

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

JUAN LENNON PIMENTEL DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS SOLARES
FOTOVOLTAICOS COM OTIMIZADORES DE POTÊNCIA QUE ESTÃO
SUJEITOS A SOMBRAS PARCIAIS.**

Manaus

2021

JUAN LENNON PIMENTEL DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS SOLARES
FOTOVOLTAICOS COM OTIMIZADORES DE POTÊNCIA QUE ESTÃO
SUJEITOS A SOMBRAS PARCIAIS.**

Monografia desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Dr. Daniel Guzmán del Río

Manaus

2021

Universidade do Estado do Amazonas – UEA

Escola Superior de Tecnologia- EST

Reitor:

Cleinaldo de Almeida Costa

Vice- Reitor:

Cleto Cavalcante de Souza Leal

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Israel Gondres Torne

Banca Avaliadora composta por:

Data da defesa: 20/12/2021

Prof. Dr. Daniel Guzmán Del Rio (Orientador)

Prof. Dr. Jozias Parente de Oliveira

Prof. Me. Bruno Gama Monteiro

CIP – Catalogação na Publicação

Silva, Juan Lennon Pimentel da

Estudo comparativo do desempenho de sistemas solares fotovoltaicos com otimizadores de potência que estão sujeitos a sombras parciais; [orientado por] Daniel Guzmán Del Rio. – Manaus: 2021.

53 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2021.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. otimizador de potência.

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS SOLARES
FOTOVOLTAICOS COM OTIMIZADORES DE POTÊNCIA QUE ESTÃO
SUJEITOS A SOMBRAS PARCIAIS.**

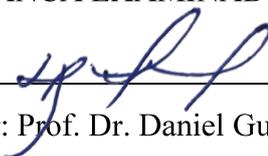
Monografia desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nota obtida: 9,0 (Nove pontos)

Aprovada em 20/12/2021 / _____

Área de concentração: Energias Renováveis

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Daniel Guzmán del Río



Avaliador 02: Prof. Dr. Jozias Parente de Oliveira



Avaliador 03: Prof. Ms. Prof. Bruno Gama Monteiro

Manaus

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, ministro Tavano, Adaman e todos os mentores que me auxiliaram nessa jornada. Ao meu pai José Francisco e minha mãe Luzia Pimentel que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para que nada me faltasse.

Agradeço também aos amigos que o IFAM me proporcionou e que carregou comigo até hoje: Victor Hugo, Ruan Carlos e Ana Rios. E ao mais antigo Ítalo Souza que sempre me incentivaram.

Aos meus amigos que o UEA e a Equipe Leviatã me proporcionaram: Catarine Gamboa, Matheus Câmara, Juliana Leão, Alexandre Santos e Fabielle Freitas.

A toda equipe da Criteria Energia, em especial aos meus amigos e chefes Jhordan Dias, Fabio Wesen e Carlos Chirano.

E por último, mas não menos importante, meu orientador professor Daniel Guzman del Rio.

RESUMO

Com a crescente demanda energética fontes de energia renováveis vêm ganhando cada vez mais destaque, em especial a energia solar fotovoltaica. Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de um sistema solar fotovoltaico submetido a dois níveis de sombreamento parcial e avaliar o real ganho da utilização de otimizadores de potência, para isso dispôs-se de uma planta solar fotovoltaica já em funcionamento capaz de enviar relatórios diários detalhados da energia gerada e da variação de potência ao decorrer dos testes. Para avaliar o desempenho foram utilizados diversos indicadores técnicos e econômicos como valor presente líquido, taxa de investimento de retorno, *payback*, *system yield* e eficiência de otimização. Ao analisar os indicadores resultantes dos dois testes realizados, foi possível mensurar o ganho real que a implementação do otimizador de energia pode trazer ao sistema, tornando cada vez mais conhecidos os benefícios de sua utilização, incentivando sua utilização. Resultando em uma melhora significativa nos indicadores técnicos e econômicos de todos os cenários de testes.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, otimizador de potência.

ABSTRACT

With the growing energy demand, renewable energy sources are gaining more and more prominence, especially photovoltaic solar energy. This work aimed to study the behavior of a solar photovoltaic system submitted to partial shading, and evaluate the real gain of using power optimizers, for this it has a photovoltaic plant already in operation capable of sending detailed daily reports of the energy generated and the power variation during the tests. To evaluate the performance several technical and economic indicators were used such as net present value, investment rate of return, payback, system yield and optimization efficiency. By analyzing the indicators resulting from the two tests performed, it was possible to measure the real gain that the implementation of the power optimizer can bring to the system, making the benefits of its use increasingly known, encouraging its use. Resulting in a significant improvement in the technical and economic indicators of all test scenarios.

