Usinas fotovoltaicas - Influência da Temperatura na Eficiência dos Módulos Fotovoltaicos

Talita H. Lopes M. de Andrade, [1]Cláudio de Souza Bastos[2], Edvan Junio da Silva[3].

tataandradejesus@gmail.com, claudiodebastos@yahoo.com.br, edvansilva.0422@aluno.unibh.br

Professora orientadora: Silvana Diniz

Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH Campus Estoril

Resumo

Este artigo descreve o funcionamento da energia solar fotovoltaica, através do efeito fotovoltaico, e seus principais componentes, que apesar de ter como sua principal fonte energética o sol, não são as radiações que geram energia e sim a irradiação solar, porque as radiações se dissipam em forma de calor, já a irradiação solar é a capacidade de absorção da luz do sol, que através do efeito fotovoltaico transformam os fótons solares em corrente elétrica. Esse trabalho aborda a importância do uso da termografia que é uma ferramenta para o monitoramento do sistema, as principais vantagens e desvantagens de ter uma usina solar fotovoltaica. Pretende-se também, demonstrar como a temperatura influencia diretamente na potência e logo na eficiência dos equipamentos que compõem o sistema, e os resultados dos ensaios de curvas I-V realizados através de simulações feitas de maneira prática pelo *software* de simulação fotovoltaico PVsyst.

Palavras-chave: Kit solar fotovoltaico. Variação da temperatura. Potência de geração. Ensaios de curva I-V realizados pelo *Software* PVsyst.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2023), a matriz elétrica Brasileira obteve um aumento significativo da participação das fontes renováveis na oferta interna de energia elétrica em 2022 comparado com o ano 2021, De acordo com o estudo apresentado pelo Canal Solar, o índice de renovabilidade da matriz energética atingiu a marca de 47,4% (contra 14,4% no mundo) e de 87,9% no caso da matriz elétrica em 2022 (CANAL SOLAR, 2023).

Nos últimos anos, as usinas solares fotovoltaicas têm se destacado como uma excelente fonte de energia renovável. A energia solar registrou um aumento expressivo de 82,4%, no ano

de 2022 comparado com 2021, das fontes renováveis intermitentes de energia, por meio da geração distribuída (BEN, 2023).

A energia fotovoltaica utiliza os fótons solares para gerar eletricidade de forma sustentável, com menor custo e impacto ambiental reduzido. Pode-se afirmar que esse processo de geração de energia é renovável e sustentável por não produzir ruídos ou poluição ambiental. Além disso, o tempo requerido para a instalação de uma usina fotovoltaica, comparado com outros tipos de usinas é reduzido, como também a sua manutenção (VIAN, ÂNGELO, 2021).

No entanto, é importante destacar que o uso das placas solares em usinas fotovoltaicas está sujeito a riscos devido à exposição das mesmas às radiações solares. Uma elevada temperatura pode causar falhas, perdas e defeitos nas placas, afetando a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Para evitar esses problemas é essencial realizar ensaios de termografia regulares e manter as manutenções conforme indicado no projeto.

O ano de 2023, tem registrado recordes de temperatura ambiente, e é provável que seja o ano mais quente dos últimos tempos. Essas altas temperaturas podem ter sido impulsionadas pelas emissões de carbono na atmosfera e pelo evento climático El Niño (BBC News, 2023).

Tendo em vista o exposto, esse aumento de temperatura ambiente se por um lado, aumenta o índice da radiação solar, por outro, causa uma maior elevação de temperatura nas placas fotovoltaicas afetando a eficiência dos módulos fotovoltaicos com um todo. Sendo assim, torna-se importante a avaliação desses sistemas fotovoltaicos considerando esse aumento de temperatura ambiente.

Com base nessas observações, o objetivo principal deste artigo é analisar a influência da temperatura ambiente na eficiência dos módulos fotovoltaicos. Para atingir esse objetivo é realizado uma comparação entre os valores das potências geradas por um sistema fotovoltaico conectado à rede, submetido a diferentes temperaturas do ambiente. Para isso, foi dimensionado um sistema fotovoltaico específico e que por meio dos seus dados foram realizadas simulações, utilizando o software PVsyst. O software PVsyst é um simulador de sistemas fotovoltaicos, que considera a temperatura dos módulos para previsão da geração de energia dos mesmos. A partir dos resultados obtidos das simulações é realizado uma análise desses resultados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Usinas Solares Fotovoltaicas e seu Funcionamento

As usinas solares fotovoltaicas são instalações que convertem a energia solar em eletricidade por meio de painéis solares. A geração de eletricidade por meio da radiação solar é

a energia emitida pelo sol, que pode se propagar em todas as direções no espaço por meio de ondas eletromagnéticas, chegando à terra. Essas radiações podem ser diretas, difusas e refletidas.

A conversão da energia solar em energia elétrica ocorre através do efeito fotovoltaico, causado pela excitação dos elétrons presentes no silício existentes nos módulos que mediante exposição da luz solar se excitam e deslocam gerando energia elétrica. A célula fotovoltaica é a principal componente responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. Os módulos fotovoltaicos são constituídos de várias células em série elevando assim a sua potência elétrica.

É por isso que um sistema fotovoltaico tem como protagonistas os painéis solares, porém eles não são, entretanto, as únicas partes de um "kit solar". Como a eletricidade produzida pelos painéis é de corrente contínua (CC), é necessário também a instalação de um inversor de tensão que converterá essa corrente contínua em corrente alternada (CA), que é a filosofia adotada no sistema da rede de distribuição dos sistemas de energia elétrica.

Esses sistemas são muito sensíveis, e por isso é importante verificar se o local está apropriado para a instalação, e se não há algo que possa interferir na captação da radiação solar como nuvens, construções próximas, caixas d'água, antenas e tudo aquilo que possa estar causando um sombreamento nos módulos, as sombras nos módulos respondem como um resistor que dissipa a potência gerada em forma de calor e ao longo prazo danifica o material semicondutor, e o módulo (Abreu Hebert, 2022).

Os sistemas solares fotovoltaicos podem ter diferentes tipos, sendo eles sistema On-Grid que é um sistema conectado à rede elétrica, onde a energia produzida é direcionada a rede ou consumida, caso haja alguma interrupção na concessionária esse sistema desliga automaticamente. O sistema Off-Grid é um sistema isolado da rede elétrica, esse sistema armazena a energia gerada em baterias, essa energia armazenada pode ser consumida posteriormente. E por fim, o sistema híbrido, que é um sistema solar que combina ao mesmo tempo, a geração On-Grid com a Off-Grid, pois ele pode conectar-se à rede elétrica, pode consumir no momento em que está gerando ou abastecer as baterias, para um uso posterior dessa energia.

2.2 Os principais componentes de uma usina fotovoltaica

Os principais componentes para o funcionamento das usinas fotovoltaicas podem ser divididos em diferentes partes: Os painéis Solares são dispositivos compostos por células fotovoltaicas que captam a luz solar e a transformam em eletricidade, gerando uma Corrente

Contínua (CC), esses painéis solares utilizam de estruturas de suporte físico que são responsáveis por posicionar os painéis de acordo com o ângulo de inclinação voltado para o Norte, de acordo com cada localização geográfica, permitindo que eles capturem a radiação solar de forma mais eficiente.

Os inversores e controladores de carga: São os dispositivos responsáveis por converter a Corrente Contínua (CC) gerada pelos painéis solares em Corrente Alternada (CA), energia esta que é utilizada na maioria das instalações elétricas brasileiras, grande parte dos inversores possuem um sistema de monitoramento virtual responsável por controlar o desempenho da geração solar fotovoltaica rastreia a produção de eletricidade e detecta possíveis problemas.

Sistemas de armazenamento: Baterias, apenas nos sistemas Off-Grid. No Sistema On-grid a própria concessionária pode ser interpretada como fonte de armazenamento de créditos.

String Box, Caixa de Junção ou proteção: A string box ou caixa de junção conecta os módulos aos inversores e protege contra o surto permitindo o desligamento da usina. Nela pode ter: Fusíveis CC, chave seccionadora, disjuntores CC e DPS CC (HCC ENERGIA SOLAR, 2021). Cabe salientar que alguns inversores já possuem String Box acopladas a eles.

Quadro de circuitos de Corrente Alternada (CA): É necessário ter um quadro elétrico, após o inversor para a proteção dos componentes de CA, nele terá um disjuntor CA que também servirá como interruptor facilitando a manutenção do sistema de aterramento e das fases (Abreu Hebert, 2022). A Figura 1 apresenta esses principais componentes do sistema solar fotovoltaico.

