da medição da curva IV com os módulos limpos nas figuras 20 e 21

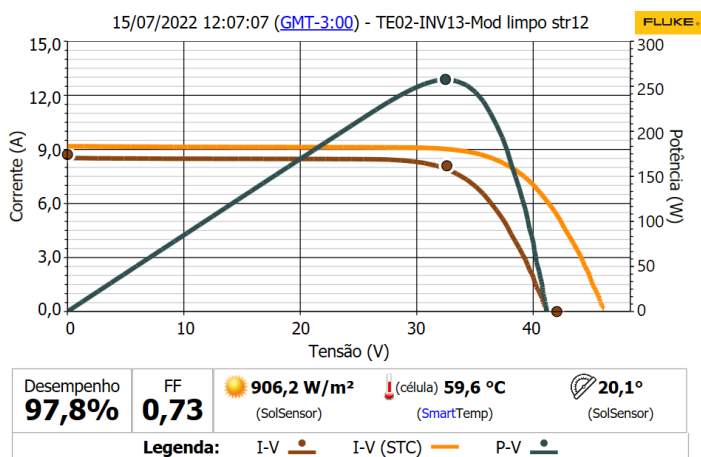


Figura 20 – Ensaio com módulo limpo

Fonte: Do autor

	Medido	Previsto	Med. convertida par STC
Desempenho (%)	97,8	---	---
Fat. de Prench	0,73	0,72	0,77
P _{máx} (W)	257,6	263,5	328,56
Irr (W/m²)	906,2 (SolSensor)	---	1000
I _{sc} (A)	8,51	8,72	9,17
Temp. da Cell(°C)	59,6 (SmartTemp)	---	25
V _{oc} (V)	41,18	42,03	46,12
I _{mp} (A)	7,94	8,09	8,76
V _{mp} (V)	32,46	32,58	37,52
Inclinação	20,1 (SolSensor)	---	---
Rel. de Ten.	0,93	0,92	0,95
Rel. de. Volt.	0,78	0,77	0,81

Figura 21 - Parâmetros medidos com o módulo limpo

Fonte: Do autor

A análise da curva I-V e dos dados apresentados para o módulo fotovoltaico limpo revela melhorias significativas no desempenho do módulo em comparação com os resultados obtidos com o módulo sujo. A seguir, está a análise detalhada dos principais parâmetros:

O desempenho medido com o módulo limpo é de 97,8%, uma melhora considerável em relação aos 77,9% observados com o módulo sujo. Isso indica que, após a limpeza, o módulo está operando quase no seu potencial máximo, próximo dos valores esperados para condições ideais.

A corrente de curto-circuito (I_{sc}) medida foi de 8,51 A, o que representa uma melhora substancial em relação aos 6,74 A da corrente do módulo sujo. O valor ajustado para STC é de 9,17 A, o que indica que a limpeza restaurou a capacidade do módulo de gerar corrente de maneira mais eficiente, uma vez que a sujeira reduzia a quantidade de luz captada.

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) medida foi de 41,18 V, muito próxima do valor esperado de 42,03 V. Esse valor é similar ao obtido com o módulo sujo, mas o aumento na corrente (I_{sc}) demonstra que o módulo limpo é mais eficiente na conversão da radiação solar em eletricidade

A corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}) medida foi de 7,94 A, um valor bem próximo do previsto de 8,09 A, mostrando uma clara melhora em relação aos 5,81 A do módulo sujo. A tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}) foi de 32,46 V, próxima ao valor previsto de 32,58 V.

Esses valores mostram que, após a limpeza, o módulo recuperou grande parte de sua eficiência e está operando próximo de sua capacidade ideal

O ponto de máxima potência (MPP) do módulo limpo ocorre em torno de 7,94 A de corrente e 32,46 V de tensão, resultando em uma potência máxima de aproximadamente 257,6 W. Esse valor está muito próximo do valor esperado para o módulo em condições ideais, que seria 263,5 W, conforme os dados previstos. A pequena diferença pode ser atribuída à temperatura da célula, que estava a 59,6°C no momento do ensaio, acima da temperatura padrão de 25°C nas condições STC . Mesmo assim, o desempenho do módulo limpo está significativamente melhor que o observado no módulo sujo, confirmando a importância da manutenção para garantir a máxima eficiência de geração de energia

O fator de preenchimento (FF) medido foi de 0,73, um pequeno aumento em relação ao FF de 0,72 do módulo sujo. O valor ajustado para STC é 0,77, mostrando que o módulo está operando com uma eficiência otimizada e a curva está mais próxima de sua forma ideal, com menos deformações.