Key Words: photovoltaic solar energy, power optimizer.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CC/CC - Corrente Contínua para Corrente Contínua

MPPT- *Maximum power point tracking*

P&O - Perturbação e Observação

PMP- Ponto de máxima potência

SIN - Sistema Interligado Nacional

STC - *Standard Testing Conditions*

UFV- Usina Solar Fotovoltaica

VPL - Valor Presente Líquido

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PONTO DE PMP	15
GRÁFICO 2 - CURVA I X V DE UM CONJUNTO DE MÓDULOS SUBMETIDO A SOMBREAMENTO PARCIAL.....	18
GRÁFICO 3 - CURVA P X V DE UM CONJUNTO DE MÓDULOS SUBMETIDO A SOMBREAMENTO PARCIAL.....	18
GRÁFICO 4 - FUNCIONAMENTO <i>DYNAMIC PEAK MANAGER</i>	25
GRÁFICO 5 - ENERGIA ANUAL ESPERADA	36
GRÁFICO 6 - CORRENTE POR MPPT	37
GRÁFICO 7 - TENSÃO POR MPPT.....	37
GRÁFICO 8 - ENERGIA GERADA POR MPPT	38
GRÁFICO 9 - DESEMPENHO SISTEMA OTIMIZADO	40
GRÁFICO 10 - DESEMPENHO SISTEMA SEM OTIMIZADOR.....	41
GRÁFICO 11 - PERCENTUAL DE GERAÇÃO PARA 25% DE SOMBREAMENTO.....	42
GRÁFICO 12- DESEMPENHO SISTEMA COM OTIMIZADOR.....	43
GRÁFICO 13 - DESEMPENHO SISTEMA SEM OTIMIZADOR.....	44
GRÁFICO 14 - ATUAÇÃO DO <i>DYNAMIC PEAK MANAGER</i>	44

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO BPSX120 (SIMULAÇÃO): (A) CURVA P x V COM TEMPERATURA FIXA; (B) CURVA P x I COM TEMPERATURA FIXA; (C) CURVA P x V COM RADIAÇÃO FIXA; (D) CURVA P x V COM RADIAÇÃO FIXA.	15
FIGURA 2-MÓDULO COMPOSTO POR 144 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	16
FIGURA 3 - FUNCIONAMENTO DIODO DE <i>BYPASS</i>	17
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO P&O	21
FIGURA 5- INVERSOR FRONIUS 8.2-1	23
FIGURA 6 - LAYOUT DA PÁGINA DE MONITORAMENTO FRONIUS.....	24
FIGURA 7 - PARÂMETROS DISPONÍVEIS NA INTERFACE DE MONITORAMENTO FRONIUS....	24
FIGURA 8 - MODELO SIMPLIFICADO LIGAÇÃO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA	26
FIGURA 9 - TIGO TS4-A-O	27
FIGURA 10 - PERCENTUAL DE PERDA ANUAL ESTIMADO	28
FIGURA 11 - DIVISÃO DOS <i>MPPT's</i>	32
FIGURA 12 - DISPOSIÇÃO DOS OBSTÁCULOS	33
FIGURA 13 - UFV COM 25% DE SOMBREAMENTO.....	33
FIGURA 14 - DISPOSIÇÃO DOS OBSTÁCULOS	34
FIGURA 15 - UFV COM 50% DE SOMBREAMENTO.....	34
FIGURA 16 - VISTA FRONTAL UFV	35
FIGURA 17 - SIMULAÇÃO UFV	35
FIGURA 18 - TIR NO BRASIL.....	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS ELÉTRICOS BYD 335PHK-36	19
TABELA 2 - PARÂMETROS ELÉTRICOS FRONIUS PRIMO 8.2-1	22
TABELA 3 - PARÂMETROS ELÉTRICOS TIGO TS4-A-O	27
TABELA 4 - DADOS DA UFV	31
TABELA 5 - ENERGIA ESPERADA ANUALMENTE.....	36
TABELA 6 - ENERGIA GERADA POR MPPT	38
TABELA 7 - ENERGIA GERADA POR MPPT PARA 25% DE SOMBREAMENTO COM OTIMIZADOR.....	40
TABELA 8 - ENERGIA GERADA POR MPPT PARA 25% DE SOMBREAMENTO SEM OTIMIZADOR.....	41
TABELA 9 - ENERGIA GERADA POR MPPT PARA 50% DE SOMBREAMENTO COM OTIMIZADOR.....	42
TABELA 10 -ENERGIA GERADA POR MPPT PARA 50% DE SOMBREAMENTO SEM OTIMIZADOR.....	43
TABELA 11 - <i>PAYBACK</i> PARA 25% DE SOMBREAMENTO	45
TABELA 12 - <i>PAYBACK</i> PARA 50% DE SOMBREAMENTO.....	45
TABELA 13 - VPL PARA 25% DE SOMBREAMENTO.....	46
TABELA 14 - VPL PARA 50% DE SOMBREAMENTO.....	46
TABELA 15 - TIR PARA 25% DE SOMBREAMENTO	46
TABELA 16 - TIR PARA 50% DE SOMBREAMENTO	47
TABELA 17 - <i>SYSTEM YELD</i> SISTEMA 25% DE SOMBREAMENTO.....	48
TABELA 18- <i>SYSTEM YELD</i> SISTEMA 50% DE SOMBREAMENTO	48
TABELA 19 - EFICIÊNCIA DE OTIMIZAÇÃO SISTEMA 25% DE SOMBREAMENTO	48
TABELA 20 - EFICIÊNCIA DE OTIMIZAÇÃO SISTEMA 50% DE SOMBREAMENTO	49