Figura 1 - Equipamentos que compõe o sistema solar fotovoltaico.

Fonte: Elétrica e CIA, 2018.

2.3 Ângulo de Inclinação e Azimute

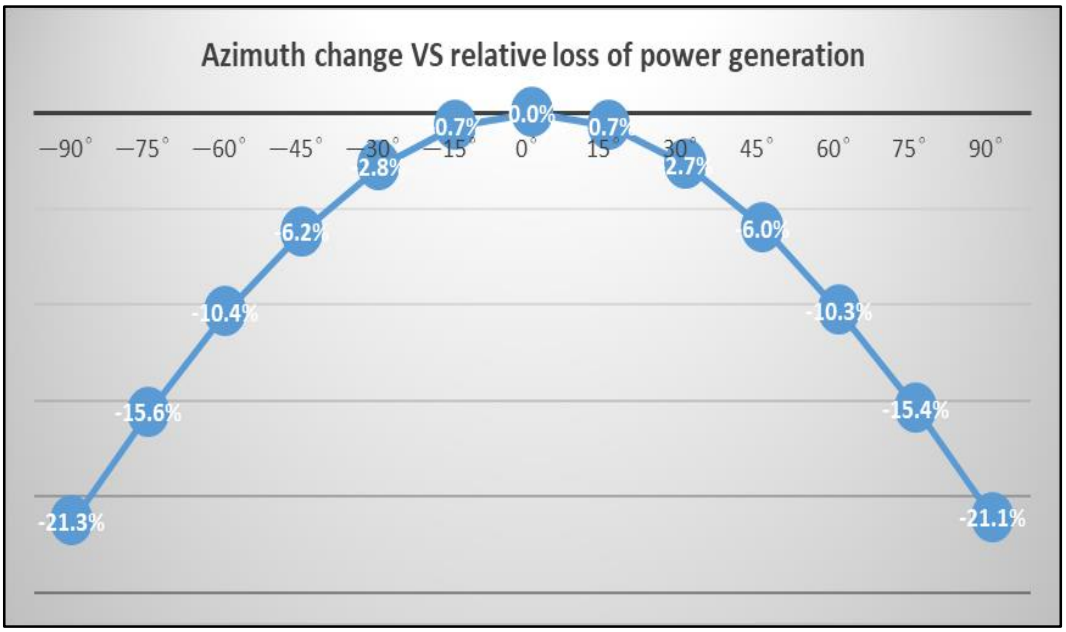
O desempenho das usinas depende diretamente do ângulo de inclinação e do ângulo de Azimute.

O ângulo de inclinação é o ângulo entre o plano do painel fotovoltaico (FV) e o solo horizontal, e espera- se que este ângulo seja o ângulo de inclinação limiar da falange quando a geração de energia for maior em um ano. O ângulo de inclinação limiar está relacionado à Latitude geográfica local. Quando a latitude é maior, o ângulo de inclinação correspondente também é maior. O ângulo de Azimute é o ângulo entre o plano vertical do painel FV e a direção sul (90° no leste e -90° no oeste) (Solis Time, 2022, Pg.215).

O fato é que na medida que o ângulo de azimute muda, a geração de energia também muda e com isso pode alterar também nas perdas e no rendimento energético de todo o sistema. O azimute estando em 90° ou instalado verticalmente no solo o melhor ângulo de inclinação varia de cada determinada localização geográfica é de voltada para o norte, na medida que esse ângulo de inclinação é alterado o de azimute também altera, logo altera toda a geração do sistema.

A Figura 2, mostra a influência do azimute e da inclinação representada pelas suas perdas, quando a direção de instalação do painel FV não for para o sul, mas tiver um certo ângulo com o sul (muda de -90°~90°; leste é 90°, oeste é -90°), a perda relativa de geração de energia mudada será como apresentada na Figura 2.

Figura 2 - A influência do azimute e da inclinação.



Fonte: Azimute vs Perdas relativas da geração de energia do sistema FV.

Pode-se observar pela Figura 2 que quando o azimute muda de -90° para 90°, a mudança na geração de energia tem as seguintes características (Solis Time, 2012, P.215):

1) O azimute muda para leste e oeste, e o impacto na geração de energia é o mesmo; se for instalado voltado para leste ou oeste, a perda relativa de geração de energia muda de forma semelhante;

2) A perda relativa de geração de energia muda como uma parábola, ou seja, quando o azimute aumenta gradualmente de 0° para leste ou oeste, a perda de geração de energia muda significativamente;

3) O ângulo entre o azimute e o Sul varia dentro de ±15°, e a perda relativa de geração de energia está dentro de 1%.

2.4 As principais vantagens da energia solar fotovoltaica

A energia Solar fotovoltaica tem como principais vantagens:

Economia de energia elétrica – As Usinas Fotovoltaicas possibilitam a longo prazo a economia de dinheiro nas instalações, reduzindo a conta de energia;

Fonte renovável e inesgotável de energia elétrica – Fonte de energia limpa e renovável, esse tipo de gerador utiliza da mais abundante, gratuita, eficiente e renovável fonte de energia disponível, o Sol;

Baixo custo com manutenção reduzida – Manutenção simples e econômica que precisam de cuidados posteriores apenas com a limpeza regular dos painéis;

Redução de ruídos e poluição - A energia solar favorece muito as causas ambientais, reduzindo a poluição do ar e da água que o gás do efeito estufa e que os outros combustíveis fósseis emitem. A geração de energia solar fotovoltaica é totalmente silenciosa, isso porque ela utiliza um processo fotoquímico, e não mecânico, para gerar energia elétrica, e que ocorre silenciosamente dentro de cada uma das células que compõem o módulo. Portanto, é possível instalar placas solares (módulos fotovoltaicos), sem incomodar os vizinhos e sem gerar dejetos ou poluentes nocivos à saúde e ao meio ambiente (SOLAR BSE, 2018).

2.5 As principais desvantagens da energia solar fotovoltaica

A energia Solar fotovoltaica tem como principais desvantagens:

Valor do Investimento - A aquisição e instalação de um sistema fotovoltaico, quer seja conectado à rede (On-Grid) ou isolado (Off-Grid), pode representar um valor de investimento inicial considerado alto. “No Brasil, o preço médio da instalação de um sistema residencial de energia solar pode variar entre R$15.000,00 e R$25.000,00, mas os custos ainda podem mudar muito conforme a região e o tamanho complexidade do projeto” (Conduscamp, 2023);

Geração Intermitente de Energia - Um dos aspectos que você deve saber é que não há geração de energia durante a noite, como os módulos fotovoltaicos precisam da luz do Sol para converter a energia solar em energia elétrica, o sistema fotovoltaico só gera energia durante as horas do dia em que há irradiação solar. Portanto, nuvens, sombras nos módulos, e chuvas, podem influenciar na quantidade de luz que chega até os painéis, alteram a quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico;

A vida útil das baterias Off-Grid relativamente baixa - No Brasil (Estacionárias, de Níquel Cádmio) não possui grande vida útil em média são de 7 a 25 anos de duração, aproximadamente, são caras e ainda exigem manutenções frequentes;

Amplo espaço para instalação – É necessário ter um amplo espaço para a instalação dos painéis, o que acaba sendo um desafio para algumas propriedades com espaço limitado. E além disso, pode haver algumas mudanças de estética do imóvel e comerciais podem alterar a fachada original do local que receberá o sistema.

Novos imóveis que contemplam soluções em sustentabilidade na fase de projeto, já possuem seus telhados projetados com direções inclinações adequadas para receber o sistema fotovoltaico (telhados com a face voltada para o Norte, por exemplo). Essa medida é muito importante, pois demonstra a total integração entre o projeto arquitetônico e o projeto elétrico civil (SOLAR BSE, 2018).

2.6 Módulo Fotovoltaico e seu Funcionamento

O módulo fotovoltaico é composto por 36 a 72 células fotoelétricas solares. Podendo ser do tipo monocristalino ou policristalino. É o equipamento usado para captar radiação do sol e a transforma em energia elétrica. As células do módulo fotovoltaico são responsáveis pela geração da energia solar, que por sua vez causam o efeito fotovoltaico que absorve energia solar para que a corrente elétrica percorra o caminho necessário entre duas camadas em uma direção oposta (Módulo Fotovoltaico, 8 de Outubro de 2021).