A inclinação da curva foi ajustada e a relação de tensão medida foi de 0,93, comparada com 0,86 do módulo sujo, indicando que a curva está mais próxima de sua forma ideal, sem as deformações vistas anteriormente.

A relação de corrente medida também melhorou para 0,78, contra 0,83 do módulo sujo. Isso reflete a recuperação na capacidade do módulo de operar com uma corrente mais eficiente.

Comparada com a curva obtida para o módulo sujo, a curva I-V do módulo limpo apresenta uma forma muito mais suave, sem quedas abruptas na corrente ou deformações significativas. O ponto de máxima potência (*MPP*) é claramente identificado, com o módulo gerando a maior quantidade de energia possível sob as condições de irradiância e temperatura.

A curva está mais próxima da curva ideal prevista para as condições *STC*, com o joelho da curva (ponto de transição entre corrente constante e queda de tensão) mais acentuado, o que indica que o módulo está operando eficientemente.

5.3. ANÁLISE RETORNO FINANCEIRO

A sujeira acumulada nos módulos pode bloquear a radiação solar incidente nas células fotovoltaicas, comprometendo significativamente a conversão de energia solar em eletricidade e, conseqüentemente, o retorno financeiro do investimento. Este impacto é relevante tanto para pequenos sistemas de microgeração residencial quanto para grandes usinas de geração centralizada, como a usina Atlas.

Neste estudo, foi realizada uma análise comparativa entre dois cenários: o primeiro considera os módulos operando em condições limpas, com eficiência de 98%, enquanto o segundo reflete o impacto da sujeira, com a eficiência reduzida para 78%. Serão avaliados dois casos distintos: um sistema residencial de microgeração hipotético com 12 módulos e uma UFV hipotética como a UFV Atlas, composta por 6048 módulos. Não serão consideradas bandeiras tarifárias e será considerado a tarifa definida pela ANEEL para a cidade de Uberaba – MG no mês de outubro de 2024.

A análise visa quantificar a perda de energia gerada e o conseqüente impacto no retorno financeiro em ambos os cenários. Com isso, busca-se evidenciar a importância da manutenção preventiva e da limpeza regular dos módulos para maximizar a eficiência dos sistemas e garantir a rentabilidade dos investimentos em energia solar, em qualquer escala de operação.

Para o cálculo da energia gerada é utiliza-se:

$$\text{Energia Gerada (kWh)}: \text{Potência do módulo (kW)} \times \text{Irradiação solar média (kWh/m}^2\text{.di)} \times \text{Eficiência do sistema} \times \text{Eficiência do módulo} \quad (8)$$

Retorno financeiro (R\$):

$$\text{Energia Gerada} \times \text{Preço do kWh} \quad (9)$$

Dados:

Marca e Modelo do módulo: BYD 335P6K-36-5B

Potência do módulo: 335Wp

Irradiação solar diária média: 5,15 kWh/m²/dia (CRESESB)

Eficiência do sistema: 0,75% ou 0,75

Eficiência do módulo:

Limpo: 98% ou 0,98

Sujo: 78% ou 0,78

Preço do kWh (CEMIG): R\$ 1,05

Número de dias no ano: 365 dias

5.3.1. RETORNO FINANCEIRO DE UM SISTEMA RESIDENCIAL DE MICROGERAÇÃO

Considerando um sistema residencial de microgeração (até 75kW) com 12 módulos iguais aos ensaiados anteriormente sob as mesmas condições de ensaio.

a) RETORNO FINANCEIRO ANUAL COM MÓDULOS SUJOS

Energia gerada aproximada:

$$12 \text{ (Módulos)} \times 0,335 \text{ (kWh)} \times 5,15 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ di a}} \right) \times 0,78 \times 0,75 \times 365 \text{ (di a)}$$

Energia gerada aproximada:

$$4420,61 \text{ kWh/ano}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$4420,61 \text{ (kWh/ano)} \times 1,05 \text{ (R\$)}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$\text{R\$}4641,64$$

b) RETORNO FINANCEIRO ANUAL COM MÓDULOS LIMPOS

c)