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Módulo fotovoltaico	14
1.2 Ponto de máxima potência (PMP)	15
1.3 Diodo de by-pass	16
1.4 Efeitos de sombreamento.....	17
1.5 Módulo solar BYD 335 Watt- pico.....	19
1.6 Algoritmo maximum power point tracking (MPPT)	20
1.7 Inversor	21
1.8 Dynamic Peak Manager.....	25
1.9 Otimizadores de potência.....	25
1.10 <i>Software</i> de simulação PV*Sol.....	27
1.11 Indicadores de performance.....	28
1.11.1 <i>System Yield</i>	28
1.12 Estudos de investimento	29
1.12.1 Valor Presente Líquido (VPL).....	29
1.12.2 Payback.....	30
1.12.3 Taxa de investimento de retorno (TIR)	30
2 METODOLOGIA.....	31
2.1 25% de sombreamento.....	33
2.2 50% de sombreamento.....	34
3 RESULTADO E DISCUSSÕES	35
3.1 Sombreamento de 25%	40
3.2 Sombreamento 50%.....	42
3.3 Indicadores econômicos.....	45
3.3.1 <i>Payback</i>	45
3.3.2 Valor presente líquido	46
3.3.3 Taxa de investimento de retorno (TIR)	46
3.4 Indicadores Técnicos	48
3.4.1 System yeld	48
3.4.2 Eficiência de otimização.....	48
CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS	52

INTRODUÇÃO

O uso de energia é um dos principais constituintes da sociedade moderna. Desenvolvimento econômico, industrialização e altos padrões de vida são processos que necessitam de um abastecimento adequado e confiável de energia. As crises energéticas da década de 70 do século XX trouxeram uma maior percepção de como a energia é essencial para o dia a dia de nossa sociedade, uma preocupação cada vez maior com o ambiente e seu uso de forma mais sustentável. Dessa forma, o público consumidor começou a buscar ser autossuficiente em energia obtendo uma fonte energética própria, além de ter a opção de escolher seu próprio fornecedor de energia. Essas exigências provocaram gradualmente uma forte mudança no perfil da indústria de geração de eletricidade para um ambiente menos burocrático e mais competitivo. E é exatamente nesse panorama de consumo que as fontes alternativas como energia eólica e solar vem ganhando destaque (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Os consumidores têm usado cada vez mais a energia solar fotovoltaica como aliada para contornar o aumento anual do valor da tarifa de energia, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) entre os anos de 2019 e 2020 houve um aumento de 63% da potência instalada de usinas solares fotovoltaicas em todo território nacional, passando de 4.582,8 para 7.469,6 MW e com projeção de até o final de 2021 atingir 12.561,5 MW (PORTAL SOLAR, 2021). Neste trabalho, propõe-se mensurar a eficácia do uso de otimizadores de potência em usinas solares fotovoltaicas (UFV) sujeitas a sombreamento parcial, pois a redução de perdas possibilita um aumento na geração o que reflete positivamente nos indicadores técnico e econômicos que serão abordados neste trabalho. Ao coletar os dados de geração usando-se indicadores como *payback*, valor presente líquido e *system yield*.

Ao analisar o funcionamento dos componentes de uma usina solar fotovoltaica é possível compreender seu comportamento quando submetida a sombreamentos parciais. Foi feita uma pesquisa bibliográfica nos assuntos pertinentes a pesquisa, bem como o funcionamento dos seus principais componentes, com isso foi possível elaborar uma sequência de testes responsáveis por fazer com o sistema seja submetido a perturbações, com isso os indicadores técnico e econômicos puderam ser calculados para por fim avaliar o desempenho da implementação dos otimizadores de potência.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