As placas fotovoltaicas conseguem absorver até 80% da radiação solar, mas apenas de 5% a 20% são convertidas em energia elétrica, e o resto se transforma em calor. Por isso, em dias

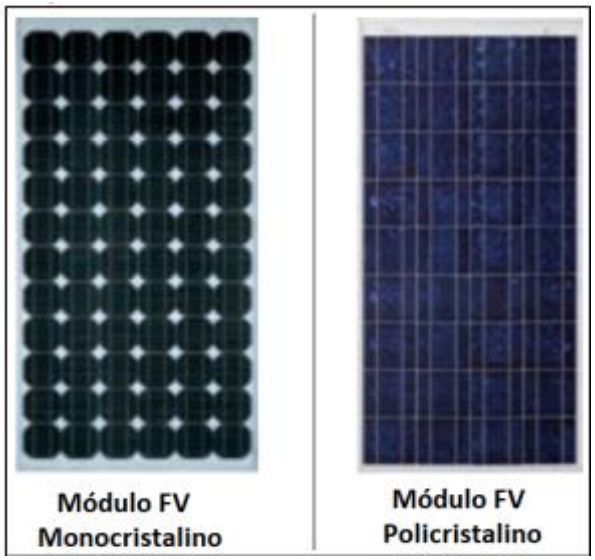
de sol intenso, as placas podem alcançar temperaturas altas em média de 35ºC acima da temperatura ambiente.

O material mais usado para garantir a captação da energia solar é, justamente, o silício, cuja extração do meio natural nem sempre é barata. O silício é um semi metal encontrado na natureza na forma de cristal, sendo matéria-prima para confecção de células fotoelétricas (fotovoltaicas).

Os resultados da temperatura advêm de uma característica dos painéis que usam o silício cristalino. Ocorre uma tensão maior quando a temperatura diminui e vice-versa, ou seja, a tensão se reduz quando a temperatura aumenta.

É importante entender que quando a temperatura fica mais alta, existem mais vibrações na rede de cristal do silício. Interagindo com as vibrações, alguns elétrons perdem energia, ou seja, não ajudam com a corrente elétrica. As vibrações crescem, a temperatura aumenta e mais elétrons perdem energia. Para quantificar o fenômeno, é usado um coeficiente de temperatura, que mostra a quantidade perdida de potência para cada grau Celsius aumentado. As fichas técnicas dos módulos entregam esse coeficiente de temperatura considerando uma temperatura limite para obter uma menor perda de eficiência na geração. Assim, um dos principais parâmetros associados ao fenômeno é a ordem dos átomos na rede cristalina (HCC Energia Solar, 2023, pág. 1). A Figura 3 apresenta exemplos de módulos fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos.

Figura 3 - Módulo de Silício cristalino.



Fonte: Adaptado de Pinho et al. (2008).

2.7 Curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos

A curva característica corrente-tensão (I-V), é a curva que relaciona a corrente (I) e a tensão de saída (V) dos módulos fotovoltaicos, onde os valores de tensão de circuito aberto (Voc), a corrente de curto-circuito (Isc) e o ponto de máxima potência (Pm), sendo este ponto formado pela corrente na máxima potência (Imp) e tensão na máxima potência (Vmp), estão determinados da seguinte forma:

Isc – Corrente de curto-circuito (short circuit): é a máxima corrente elétrica que o módulo pode fornecer;

Voc – Tensão de circuito aberto (open circuit): é a máxima tensão que o módulo pode fornecer;

Imp – Corrente de máxima potência (maximum power): é a corrente que o módulo fornece quando opera no seu ponto de máxima potência;

Vmp – Tensão de máxima potência: é a tensão que o módulo apresenta nos seus terminais quando opera no seu ponto de máxima potência;

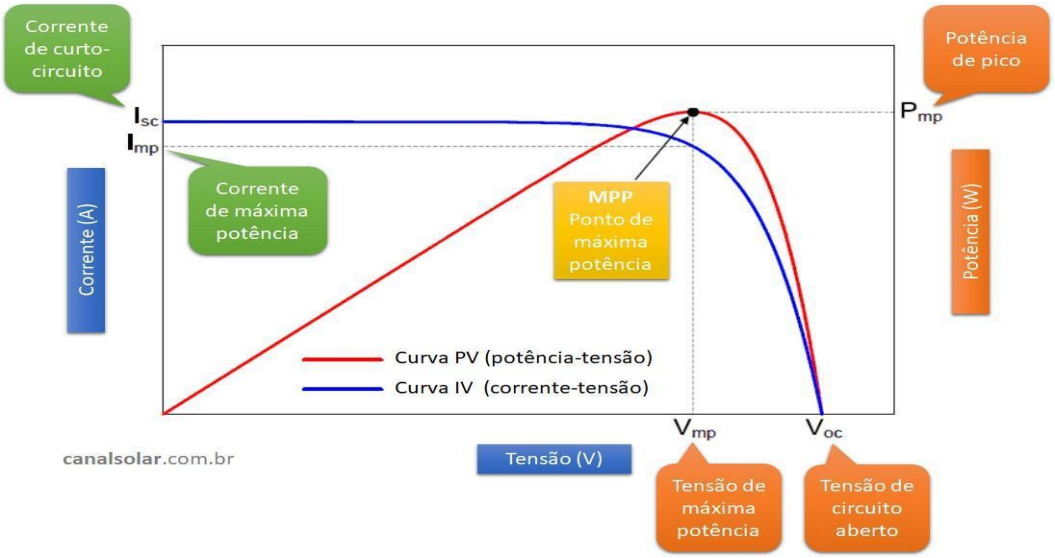
Pmp – Potência de máxima potência: o nome é um pouco redundante e quer dizer exatamente isso. Em outras palavras, esta é potência do módulo fotovoltaico;

MPP – É Ponto Máxima Potência do Módulo Fotovoltaico (máximo powerpoint). Encontra-se no joelho da curva dos módulos fotovoltaicos IV e no pico da curva PV.

Os valores de Isc, Voc, Imp, Vmp, Pmp são especificados nas folhas de dados para uma irradiância de 1000 W/m² e uma temperatura operacional de 25ºC (Loja de Energia. 2019).

A Figura 4, mostra esses parâmetros representados no gráfico de análise de tensão X corrente X potência.

Figura 4 - Curva I-V, Tensão X corrente X potência.



Fonte: Canal Solar.

2.8 Temperatura dos Módulos Fotovoltaico

A Figura 5, mostra o ponto máximo das características do módulo fotovoltaico, sua temperatura e variações aplicadas.

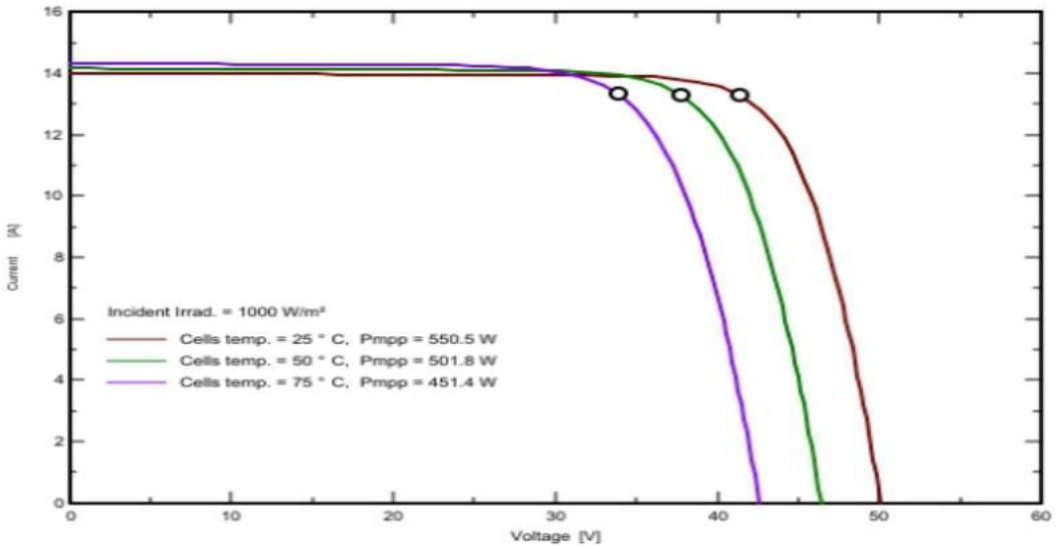
Figura 5 -Características do módulo fotovoltaico e suas variações de temperatura.