Energia gerada aproximada:

$$12 \text{ (Módulos)} \times 0,335 \text{ (kWh)} \times 5,15 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ di a}} \right) \times 0,98 \times 0,75 \times 365 \text{ (di a)}$$

Energia gerada aproximada:

$$5554,1 \text{ kWh/ano}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$5554,1 \text{ (kWh/ano)} \times 1,05 \text{ (R\$)}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$\text{R\$ } 5831,80$$

d) DIFERENÇA NO RETORNO

Perda financeira anual devido à sujeira:

$$\text{R\$}5831,80 - \text{R\$}4641,64 = \text{R\$}1190,16$$

Ou seja, há uma **perda de R\$1190,16 anualmente** no retorno financeiro devido à sujeira no sistema residencial.

5.3.2. RETORNO FINANCEIRO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE MINIGERAÇÃO

Considerando um sistema industrial de mini-geração (Entre 75kW e 3MW) como o da UFV Atlas com 6048 módulos.

a) RETORNO FINANCEIRO ANUAL COM MÓDULOS SUJOS

Energia gerada aproximada:

$$6048 \text{ (Módulos)} \times 0,335 \text{ (kWh)} \times 5,15 \left(\frac{\text{kWh}}{\frac{\text{m}^2}{\text{di a}}} \right) \times 0,78 \times 0,75 \times 365 \text{ (di a)}$$

Energia gerada aproximada:

$$2.227.986,47 \text{ kWh/ano}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$2.227.986,47 \text{ (kWh/ano)} \times 1,05 \text{ (R\$)}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$\text{R\$}2.339.385,79$$

b) RETORNO FINANCEIRO ANUAL COM MÓDULOS LIMPOS

Energia gerada aproximada:

$$6048 \text{ (Módulos)} \times 0,335 \text{ (kWh)} \times 5,15 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ di a}} \right) \times 0,98 \times 0,98 \times 365 \text{ (di a)}$$

Energia gerada aproximada:

$$2.799.265,05 \text{ kWh/ano}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$2.799.265,05 \text{ (kWh/ano)} \times 1,05 \text{ (R\$)}$$

Retorno financeiro aproximado:

$$\text{R\$}2.939.228,30$$

c) DIFERENÇA NO RETORNO

Perda financeira anual devido à sujeira:

$$\text{R\$}2.799.265,05 - \text{R\$}2.339.385,79 = \text{R\$}399.879,26$$

Ou seja, há uma **perda de R\$339.879,26 anualmente** no retorno financeiro devido à sujeira no sistema residencial.

6. PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO

Este capítulo tem como objetivo sugerir uma linha de pesquisa futura relacionada à integração de sistemas híbridos com armazenamento de energia (*BESS – Battery Energy Storage System*) na rede elétrica. Com o aumento da geração distribuída, o uso de *BESS* oferece uma série de benefícios que podem melhorar significativamente a integração das fontes de energia renovável à rede elétrica, ao mesmo tempo que otimizam a gestão da energia gerada e consumida.

Os sistemas *BESS* permitem que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos seja armazenada em baterias para uso posterior. Isso é especialmente vantajoso em períodos onde há baixa geração de energia (durante a noite ou em dias nublados) ou quando a demanda de energia da rede é alta. Além disso, o *BESS* pode desempenhar um papel importante na estabilização da rede elétrica, oferecendo suporte à frequência, regulação de tensão e até mesmo minimizando problemas como picos de demanda e intermitência da geração solar.

Um estudo futuro poderia focar na análise do impacto econômico e técnico da integração de sistemas híbridos com *BESS* na rede elétrica, com destaque para:

Avaliação de Custos e Benefícios: Comparar os custos de implementação e manutenção de sistemas híbridos com *BESS* em relação aos benefícios financeiros e operacionais, incluindo economia em picos de demanda e redução de custos com tarifas energéticas.

Estabilidade e Flexibilidade da Rede: Investigar como o uso de *BESS* integrado a sistemas fotovoltaicos pode ajudar a mitigar os problemas de intermitência e melhorar a estabilidade da rede elétrica, especialmente em áreas com alta penetração de geração distribuída.

Modelagem e Simulação: Simular cenários onde a geração solar é combinada com *BESS* em diferentes perfis de consumo e locais, a fim de identificar os impactos na operação da rede elétrica e o potencial de expansão desses sistemas.