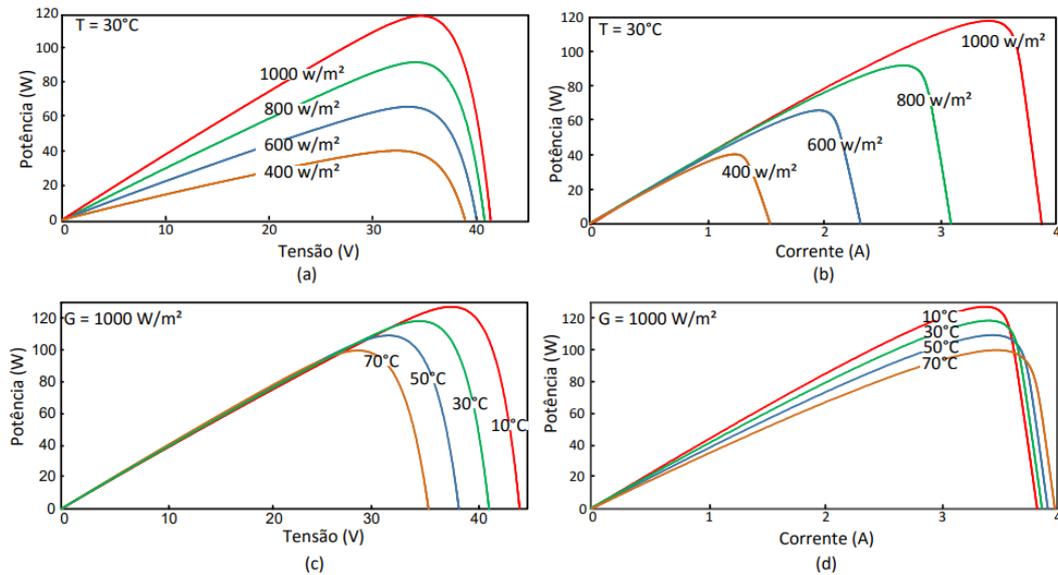
1.1 Módulo fotovoltaico

O painel ou módulo fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas montadas em uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Uma célula é o dispositivo básico que produz pouca energia e possui uma tensão elétrica muito baixa, por isso a necessidade de associação de várias células em série e paralelo para aumentar a tensão e a corrente elétrica respectivamente, a associação de módulos em série é denominada *string* (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Módulos fotovoltaicos podem ser rígidos ou flexíveis, característica que é definida pelo tipo de célula fotovoltaico que é utilizada em sua construção, quando rígidos geralmente são protegidos por uma ou mais camadas de vidro laminado e uma moldura metálica, são os mais utilizados mundialmente. Por outro lado, podem ser também flexíveis, geralmente tem sua utilização em veículos de alta performance, tendo em vista que combinam uma alta eficiência com um peso reduzido, porém com um custo significativamente mais elevado.

Como é possível verificar na figura 1 – (b) para uma temperatura fixa, os valores de corrente variam expressivamente à medida que a irradiância muda, enquanto que a figura 1 – (a) mostra que os valores de tensão apresentam apenas uma ligeira variação. Por outro lado, quando a irradiância é fixa e os valores de temperatura são alterados, é perceptível que os valores de tensão são quem apresentam significativa mudança e os de corrente se apresentam estáveis como ilustram as figuras 1 – (c) e 1- (d). Com isso fica claro que a corrente de saída dos módulos é muito sensível a quaisquer mudanças nos valores de irradiância, enquanto a tensão de saída é mais suscetível a mudanças de temperatura.

Figura 1 - Curvas características do painel solar fotovoltaico BPSX120 (simulação): (a) Curva P x V com temperatura fixa; (b) Curva P x I com temperatura fixa; (c) Curva P x V com radiação Fixa; (d) Curva P x I com radiação fixa.

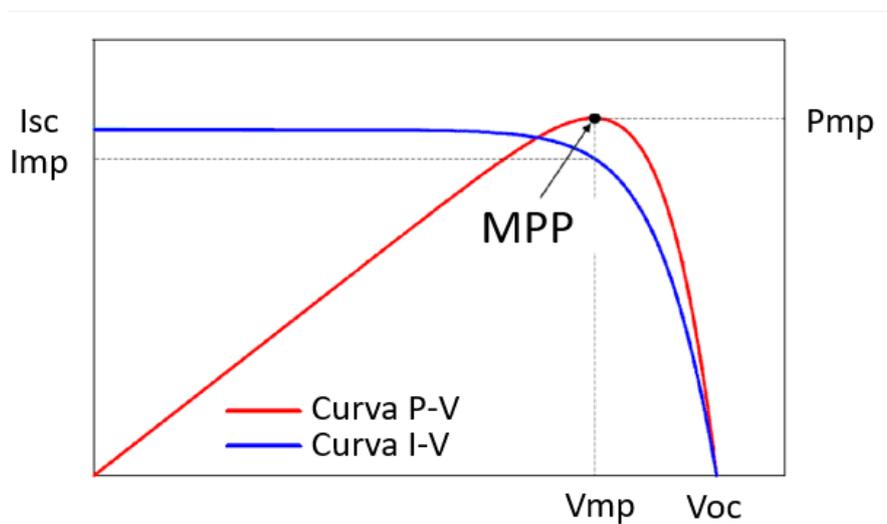


Fonte: Lobato, 2015

1.2 Ponto de máxima potência (PMP)

Trata-se da região ótima de trabalho do módulo ou conjunto de módulos associados, pode ser encontrado ao sobrepor suas curvas I x V e P x V. Ao relacionar tensão e corrente é possível encontrar a maior potência a ser gerada por estes, o que reflete maior geração de energia elétrica. O ponto PMP pode ser visualizado abaixo no gráfico 1.