TEMPERATURE & MAXIMUM RATING	
Maximum System Voltage (V)	1500 V
Maximum Series Fuse Rating (A)	25 A
Power Tolerance	0~+5 W
Pmax Temperature Coefficients (W/°C)	-0.350 %/°C
Voc Temperature Coefficients (V/°C)	-0.285 %/°C
Isc Temperature Coefficients (A/°C)	+0.045 %/°C
NOCT Nominal Operating Cell Remperature (°C)	45±2 °C
Operating and Storage Temperature (°C)	-40~+85 °C

Fonte: (*Datasheet* - OSDA ODA550-36V-MH).

A curva IV deste módulo fotovoltaico, apresentado na Figura 5 de marca Osda Solar, cujo modelo é OSDA ODA550-36V-MH, com relação a um gráfico onde o ponto máximo da tensão e da corrente encontram-se com máximo de temperatura estipulado pelo Datasheet, logo quando ele ultrapassa essa temperatura máxima estipulada a potência começa a diminuir, como se pode observar na Figura 6.

Figura 6 - Curva I-V relacionada ao ponto máximo de temperatura.



Fonte: (*Datasheet* - OSDA ODA550-36V-MH).

Como é possível observar, a corrente de curto-circuito do módulo aumenta 0,06% para cada Grau Celsius (°C) acima da temperatura padrão (25°C). A Tensão de circuito aberto tem uma característica diferente, seu valor diminui 0,33% para cada °C de elevação em relação a

25°C. Assim como a tensão e corrente, a potência do módulo também sofre alterações em função da temperatura, seu valor diminui 0,41% para cada °C acima dos 25°C usados nos ensaios em laboratório.

Para esse módulo, supondo que sua instalação seja no Nordeste (temperatura chega facilmente a 40°C), as características dos módulos serão afetadas pela temperatura e serão:

A corrente de curto-circuito é pouco afetada pela variação de temperatura. O valor da corrente se torna 9,38 A para uma temperatura de 40°C.

A Tensão de circuito aberto, por outro lado, sofre uma variação significativa, passando de 38,5 V para 36,6 V, quase 2 V de redução. Uma vez que diversos módulos são conectados em série para fornecer uma dada tensão, essa redução devido à temperatura pode fazer com que a tensão desejada não seja alcançada e isso prejudique o sistema (Módulo Fotovoltaico, 8 de Outubro de 2021).

2.9 Inversor fotovoltaico

Inversor fotovoltaico é um dispositivo que converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA) que pode ser usada pelos bancos de baterias ou conectado à rede.

Existem, basicamente, dois tipos de inversores: os comutados pela rede (comutação natural) e auto comutados (comutação forçada). No primeiro, processo de inversão é controlado pela tensão da rede elétrica; no auto comutado, o controle é realizado pelo próprio inversor. As tecnologias estão possibilitando que o mesmo inversor possa operar nos dois sentidos, isolado ou sincronizado à rede (Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Pinho, P.76).

A escolha de um inversor depende de vários fatores, como a tensão de entrada CC, a tensão de saída, o teor de harmônicos, sincronismo com a rede, o autoconsumo e a eficiência (Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Pinho, P.75).

2.10 Proteções

Nos Sistemas Fotovoltaicos, assim como em qualquer outro sistema elétrico, os principais componentes utilizados para proteger pessoas e equipamentos são as chaves seccionadoras, os fusíveis, os disjuntores e os dispositivos de proteção contra surtos (DPS). Algumas vezes, os projetistas dos sistemas fotovoltaicos preferem substituir chaves e fusíveis por disjuntores, que facilitam a manutenção.

Os componentes de proteções dos Sistemas fotovoltaicos, devem ser selecionados em função dos valores máximos permitidos de tensão e corrente em cada trecho do circuito. A corrente do painel solar fotovoltaico é limitada pela corrente de curto-circuito na condição de maior irradiância. No entanto, para se especificar os componentes instalados entre o painel, o controlador de carga e ou inversor, utiliza-se normalmente um fator multiplicativo de segurança de 1,25.

Deve-se também observar a adequação dos componentes em operar com o tipo de tensão (CC ou CA) do local de sua instalação. Dispositivos CA, podem, em princípio, operar adequadamente do lado CC, mas isso pode reduzir na sua vida útil (ENERGIAS RENOVAVEIS, 2023).

2.11 A Importância da análise termográfica

As inspeções em usinas fotovoltaicas com câmera infravermelha–popularmente conhecido como ensaio termográfico, ou termografia – são análises que visam detectar variações de temperaturas em todo o sistema instalado.

A análise deve ser feita não só nos módulos, mas também nas conexões, equipamentos (inversores, transformadores) e quadros elétricos. Esse procedimento é extremamente efetivo em usinas fotovoltaicas, dentro dos escopos de comissionamento e também de Operação e Manutenção (O&M).

Realizar ensaios de termografia traz diversas vantagens, visto que por meio deles pode-se identificar falhas precoces em uma planta fotovoltaica, o que contribui para evitar perdas de geração de energia e também garante segurança operacional da usina.

A norma NBR 16274:2014, que trata dos ensaios e comissionamento de sistemas fotovoltaicos, descreve a importância de utilizar a câmera termográfica para detectar variações anormais de temperatura nos módulos, diodos de by-pass e conexões, ela cita que se deve atentar para a realização do ensaio em modo de operação normal do sistema fotovoltaico, com céu estável e irradiação solar mínima de 600 W/m². Isso garantirá que o sistema seja percorrido por uma corrente mínima e, assim, as diferenças de temperaturas durante o ensaio poderão ser notadas.

O equipamento mais popular para a termografia é a câmera termográfica, que, basicamente, é uma câmera equipada com sensores de radiação infravermelha. As câmeras mais tradicionais do mercado normalmente possuem a função de capturar tanto imagens térmicas, como também imagens comuns, como uma foto de celular.

Essa Função Importante, pois na produção de relatórios dos ensaios realizados, a comparação da imagem comum com a imagem termográfica auxilia na análise de problemas e também na identificação dos locais onde são encontrados os desvios de temperatura (Silveira, 1º de setembro de 2023).

Este é um teste de extrema importância tanto no comissionamento, como em verificações periódicas da usina, pois através deste teste pode encontrar pontos de aquecimento elevados acima do estipulado pelo fabricante que viram perdas e causam uma queda no rendimento do sistema afetando acima da eficiência e da vida útil dos módulos e equipamentos.

"Um único módulo defeituoso pode limitar a geração de toda a string, já que a corrente elétrica deve ser a mesma em um circuito em série. Um defeito persistente que também diminui a vida útil do módulo. Além disso, certos tipos de defeitos podem causar o aquecimento excessivo nas células do arranjo fotovoltaico e em casos mais graves, podem evoluir para um incêndio" (REVISTA CANAL SOLAR, 2023, Nº 17 | 20).

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

Esta pesquisa é classificada como pesquisa aplicada, pois visa produzir um conhecimento que possa ser efetivamente aplicado em outras situações contribuindo para alternativas de melhoria. Do ponto de vista da abordagem, esta pesquisa é classificada como quantitativa, pois irá apresentar os resultados obtidos por meio de simulações os quais serão objeto de análises dos dados.

Quanto à natureza dos procedimentos utilizados para esta pesquisa, ela é classificada como pesquisa bibliográfica e pesquisa descritiva, pois foi utilizado informações técnicas e demais literaturas de caráter cientifico como referências, para descrever o conhecimento.

3.2 Universo da amostra

Módulo Fotovoltaico, Inversor de Tensão e *Software* de simulação PVsyst.

3.3 Instrumento de coleta de dados – *Datasheet*

As informações técnicas utilizadas neste trabalho serão apresentadas conforme os dados apresentados nos Datasheets dos módulos e inversores que serão implementados na usina

fotovoltaica. O Datasheet é a ficha técnica responsável por fornecer os dados e parâmetros, os desempenhos e as características técnicas dos equipamentos.

3.3.1 *Datasheet* dos Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos que serão utilizados para análise do sistema de geração de energia fotovoltaica, são da marca Osda Solar de 550W, cujo modelo é ODA550-36V-MH, de dimensões 2279 x 1134 x 35mm, e com tamanho da célula de 182 x 91mm.

Os dados utilizados da ficha técnica para esta análise são: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, potência de pico, e eficiência.

A Figura 7, apresenta o Datasheet com as descrições das principais características do módulo ODA550-36V-MH. Os valores são especificados para uma irradiância de 1000 W/m² a uma temperatura operacional de 25ºC.