Impacto Ambiental: Além dos benefícios econômicos e técnicos, o estudo pode considerar o impacto ambiental de sistemas híbridos com *BESS*, incluindo a redução do uso de fontes de energia fósseis e a diminuição da pegada de carbono.

A análise dos impactos de sistemas híbridos fotovoltaicos com *BESS* será crucial para definir estratégias que aumentem a eficiência energética e a sustentabilidade da geração

distribuída, além de contribuir para uma maior integração de energias renováveis na matriz energética, sem sobrecarregar a infraestrutura existente da rede elétrica.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o impacto da sujeira na eficiência de sistemas fotovoltaicos, tanto em microgerações residenciais quanto em usinas de grande porte, como a Usina Atlas. A partir dos dados coletados e das análises realizadas, ficou evidente que a sujeira acumulada nos módulos fotovoltaicos reduz significativamente a geração de energia e, consequentemente, o retorno financeiro do sistema. Essa redução foi constatada tanto nos sistemas de menor escala, como o residencial com 12 módulos, quanto na usina com 6048 módulos.

A diferença no retorno financeiro, causada pela perda de eficiência em função da sujeira, mostrou que a falta de manutenção regular pode acarretar uma perda de até 20% na receita anual. Esse impacto pode ser particularmente elevado em usinas de grande porte, onde a magnitude das perdas financeiras é considerável. Portanto, é imprescindível que sejam adotadas práticas de manutenção preventiva e corretiva para garantir o desempenho máximo dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Para mitigar os efeitos da sujeira e preservar a eficiência dos módulos, é recomendada a implementação de um plano de manutenção estruturado, que contemple ações periódicas de limpeza dos módulos. Entre as estratégias que podem ser adotadas, destacam-se:

É fundamental definir um cronograma de limpeza e inspeção regular dos módulos, especialmente em regiões com alta concentração de poeira ou poluentes no ar. Esse plano deve considerar a sazonalidade e as condições climáticas, de modo a ajustar a frequência de manutenção conforme a necessidade.

Em grandes usinas, a utilização de robôs autônomos de limpeza tem se mostrado uma solução eficiente e de baixo custo operacional a longo prazo. Esses dispositivos realizam a limpeza dos módulos de forma automática, sem a necessidade de desligamento do sistema, o que otimiza o processo e evita perdas durante o período de manutenção.

Esses dispositivos ajudam a evitar o acúmulo de sujeira nos módulos, facilitando o escoamento de água da chuva e minimizando a formação de camadas de poeira e resíduos. Essa solução é especialmente eficaz em regiões com precipitações irregulares, onde a sujeira tende a se acumular mais facilmente.

A utilização de drones equipados com câmeras termográficas pode facilitar a identificação de pontos quentes e sujeiras acumuladas nos módulos, permitindo uma ação

mais direcionada nas áreas que realmente necessitam de intervenção, otimizando o uso dos recursos de manutenção.

Manter o sistema fotovoltaico limpo é essencial para garantir o retorno do investimento e a eficiência energética ao longo de toda a vida útil dos módulos. A adoção dessas estratégias pode não apenas evitar perdas financeiras significativas, mas também prolongar a durabilidade dos equipamentos, contribuindo para a sustentabilidade do sistema e a consolidação da energia solar como uma solução viável e competitiva no Brasil.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o investimento em manutenção e limpeza é indispensável para assegurar a performance ideal dos sistemas fotovoltaicos e maximizar os benefícios econômicos e ambientais associados à energia solar.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Edição Revisada e Atualizada, CEPTEL – CRESEB, Rio de Janeiro, Março de 2014.

MORAIS, F. A. L. *Modelação e análise dos diodos de bypass em sistemas fotovoltaicos sob condições de sombreamento parcial*. Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Portugal, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16274-2014 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho*. Rio de Janeiro, 2014.

ARAÚJO, D. N.; CARVALHO, P. C. M. *Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos*. Revista de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2019.

ABSOLAR. *Energia solar é a 2ª maior fonte energética do país: como ter em casa?* Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-e-a-2a-maior-fonte-energetica-do-pais-como-ter-em-casa/>. Acesso em: 16 out. 2024.

SHAREENERGY. *Destrinchando placa solar fotovoltaica*. Disponível em: <https://www.shareenergy.com.br/destrinchando-placa-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 16 out. 2024.