Gráfico 1 - Ponto de PMP

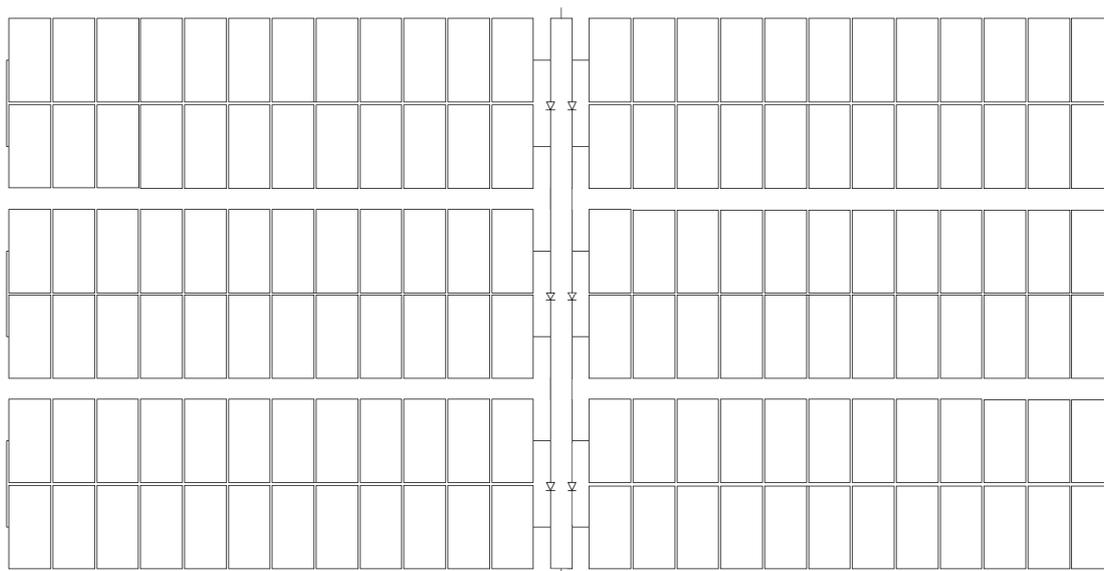


Fonte: CANAL SOLAR, 2019

1.3 Diodo de by-pass

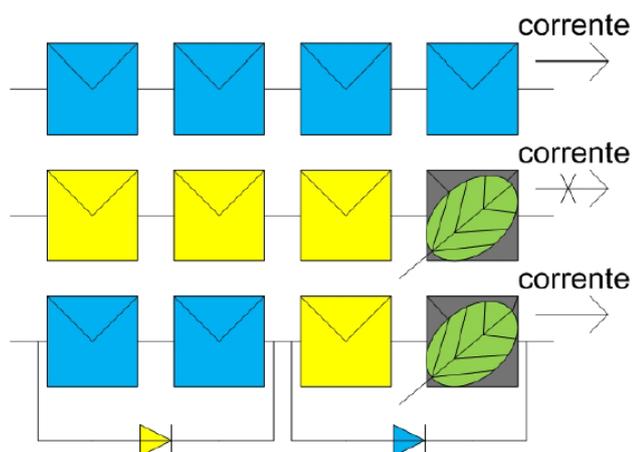
Para minimizar a ocorrência de pontos quentes os módulos fotovoltaicos são dotados de diodos de desvio (by-pass), que limitam a dispersão de potência na forma de calor nas células ao oferecer um caminho de menor resistência para a corrente elétrica, garantindo a segurança na instalação e manutenção da vida útil dos módulos. Como é possível visualizar na figura 2.

Figura 2-Módulo composto por 144 células fotovoltaicas



Fonte: Autor

O modelo que será usado neste trabalho trata-se de um módulo do tipo *Half cell* que possui o dobro do número de diodos de by-pass de um módulo tradicional, totalizando 6. Cada conjunto de 24 células é ligado em paralelo com um diodo de by-pass, caso uma delas seja sombreada, o diodo entra em condução e faz com que a corrente passe por ele e não mais pelo conjunto a corrente do arranjo.

Figura 3 - Funcionamento diodo de *bypass*

Fonte: Moreira, 2018

A figura 3 mostra um arranjo de 4 células fotovoltaicas ligadas em série em três diferentes situações: Na primeira, a corrente flui livremente sem obstáculos, já na segunda a corrente é bloqueada pela presença de sombreamento na última célula o que gera um ponto quente e no terceiro caso a última célula ainda está sujeita a um sombreamento, mas como esse arranjo está equipado com dois diodos de *bypass* a corrente encontra um caminho alternativo, evitando a criação de um ponto de aquecimento e diminuindo a perda de geração.