Figura 7 - *Datasheet* dos módulos ODA550-36V-MH.

ELECTRICAL DATA (STC)	
Model Type	ODA550-36V-MH
Peak Power(Pmax)	550.00
Maximum Power Voltage(Vmp)	42.10
Maximum Power Current(Imp)	13.06
Open Circuit Voltage(Voc)	50.10±3%
Short Circuit Current(Isc)	14.01±3%
Module Efficiency(%)	21.3

* STC: irradiance 1000 W/m², AM 1.5, and cell temperature of 25°C

Fonte: Fabricante Osda Solar.

3.3.2 *Datasheet* do Inversor Fotovoltaico

Para a conversão da Corrente Contínua (CC) em Corrente Alternada (CA), será utilizado o inversor da marca SOLPLANET de potência de 25kW, cujo modelo é ASW25K-LT-G3.

Esse dispositivo apresenta características ideais para ser utilizado no dimensionamento do sistema, por se tratar de um dispositivo com boa eficiência, e por já possuir internamente string box e proteções, além de ter a opção de monitoramento virtual.

Os dados utilizados da ficha técnica para esta análise são: tensão de entrada CC, tensão de saída CA, autoconsumo e eficiência. A Figura 8, apresenta o Datasheet com as descrições das principais características do inversor ASW25K-LT-G3.

Figura 8 - *Datasheet* do inversor ASW25K-LT-G3.

Technical Datasheet		ASW 25K-LT-G3	ASW 27K-LT-G3	ASW 30K-LT-G3	ASW 33K-LT-G3	ASW 36K-LT-G3	ASW 40K-LT-G3
Input (DC)	Max. PV array power	37500 Wp STC	40500 Wp STC	45000 Wp STC	49500 Wp STC	54000 Wp STC	60000 Wp STC
	Max. input voltage	1100 V					
	MPP voltage range / rated input voltage	180 V to 1000 V / 630 V					
	Min. input voltage	160 V					
	Initial. feed-in voltage	200 V					
	Max. operating input current	32 A / 32 A / 32 A			32 A / 32 A / 40 A		
	Max. short circuit current	48 A / 48 A / 48 A			48 A / 48 A / 60 A		
	No. of independent MPPT inputs / strings per MPPT input	3 / A:2;B:2;C:2			3 / A:2;B:2;C:2		
Output (AC)	Rated power	25000 W	27000 W	30000 W	33000 W	36000 W	40000 W
	Max. apparent AC power	27500 VA[3&4]	29700 VA[3&4]	33000 VA[3&4]	36300 VA[3&4]	39600 VA[3&4]	44000 VA[3&4]
	AC nominal voltage	220 V / 380 V 230 V / 400 V 240 V / 415 V					
	AC voltage range	180 V to 305 V / 312 V to 528 V					
	AC grid frequency / range	50 Hz / 45 Hz to 55 Hz 60 Hz / 55 Hz to 65 Hz					
	Max. output current	39.9 A	43.0 A	47.8 A	52.6 A	57.4 A	63.8 A
	Adjustable power factor range	0.8 leading to 0.8 lagging					
	Feed-in phases	3 / 3-N-PE					
	Harmonic distortion (THD) at rated output	< 3 %					

Fonte: Fabricante Solplanet.

3.4 *Software* de simulação - PVsyst

O software PVsyst é um programa de simulação utilizado para auxiliar no dimensionamento e desenvolvimento de projetos de geração solar fotovoltaica. Com a utilização do software Pvsyst é possível fazer a análise de dados meteorológicos e de viabilidade econômica do projeto, auxiliando o projetista em cada escolha, desde o local exato para a montagem do módulo como também na precificação e apresentação ao cliente, pois ele gera um relatório técnico sobre as informações fornecidas e os dados esperados para a combinação módulo/inversor.

3.5 Método de análise

A metodologia estabelecida para analisar a influência da temperatura ambiente na eficiência dos módulos fotovoltaicos está dividida em 3 passos.

1° passo – Dimensionamento do sistema fotovoltaico de acordo com as características técnicas estipuladas no Datasheet dos módulos e inversores.

2º passo - A partir do dimensionamento do sistema, realizado no 1º passo, foram realizadas simulações no software PVsyst (ensaios de curva I-V), para diferentes temperaturas do ambiente.

3° passo – Com os dados obtidos das simulações, realizadas no 2º passo, serão analisados o quanto a temperatura dos módulos influencia na potência gerada pelos mesmos, ou seja, na sua eficiência. Nesse passo, a analise consiste em quantificar as perdas de geração devido a essas diferentes temperaturas comparadas com a temperatura limiar estipulada pelo Datasheet do fabricante do módulo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como 1° passo do artigo será apresentado a seguir o dimensionamento do sistema analisado.

4.1 Dimensionamento do sistema

Para o dimensionamento do sistema hipotético para análise, foram utilizados os dados nominais de geração dos módulos e inversores contidos nos Datasheets dos respectivos equipamentos.

Na Figura 9 estão apresentadas as características do sistema hipotético fotovoltaico que foi dimensionado para a realização da análise.

Figura 9 - Características do sistema hipotético fotovoltaico.

Características do grupo FV

Módulo FV		**Inversor**	
Fabricante	Generic	Fabricante	Generic
Modelo	ODA-550-36-MH	Modelo	ASW25K-LT-G3
(Base de dados original do PVsyst)		(Base de dados original do PVsyst)	
Potência unitária	550 Wp	Potência unitária	25.0 kWca
Número de módulos FV	54 unidades	Número de inversores	3 * MPPT 33% 1 unidade
Nominal (STC)	29.70 kWp	Potência total	25.0 kWca
Módulos	3 Strings x 18 Em série	Tensão de funcionamento	180-1000 V
Em condições de func. (50°C)		Rácio Pnom (DC:AC)	1.19
Pmpp	27.10 kWp	Não há partilha de potência entre MPPTs	
Umpp	682 V		
I mpp	40 A		
Potência FV total		**Potência total inversor**	
Nominal (STC)	30 kWp	Potência total	25 kWca
Total	54 módulos	Número de inversores	1 unidade
Superfície módulos	138 m²	Rácio Pnom	1.19
Superfície célula	128 m²		

PVsyst AVALIAÇÃO

Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

Para dimensionar esse sistema hipotético, foi utilizado as coordenadas geográficas de Nova Lima - Brasil, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Coordenadas Geográficas do sistema solar fotovoltaico.

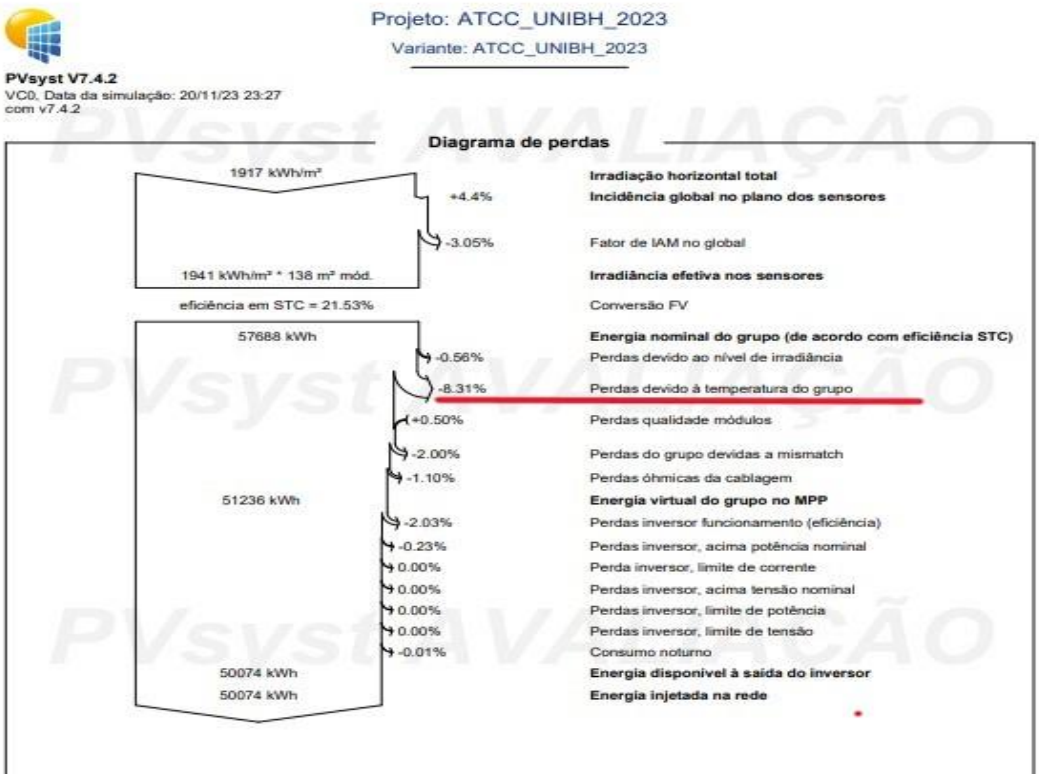
Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

4.2 Análise das perdas gerais no sistema.

O software PVsyst fornece também como resultado o diagrama de perdas do sistema.