PORTAL SOLAR. *Passo a passo da fabricação do painel solar*. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 16 out. 2024.

LASNIER, F.; ANG, T. Y. *Power electronics: Photovoltaic applications*. Proceedings of the IEEE, 78(8), 1282-1301, 1990.

PORTAL SOLAR. *Célula fotovoltaica*. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acesso em: 16 out. 2024.

KAPICA, R. *Semiconductor device fundamentals*. Prentice Hall, 1998.

SINGER, S.; ROZENSHTAIN, Y.; SURAZI, Z. *Characterization of silicon solar cells by double diode model*. Journal of Applied Physics, 56(4), 1164-1172, 1984.

WATKINS, S. P.; BURGESS, E. L. *High-efficiency silicon solar cells*. Journal of Applied Physics, 49(3), 1587-1590, 1978.

HECKTHEUER, L. A. *Análise de associações de módulos fotovoltaicos*. 2019.

URBANETZ, I. V. *Diagnóstico de falhas em módulos fotovoltaicos*. 2019.

RIBEIRO, G. de A. *Estudo de Aplicação de Termografia para Manutenção Preventiva de Módulos Fotovoltaicos*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2023.

CRESESB. *Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB)*. Disponível em: <https://cresebs.cepel.br>. Acesso em: 16 out. 2024.

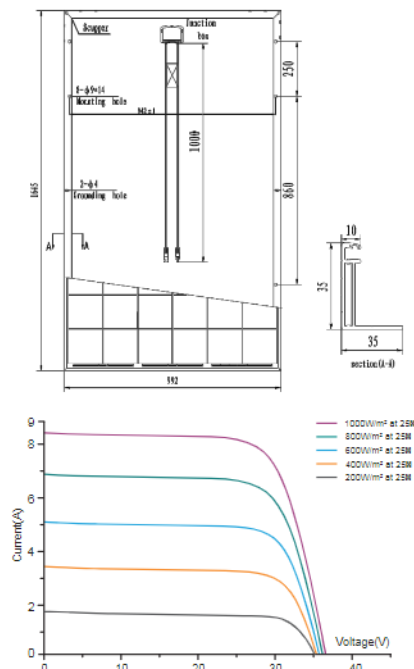
TEIXEIRA, W. M. *Comissionamento de uma usina fotovoltaica de 2.026,08 kWp/1.584 kW*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2023.

ANEXO A – DATASHEET MÓDULO FOTOVOLTAICO

P6C-36-SERIES-4BB

310-340W

156.75P



Ficha técnica

Célula	Células solares de silício policristalino
Número de células	72 (6 * 12) unidades
Dimensão de módulos	1962 mm * 992 mm * 35 mm / 77.24 inch * 39.06 inch * 1.38 inch
Peso	22.1 kg / 48.62 lbs
Vidro frontal	Vidro de 3,2 mm temperado c/ revestimento de AR
Estrutura	Liga de alumínio anodizado
Caixa de junção	IP67
Conector	IP67
Diodos bypass	3 unidades
tipo de conector	Mc4 ou MC4-compatível
Área de seção do cabo	4 mm² / 0.0062 Sq in
Comprimento do cabo	2 * 1200 mm / 2 * 47.2 inch

Coeficientes de temperatura

temperatura nominal de funcionamento da célula (NOCT)	45°C ± 2°C
Coefficiente de temperatura de corrente de curto-circuito	0.07%/°C
Coefficiente de temperatura de voltagem de circuito aberto	-0.31%/°C
Coefficiente de temperatura de potência de pico	-0.39%/°C

Informações do produto

Contêiner	40' HC
Módulos / Paleta	30
Paleta / Contêiner	22
Módulos / Contêiner	660