1.4 Efeitos de sombreamento

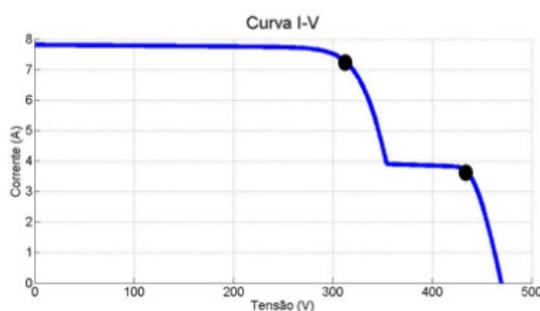
Tendo em vista que os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas associadas em série, quando as células de um mesmo conjunto recebem diferentes quantidades de radiação solar a corrente de todo o conjunto se limitará a que está recebendo radiação solar com menor intensidade. Fatores externos podem contribuir com essa diminuição como: sombreamento parcial dos módulos, acúmulo de detritos em sua superfície, dentro outros (CANAL SOLAR, 2020).

A corrente elétrica que está sendo limitada acaba sendo dissipada na forma de calor na célula com menor radiação, o que ocasiona um efeito denominado ponto quente que pode danificar permanentemente o módulo fotovoltaico e em casos extremos ocasionar incêndios.

Outra consequência do sombreamento parcial é o surgimento de um ou mais pontos de máximo local, o que dependendo da tecnologia aplicada no algoritmo de

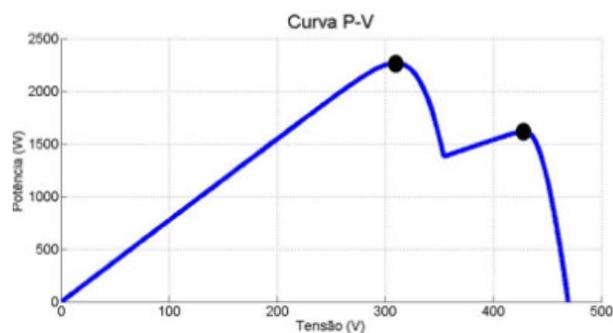
maximum power point tracking (MPPT) faz com o que o mesmo fique preso nesse ponto e jamais alcance o ponto de máxima potência global, diminuindo assim a potência proveniente dos módulos e conseqüentemente a energia gerada. Nos gráficos 2 e 3 podem ser visualizadas as curvas I x V e P x V de uma *string* submetida a sombreamento parcial, é possível visualizar que a *string* fica presa em um ponto de máximo local, que é significativamente menor do que o ponto de máximo global, isso implica em menos potência de saída e conseqüentemente menos energia gerada.

Gráfico 2 - Curva I x V de um conjunto de módulos submetido a sombreamento parcial



Fonte: CANAL SOLAR, 2020

Gráfico 3 - Curva P x V de um conjunto de módulos submetido a sombreamento parcial



Fonte: CANAL SOLAR, 2020

1.5 Módulo solar BYD 335 Watt- pico

Na tabela 01 é possível encontrar os principais parâmetros elétricos disponibilizados pelo fabricante, no caso do fabricante BYD modelo PHK-36- SÉRIE-4BB.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos BYD 335PHK-36

Fabricante	BYD
Modelo	335PHK-36
Tipo de célula	4 Bus Bar Solar Half Cell 155.75x 78.735mm
Número de células	144 (6 x 24) unidades
Dimensões	1992 x 992 x 35mm
Massa	22,2 kg
Caixa de junção	IP67
Potência máxima em STC (Pmax)	335 W
Tensão máxima de funcionamento (Vmp)	38,10 V
Tensão de circuito aberto (Voc)	45,44 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,25 A
Corrente de potência de pico (Imp)	8.79 A
Eficiência	16.95 %

Fonte: BYD, 2017

Quando se trata de dimensionamento de um arranjo fotovoltaico, os principais parâmetros a serem levados em consideração são:

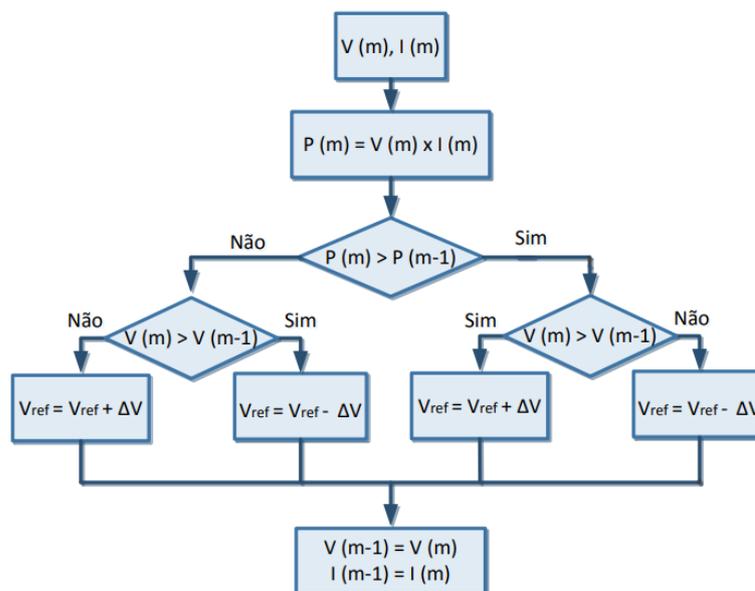
- Potência máxima de saída em *Standard Testing Conditions* (STC) (Pmax)(Watt-pico): é o quanto de potência cada módulo fotovoltaico pode entregar para o sistema em STC de funcionamento (1000 W/ m²), distribuição espectral para massa de ar de 1,5 e a temperatura da célula é de 25°C;