Na Figura 11, estão apresentadas as perdas que influenciam no processo de geração de energia dos módulos.

Figura 11 - Diagrama de perdas por geração.



Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

Conforme pode ser observado na Figura 11, as perdas devido à temperatura do sistema fotovoltaico hipotético são as mais significativas. Isso significa que os módulos fotovoltaicos são sensíveis a alteração de temperatura. Em condições favoráveis de temperatura,

especificadas nos Datasheets de módulos fotovoltaicos, a potência de geração pode aproximar do valor de pico. Quando a temperatura eleva, muito acima do especificado, no Datasheet a potência começa a diminuir devido ao calor dissipado, afetando assim a eficiência dos módulos e também em sua vida útil, pois uma temperatura elevada pode danificar o material e afetar em sua característica.

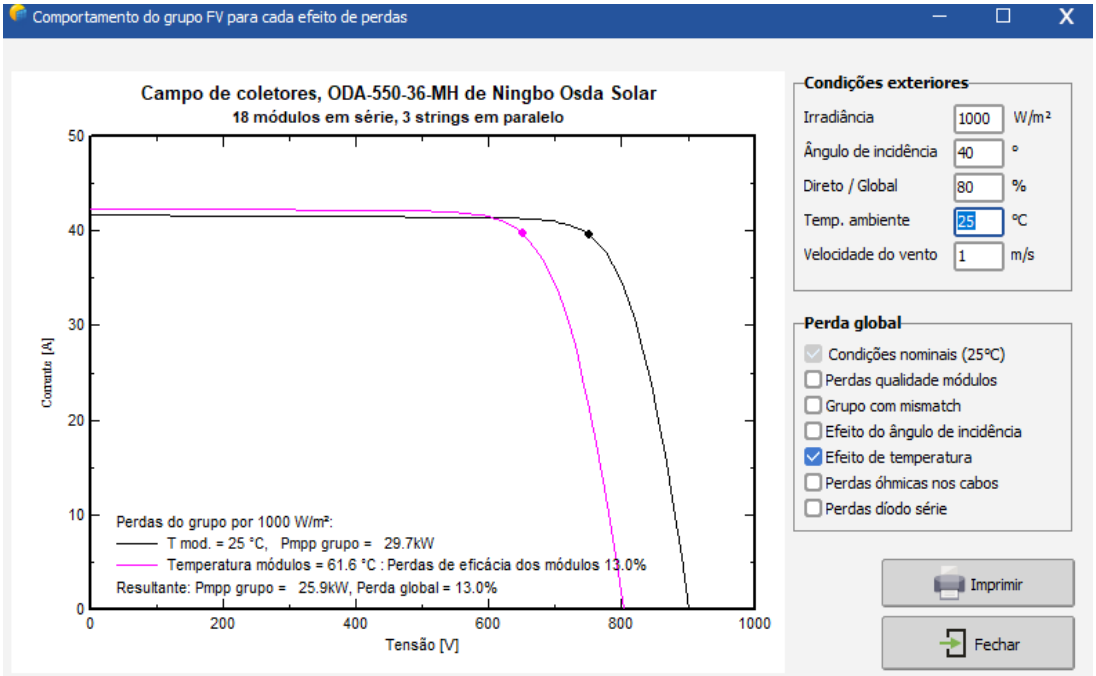
4.3 Simulações no *software* PVsyst - Análise de curva I-V.

Como 2° passo do artigo serão apresentados a seguir as simulações no software para diferentes temperaturas do ambiente.

4.3.1 Resultado da Simulação 1: Temperatura ambiente de 25ºC – temperatura limiar indicada pelo *Datasheet*.

Na Figura 12, estão apresentados os dados do sistema.

Figura 12 - Curva I-V do sistema hipotético - 25 ºC.



Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

Conforme pode ser observado na Figura 12, para a temperatura de 25ºC, a perda global do sistema foi de 13.0%. De acordo com o diagrama de perdas apresentado na Figura 11, 8.31% dessas perdas são devidas à temperatura do grupo (sistema como um todo), ao qual afeta diretamente a potência de energia entregue pelos módulos, fazendo que haja uma diminuição

na eficiência do módulo. A potência entregue na saída do sistema, na temperatura de 25ºC, foi de 25.9kW.

Na Tabela 1 estão apresentados os dados do resultado da simulação 1, que serão comparados com os dados das demais simulações. Esta simulação 1 é a simulação que será usada como referência para as comparações com as demais simulações, submetidas a diferentes temperaturas do ambiente.

Tabela 1 - Resultado da simulação 1.

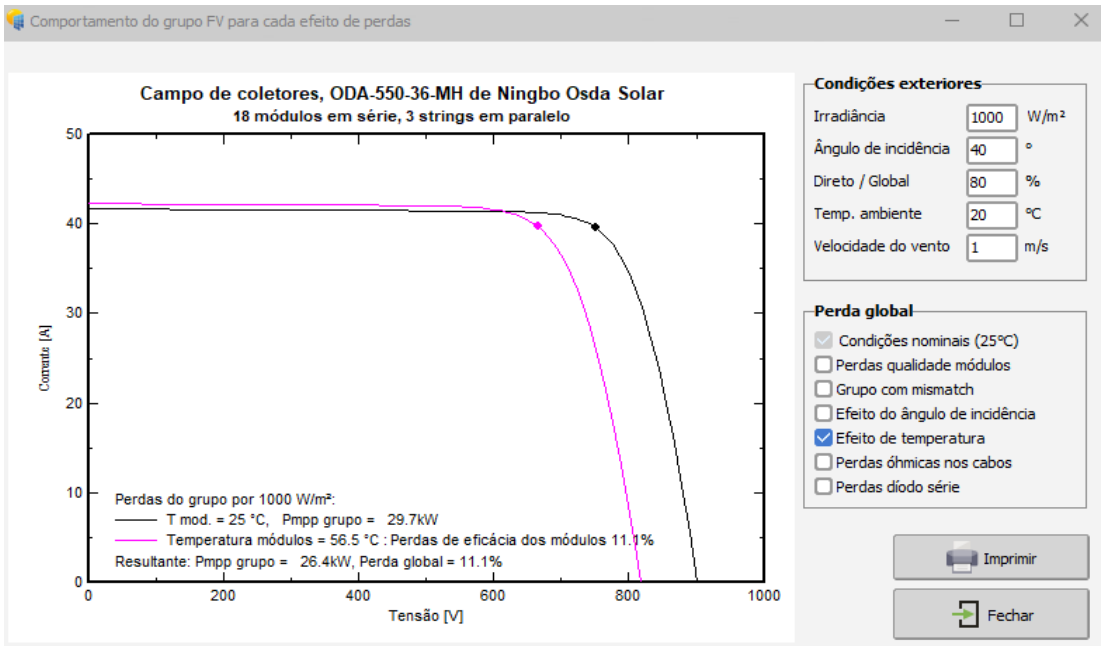
Temp. Ambiente (ºC)	Temp. Módulos (ºC)	Perdas (%)	Corrente Isc (A)	Corrente Imp (A)	Tensão Voc (V)	Tensão Vmp (V)	Potência Pmpp (kW)	Potência MPP (kW)
25	61.6	13	~ 42.5	39.9	757,8	~ 649	25.9	29.7

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3.2 Resultado da Simulação 2: Temperatura ambiente de 20ºC.

Na Figura 13, estão apresentados os dados do sistema.

Figura 13 - Curva I-V do sistema hipotético - 20 ºC.



Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

Conforme pode ser observado na Figura 13, para a temperatura de 20ºC, a perda global do sistema foi de 11.1%. De acordo com o diagrama de perdas apresentado na Figura 11, 8.31% dessas perdas são devidas à temperatura do grupo (sistema como um todo), ao qual afeta

diretamente a potência de energia entregue pelos módulos, fazendo que haja uma diminuição na eficiência do módulo. A potência entregue na saída do sistema, na temperatura de 20ºC, foi de 26.4kW.

Na Tabela 2 estão apresentados os dados do resultado da simulação 2, que serão comparados com os resultados da simulação referência.

Tabela 2 - Resultado da simulação 2.

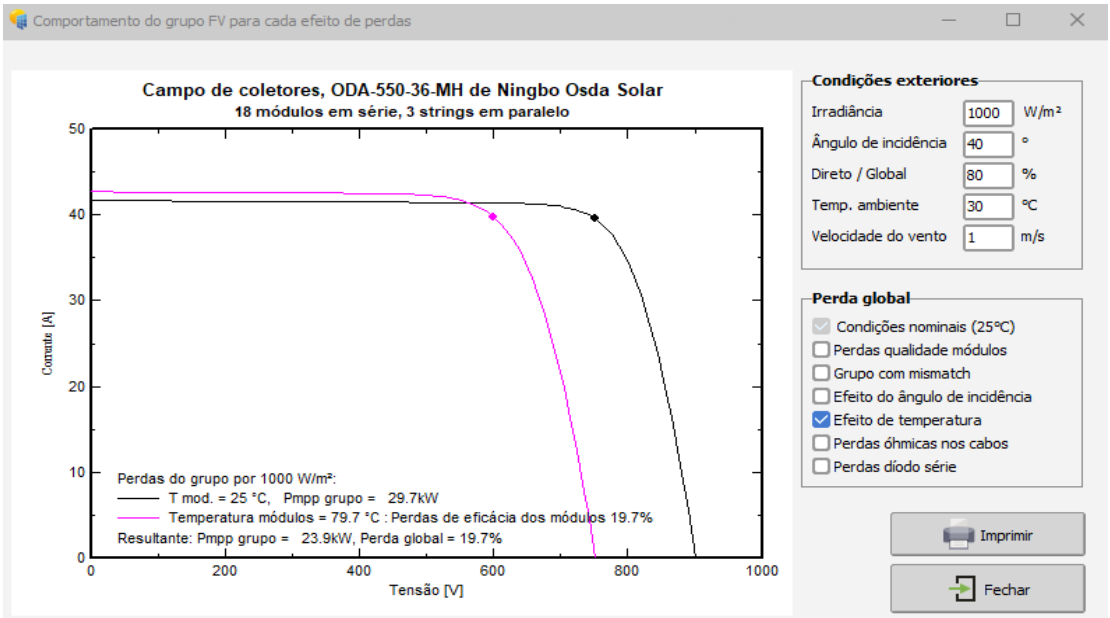
Temp. Ambiente (ºC)	Temp. Módulos (ºC)	Perdas (%)	Corrente Isc (A)	Corrente Imp (A)	Tensão Voc (V)	Tensão Vmp (V)	Potência Pmpp (kW)	Potência MPP (kW)
20	56.5	11.1	~ 41.5	39.9	757,8	~ 662	26.4	29.7

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3.3 Resultado da Simulação 3: Temperatura ambiente de 30ºC.

Na Figura 14, estão apresentados os dados do sistema.

Figura 14 - Curva I-V do sistema hipotético - 30 ºC.



Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

Conforme pode ser observado na Figura 14, para a temperatura de 30ºC, a perda global do sistema foi de 19.7%. De acordo com o diagrama de perdas apresentado na Figura 11, 8.31% dessas perdas são devidas à temperatura do grupo (sistema como um todo), ao qual afeta diretamente a potência de energia entregue pelos módulos, fazendo que haja uma diminuição

na eficiência do módulo. A potência entregue na saída do sistema, na temperatura de 30ºC, foi de 23.9kW.

Na Tabela 3 estão apresentados os dados do resultado da simulação 3, que serão comparados com os dados da simulação referência que é a limiar demais simulações.

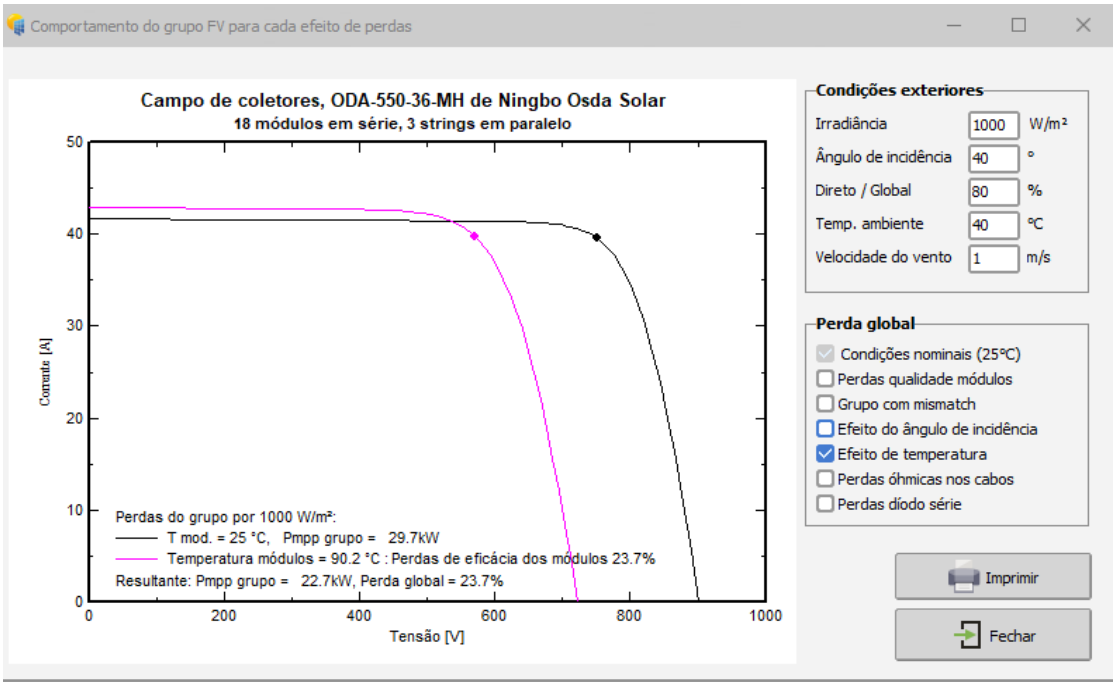
Tabela 3 - Resultado da simulação 3.

Temp. Ambiente (ºC)	Temp. Módulos (ºC)	Perdas (%)	Corrente Isc (A)	Corrente Imp (A)	Tensão Voc (V)	Tensão Vmp (V)	Potência Pmpp (kW)	Potência MPP (kW)
30	79.7	19.7	~ 43	39.9	757,8	~ 599	23.9	29.7

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3.4 Resultado da Simulação 4: Temperatura ambiente de 40ºC.

Na Figura 15, estão apresentados os dados do sistema.



Fonte: *Software* de simulação fotovoltaica PVsyst.

Conforme pode ser observado na Figura 15, para a temperatura de 40ºC, a perda global do sistema foi de 23.7%. De acordo com o diagrama de perdas apresentado na Figura 11, 8.31% dessas perdas são devidas à temperatura do grupo (sistema como um todo), ao qual afeta diretamente a potência de energia entregue pelos módulos, fazendo que haja uma diminuição na eficiência do módulo. A potência entregue na saída do sistema, na temperatura de 40ºC, foi de 22.7kW.

Na Tabela 4 estão apresentados os dados do resultado da simulação 4, que serão comparados com os dados da simulação referência que é a limiar demais simulações.

Tabela 4 - Resultado da simulação 4.

Temp. Ambiente (ºC)	Temp. Módulos (ºC)	Perdas (%)	Corrente Isc (A)	Corrente Imp (A)	Tensão Voc (V)	Tensão Vmp (V)	Potência Pmpp (kW)	Potência MPP (kW)
40	90.2	23.7	~ 44	39.9	757,8	~ 569	22.7	29.7

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.4 Comparação dos resultados das simulações – Discussões finais

Como resultado do 3° passo do artigo serão apresentados a seguir as sínteses das simulações realizadas no passo anterior e a quantificação das perdas de geração devido a essas diferentes temperaturas comparadas com a referência que é a temperatura limiar estipulada pelo Datasheet do fabricante do módulo, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Síntese dos resultados das simulações

SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES								
SIMULAÇÃO	**Temp. Ambiente (ºC)**	**Temp. Módulos (ºC)**	**Perdas (%)**	**Corrente Isc (A)**	**Tensão Vmp (V)**	**Potência (kW)**	**Variação de perdas (%)**	**Variação das potências (%)**
2	20,0	56,2	11,1	~ 41,5	~ 662	26,4	+1,9	+1,93
1	25,0	61,6	13,0	~ 42,5	~ 649	25,9	Referência	Referência
3	30,0	79,7	19,7	~ 43,0	~ 599	23,9	-6,7	-7,72
4	40,0	90,2	23,7	~ 44,0	~ 569	22,7	-10,7	-12,36

Fonte: Elaborada pelos autores.