STC

Item	Módulo	BYD 310P6C-36	BYD 315P6C-36	BYD 320P6C-36	BYD 325P6C-36	BYD 330P6C-36	BYD 335P6C-36	BYD 340P6C-36
Voltagem de circuito aberto (Voc)		45.79V	46.09V	46.39 V	46.69 V	46.98 V	47.28 V	47.58 V
Voltagem máxima de operação (Vmp)		36.38 V	36.58 V	36.78 V	36.98 V	37.16 V	37.35 V	37.53 V
Corrente de curto-circuito (Isc)		8.99A	9.07A	9.15A	9.23 A	9.31 A	9.39 A	9.47 A
Corrente máxima de operação (Imp)		8.52A	8.61A	8.70 A	8.79 A	8.88 A	8.97 A	9.06 A
Potência máxima em STC (Pmax)		310 Wp	315 Wp	320 Wp	325 Wp	330 Wp	335 Wp	340 Wp
Eficiência do módulo		15.6 %	16.2 %	16.4 %	16.7%	17.0%	17.2%	17.5%
Temperatura de funcionamento		-40°C~85°C						
Corrente nominal máxima do fusível		15A						
Voltagem máxima do sistema		1000 VDC						
Tolerância da potência		0~5W						
Classes de aplicação		Class A						

STC: IRRADIÂNCIA 1000W/m², Temperatura do módulo 25 °C, AM=1.5 Ave. redução de eficiência de 4.5% por 200W/m²

NOCT

Item	Módulo	BYD 310P6C-36	BYD 315P6C-36	BYD 320P6C-36	BYD 325P6C-36	BYD 330P6C-36	BYD 335P6C-36	BYD 340P6C-36
Voltagem de circuito aberto (Voc)		42.20 V	42.50 V	42.80 V	43.10 V	43.40 V	43.70 V	43.90 V
Voltagem máxima de funcionamento (Vmp)		33.80 V	34.00 V	34.30 V	34.50 V	34.80 V	35.10 V	35.30 V
Corrente de curto-circuito (Isc)		7.29 A	7.36 A	7.42 A	7.49 A	7.54 A	7.60 A	7.66 A
Corrente máxima de funcionamento (Imp)		6.77 A	6.83 A	6.90 A	6.96 A	7.01 A	7.08 A	7.14 A
Potência máxima em NOCT (Pmax)		228.80 Wp	232.60 Wp	236.4 Wp	240.4 Wp	244.2 Wp	248.1 Wp	251.9 Wp

NOCT: temperatura de funcionamento do módulo de circuito-aberto em 800W/m² irradiância, temperatura ambiente 20°C, velocidade do vento 1m/s.



BYD ENERGY DO BRASIL Av. Antônio Buscato, 230 / Terminal Intermodal de Cargas, Campinas

Build Your Dreams



+55-19-3514 2550



vendas@byd.com



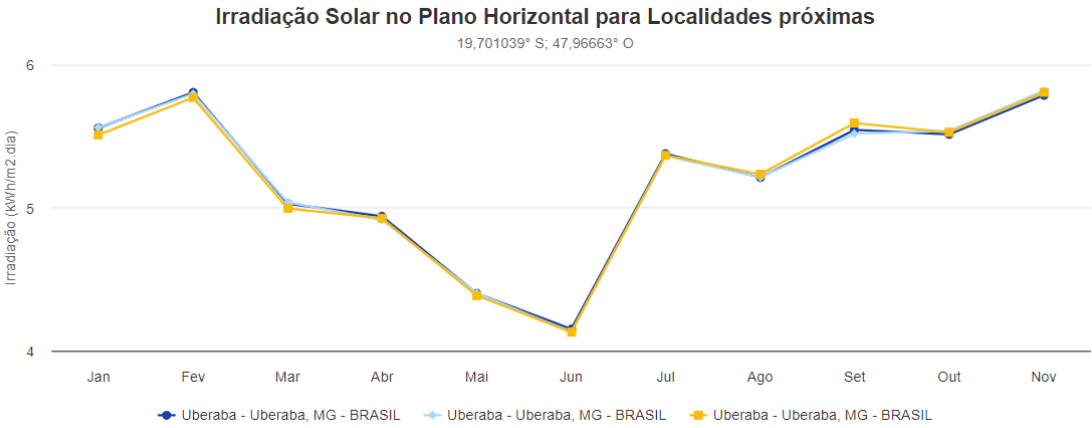
www.byd.com/br

Versão 2.0.2017

ANEXO B – DADOS IRRADIAÇÃO SOLAR MEDIA UBERABA - MG
(CRESESB)