A recomendação do fabricante dos módulos utilizados nas simulações é que a temperatura ambiente limiar para se obter a máxima eficiência dos módulos é de 25ºC. Conforme pode ser visto na Tabela 5, isso pode ser comprovado. Observa-se que para uma temperatura menor que 25ºC (20ºC) as perdas foram menores e a potência gerada foi maior, já para temperaturas superiores a 25ºC as perdas foram maiores e as potências geradas pelos módulos foram menores.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.

Os sistemas fotovoltaicos quando submetidos a temperaturas superiores à do limiar especificada no Datasheet do fabricante sofrem uma redução no valor da potência entregue na saída desses sistemas, devido às perdas por aquecimento. Isso ocorre por causa das radiações solares que incidem nos módulos e que se dissipam em forma de calor.

Após a realização das simulações e análises das mesmas, constatou-se que a recomendação de até 25ºC da temperatura ambiente para a utilização dos módulos ODA550-36V-MH é realmente a temperatura limiar de eficiência. A partir dela o sistema irá apresentar uma eficiência menor, ou seja, a potência gerada começa a diminuir aumentando as perdas na geração devido ao aumento da temperatura ambiente.

Portanto, os sistemas fotovoltaicos já instalados e que não foram dimensionados para uma temperatura ambiente maior ou igual as que atualmente estão ocorrendo devido ao efeito estufa, poderão sofrer uma redução na geração de energia, e consequentemente uma redução na sua eficiência.

Através deste estudo, evidencia a importância de analisar a temperatura do ambiente que o sistema será submetido, pois a geração do sistema pode não atender a demanda solicitada pelo consumidor.

Recomenda-se para estudos futuros o aprofundamento no tema, sobre as perdas de eficiência nos módulos, e possíveis soluções para esse tipo de problema. Atualmente no mercado já estão disponíveis sensores que identificam a elevação da temperatura dos módulos e controlam por meio de controladores lógicos programáveis a tensão de saída do módulo na entrada do inversor impedindo que uma sobretensão atinja os componentes do sistema, evitando a queima dos componentes eletrônicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Badra, M. (2020, December 4). Cientistas indicam melhor técnica de resfriamento de painéis solares. Canal Solar. https://canalsolar.com.br/ acesso em 10 de novembro 2023.

Módulo Fotovoltaico. (2021, October 8). Portal Solar, https://www.portalsolar.com.br/modulo-fotovoltaico acesso em 15 de Novembro 2023.

Os avanços e o futuro da energia solar no Brasil são destaques na rodada de painéis no estado do país na COP27. (2022,11 de novembro). Ministério do Meio Ambiente Mudança do Clima, http://www.gov.br/mma/pt-br , acesso em 15 de Novembro 2023.

Expansão da matriz elétrica brasileira ultrapassa 7GW em2023. (2023,9 de outubro), Agência Nacional de Energia Elétrica. https://www.gov.br/aneel/pt-

br/assuntos/noticias/2023/expansao-da-matriz-eletrica-brasileira-ultrapassa-os-7-gw-em-2023 2023 acesso em 10 de Novembro de 2023.

Iberdrola - https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/que-e-energia-solar-fotovoltaica/ acesso 10 de outubro 2023.

RZSolar https://solarz.com.br/problemas-que-podem-ocorrer-apos-a-instalacao-do-sistema-fotovoltaico/ , aceso 11 de outubro de 2023.

Energia,S. (2021,maio 28). Quais Os Principais Componentes De Uma Usina Fotovoltaica? SolarVolt Energia Solar Volt - https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/componentes-usina-fotovoltaica/ acesso em 13 de Novembro de 2023.

Funcionamento das Usinas, Apostilado curso de capacitação técnica comercial sistemas,https://www.metallightsolar.com/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Estrutura_Usina&utm_id=Estrutura_Usina&utm_term=Estrutura_Usina&utm_content=Estrutura_Usina&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIqYayhunfggMVIENIAB183wCIEAAYASAAEgLQuPD_BwEhttps://solarprime.com.br/o-que-sao-usinas-fotovoltaicas/acesso em 10 de Novembro de 2023.

Solar,B.S.E. (2018,maio 9). Entendendo Vantagens e Desvantagens de Energia Solar: o Guia Definitivo para Seu Investimento. | Blog Blue Sol; BlueSol Energia Solar. https://blog.bluesol.com.br/tag/1/

Módulo Fotovoltaico (2021,outubro 8) PortalSolar - https://www.portalsolar.com.br/modulo-fotovoltaic Silveira, G. (2023, setembro 1). / Acesso em 15 de Novembro de 2023.

A importância da análise termográfica em sistemas fotovoltaicos.
Canal Solar - https://canalsolar.com.br/a-importancia-da-analise-termografica-em-sistemas-fotovoltaicos/ Acesso em 10 de Novembro de 2023.

Conduscamp - https://conduscamp.com.br/blog/vantagens-e-desvantagens-da-energia-sola .

Solar Canal Energia - https://www.canalenergia.com.br/noticias/53226218/gerador-solar- fotovoltaico-mais-antigo-do-brasil-completa-25-anos/ aceso 10 de novembro 2023.

Absolar - https://www.absolar.org.br/noticia/ufsc-comemora-25-anos-do-gerador-solar-fotovoltaico-mais-antigo-do-brasil/ acesso 11 de novembro 2023.

Implasolar - https://implasolar.com.br/projeto-de-energia-solar-residencial-e-caro/ acesso em 17 de novembro 2023.

Neo solar – https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/bomba-solar-para-bombeamento-de-agua/ Acesso em 10 de novembro de 2023 .

Origo empresa de energia https://origoenergia.com.br/blog/ Acesso em 12 de novembro 2023.

Portal solar - https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html/ Acesso em 15 de novembro de 2023.

Iberdola – https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/que-e-energia-solar-fotovoltaica#:~:text=A%20energia%20solar%20fotovoltaica%20%C3%A9%20uma%20fonte%20de%20energia%20renov%C3%A1vel,liberar%20el%C3%A9trons%2C%20gerando%20corrente%20el%C3%A9trica Acesso em 16 de novembro de 2023.

Energia, S. (2021, January 26). String Box: O Que É e Como Funciona? Solar Volt Energia- https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/string-box-o-que-e-e-como-funciona/

Solis - https://www.solisinverters.com/br/documentation/Influence_of_Azimuth_and_Tilt_on_Yield_of_PV_System_11281225.html/ Acesso em 03de Dezembro 2023.

Solplanet - https://solplanet.net/ Acesso em 24 de novembro de 2023.

Blog Cursos - https://blog.cursoeletricaecia.com.br/perifericos-e-acessorios-para-energia-solar-fotovoltaica/ .

Grupo E4 - https://grupoe4.com.br/qual-a-funcao-do-string-box-azume/ Acesso em 03 de Dezembro 2023.

BEN, Balanço Energético Nacional - https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben Acesso em 02 de Dezembro 2023.

Canal solar - https://canalsolar.com.br/solar-impulsiona-crescimento-da-matriz-eletrica-e-energetica-brasileira-em-2022/ .

BBC – https://www.bbc.com/portuguese/articles/ce5pd5x7rrzo#:~:text=%C3%89%20'praticamente%20certo'%20que%202023,j%C3%A1%20registrado%2C%20indicam%20novos%20dados&text=%C3%89%20%E2%Cpraticamente%20certo% Acesso em 03 de Dezembro de 2023.

Manual da Engenharia, https://www.solenerg.com.br/manual-de-engenharia-para-sistemas fotovoltaicos-2014/ acesso no dia 10 de Novembro de 2023.

(Abreu Herbert, 2023) - Apostila de capacitação Técnica Comercial de Sistemas Fotovoltaicos, Loja Elétrica Solar.