Latitude: 19,701039° S
Longitude: 47,96663° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]																
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Uberaba	Uberaba	MG	BRASIL	19,701° S	47,949° O	1,8	5,56	5,81	5,03	4,94	4,40	4,15	4,45	5,38	5,21	5,55	5,51	5,79	5,15	1,65
✓	Uberaba	Uberaba	MG	BRASIL	19,701° S	48,049° O	8,6	5,56	5,80	5,04	4,92	4,40	4,13	4,42	5,36	5,21	5,52	5,54	5,82	5,14	1,69
✓	Uberaba	Uberaba	MG	BRASIL	19,801° S	47,949° O	11,3	5,51	5,77	5,00	4,93	4,39	4,13	4,42	5,37	5,24	5,59	5,53	5,81	5,14	1,68



ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO TRAÇADOR DE CURVA IV



117 Morris Street
Sebastopol, CA, 95472
(707) 823-4600
www.solmetric.com

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate #: 7252018-032422 Options: None
Manufacturer: Solmetric Description: PV Performance Analyzer I-V Unit
Model #: PVA-1500V4
Serial #: 7252018

As Received Condition:	New Production
As Shipped Condition:	At completion of calibration, measured values were IN SPECIFICATION at the points tested
Remarks or Special Requirements:	None
Technician Name:	Alex Bollock
Issue Date:	3/24/2022
Calibration Valid Through: 3/23/2025	

Calibration

Recommended Calibration Frequency: Once every 2-3 years

Calibration Uncertainties: Our calibration procedures are designed to provide a measurement uncertainty of less than one standard deviation at the points tested, where possible

Traceability: All standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST)

Procedure: TP 600-011, Hi-Pot

Calibration Equipment Used

- DMM: Agilent 34410A
- Solmetric high voltage and current PV test station (TDK Lambda PHV2F600 HV DC Supply, Rigol DM3058 Digital Multimeter, with custom discrete components)

Verification**Verification Equipment Used:**

- Fuke 87 V DMM
- Sharp NT-175UC1 reference module
- HiPot Tester: Compliance West HT 10000P
- Verification performed in conjunction with the paired wireless PV reference sensor (SolSensor)

Verification Results:

	DUT	Reference	Deviation	Spec	Test Limit	Pass/Fail
Open Circuit Voltage (V)	41.11	41.14	-0.03	+/-0.5% +/-0.25V	+/-0.38% +/-0.19V	Pass
Short Circuit Current (A)	5.40	5.37	0.03	+/-0.5% +/-0.04A	+/-0.38% +/-0.03A	Pass
Performance Factor (%)	98.2	100.0	-1.80%	+/-2%	+/-2%	Pass

Approved:

Nuvit Salz

Nuvit Salz, Production Manager

ANEXOD – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO SENSOR DE TEMPERATURA E IRRADIÂNCIA



117 Morris Street
Sebastopol, CA, 95472
(707) 823-4600
www.solmetric.com

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate #: 5151081-032422 Options: None
Manufacturer: Solmetric Description: Wireless PV Reference Sensor
Model #: SolSensor-300
Serial #: 5151081

As Received Condition:	New Production
As Shipped Condition:	At completion of calibration, measured values were IN SPECIFICATION at the points tested
Remarks or Special Requirements:	None
Technician Name:	Alex Bollock
Issue Date:	3/24/2022 Calibration Valid Through: 3/23/2025

Calibration

Recommended Calibration Frequency: Once every 2-3 years

Calibration Uncertainties: Our calibration procedures are designed to provide a measurement uncertainty of less than one standard deviation at the points tested, where possible

Traceability: All standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST)

Calibration Equipment Used

- DMM – Fluke Model 79
- Reference Sensors – Two of following custom silicon diode reference sensors: SN75953, SN75954, SN75955, SN8213
- Calibration fixtures: Tilt, Angular Response

Verification

Verification Equipment Used:

- Fluke 52 II Thermometer
- Craftsman 320.48295 Digital Torpedo Level
- Newport 91150V-C reference cell

Verification Results:

	DUT	Reference	Deviation	Spec	Test Limit	Pass/Fail
Tilt (°)	22.4	22.3	0.1	± 2°	± 1.5°	Pass
Temperature (°C) T1	53.9	54.4	-0.5	± 2°C	± 1.5°C	Pass
Temperature (°C) T2	40.3	39.3	1.0	± 2°C	± 1.5°C	Pass
Irradiance with 0° AOI (W/m2)	1044.0	1057.5	-1.28%	± 2%	± 1.5%	Pass

Approved:

Nuvit Salz

Nuvit Salz, Production Manager