- Tensão de circuito aberto (V_{oc})(V): é a tensão contínua que pode ser medida nos terminais dos módulos fotovoltaicos quando estes não estão alimentando nenhum equipamento, importante para dimensionamento de conjunto das *strings*, pois inversores e os próprios módulos fotovoltaicos tem uma limitação quanto a tensão máxima do sistema;
- Tensão em máxima potência (V_{mp}) (V): Tensão de trabalho de cada módulo fotovoltaico quando este se encontra no seu ponto ótimo de trabalho;
- Corrente de curto-circuito(A): corrente máxima proveniente do módulo quando o mesmo tem seus terminais curto circuitados, parâmetro muito utilizado, pois a entrada dos inversores trabalha com faixas limitadas de corrente;
- Corrente em máxima potência (I_{mp}): Corrente proveniente do módulo quando o mesmo está no seu ponto ótimo de trabalho;
- Eficiência (η): É o parâmetro que define a efetividade do processo de conversão de energia. Pode ser obtido a partir da razão entre a máxima potência da célula e o produto da área da célula com a irradiância solar incidente.

1.6 Algoritmo maximum power point tracking (MPPT)

Ao longo do dia os valores de irradiância e temperatura nos módulos fotovoltaicos sofrem variações e conseqüentemente a potência entregue pelo sistema também, uma das técnicas usadas para garantir que os módulos sempre entregarão a maior potência possível são os rastreadores de máximo ponto de potência. Existem diversas técnicas de implementação, porém a mais utilizada é a perturbação e observação, pois possui um custo de implementação relativamente baixo e apresenta um resultado satisfatório. Na figura 4 é possível visualizar um fluxograma que explica de maneira simplificada o funcionamento desse algoritmo.

Figura 4 - Fluxograma do algoritmo P&O



Fonte: Lobato, 2015

No método perturbação e observação são feitas perturbações nos valores de tensão e corrente a fim de que os módulos trabalhem sempre em sua região de maior potência. Se a iteração resultar em um aumento de potência de saída, o algoritmo continua fazendo perturbações no mesmo sentido, caso ocorra decréscimo de potência, as iterações seguintes serão no outro sentido (LOBATO, 2015)

A variação de tensão (dV) é de suma importância para uma boa otimização do algoritmo, pois valores muito pequenos fazem com que sejam necessárias muitas iterações para encontrar o ponto ótimo, por outro lado, valores de dV muito grandes podem fazer com que o algoritmo fique flutuando ao redor do ponto de máxima potência e nunca o encontre de fato.

1.7 Inversor

O inversor é um dispositivo eletrônico responsável por transformar a energia em corrente contínua (C.C.) proveniente dos módulos fotovoltaicos para energia em corrente alternada (C.A.). Segundo Pinho e Galdino (2014), a tensão de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas que serão alimentadas.

Dentre as topologias de inversores os mais utilizados são os chamados inversores de *string* e os micro inversores, tendo características construtivas, parâmetros elétricos e modo de instalação diferentes. Enquanto os inversores de *string* são unidades de

conversão centralizados e trabalham sempre com o conjunto de módulos associados em série ou em paralelo dispondo de algoritmos *MPPT's* para que cada *string* trabalhe sempre no seu ponto ótimo, os micro inversores em sua maioria operam com no máximo 4 módulos fotovoltaicos que são tratados com *MPPT's* separados, o que faz com que essa topologia tenha desempenho melhor em situações de sombreamento parcial.

Na tabela 02 é possível encontrar os dados fornecidos pelo fabricante do inversor Fronius, modelo 8,2 kW que pode ser visto na figura 5 que será utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 2 - Parâmetros elétricos Fronius Primo 8.2-1

Fabricante	Fronius
Modelo	Primo 8.2-1
Máxima corrente de entrada (Idc Max 1/2)	18 A
Max. Conjunto corrente de curto-circuito	27 A
Mínima tensão de entrada (Udc min)	80 V
Tensão nominal de entrada (Udc,r)	710 V
Faixa de tensão MPP (Umpp min -Umpp máx)	270 – 800 V
Número de rastreadores MPP	2
Potência nominal de saída	8200 W
Max corrente de saída	35,7 A
Fator de potência	0,85 -1. ind./ cap.
Eficiência	97,8 %
Máxima tensão de entrada	1000 V

Fonte: Fronius, 2016

Os dados mais importantes para a elaboração de um projeto são:

- Máxima corrente de entrada: É a maior corrente suportada por cada entrada do inversor, com ela é possível calcular quantas *strings* em paralelo cada entrada suporta, o que vai depender da corrente I_{sc} do módulo fotovoltaico.
- Mínima tensão de entrada: Menor tensão que pode ser ligada em cada entrada do inversor, tensões abaixo desse valor não são reconhecidas pelo inversor, fazendo com que o mesmo não entenda que está sendo alimentado.
- Máxima tensão de entrada: Limite de tensão que cada entrada do inversor suporta, dispondo também da tensão de circuito aberto de cada módulo é possível calcular o número de módulos associados em série em cada conjunto.
- Potência nominal de saída: A maior potência que o inversor conseguirá injetar na rede.
- Faixa de tensão MPP: Faixa de tensão que o inversor consegue fazer com que a *string* entregue o máximo de potência.
- Fator de potência: Relação entre potência aparente e ativa que o inversor pode injetar na rede, podendo ser ajustado a fim de compensar eventuais reativos causados pelas demais cargas da instalação.

Figura 5- Inversor Fronius 8.2-1

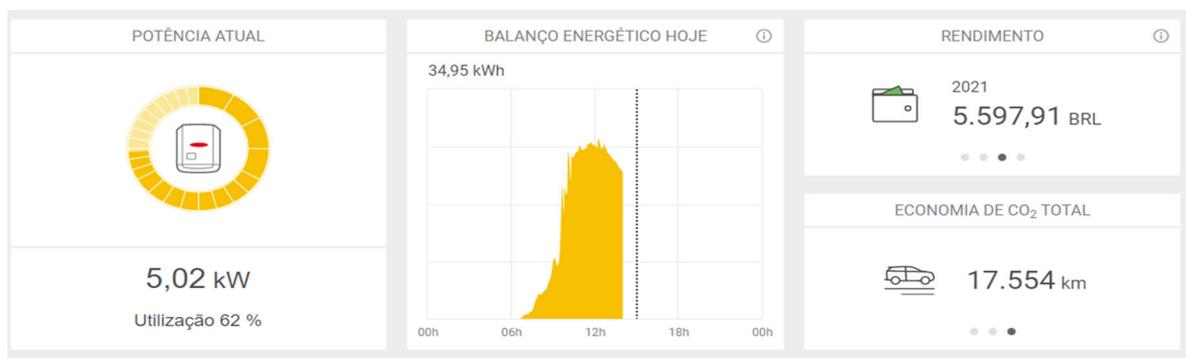


Fonte: Fronius, 2016

Diversas marcas de inversores dispõem de uma plataforma para monitoramento remoto dos parâmetros elétricos tanto de entrada quanto de saída do inversor em tempo real, os dados geralmente são salvos em servidores remotos, possibilitando além da avaliação do desempenho geral da usina, como também o de cada conjunto de placas. Algumas marcas possibilitam também a alteração de diversos parâmetros elétricos remotamente como fator de potência, potência máxima de saída e até mesmo o desligamento parcial ou total da usina.

A interface de monitoramento da fabricante Fronius pode ser observada na figura 6, nela são mostrados dados como: balanço energético, potência atual do sistema e o rendimento diário.

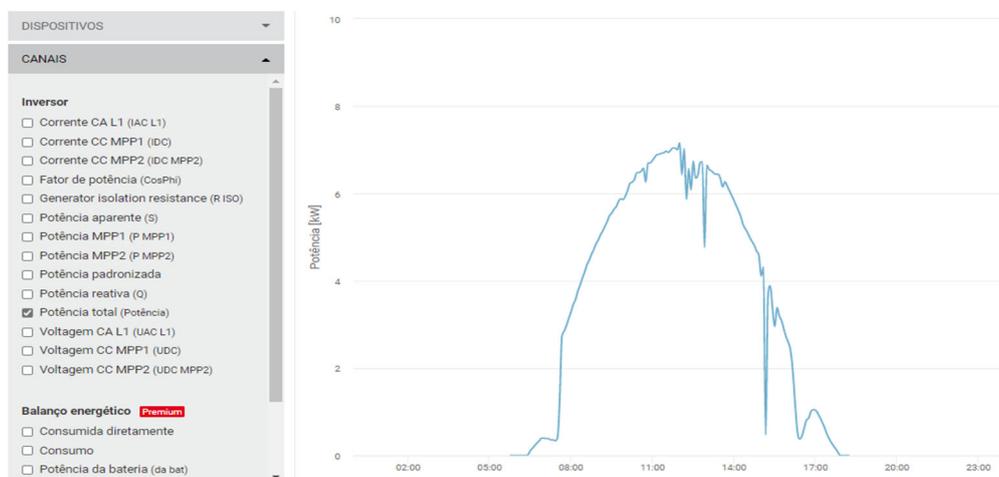
Figura 6 - Layout da página de monitoramento Fronius.



Fonte: Autor

Na figura 7 são mostrados os dados complementares disponíveis na plataforma junto com uma curva de produção diária.

Figura 7 - Parâmetros disponíveis na interface de monitoramento Fronius

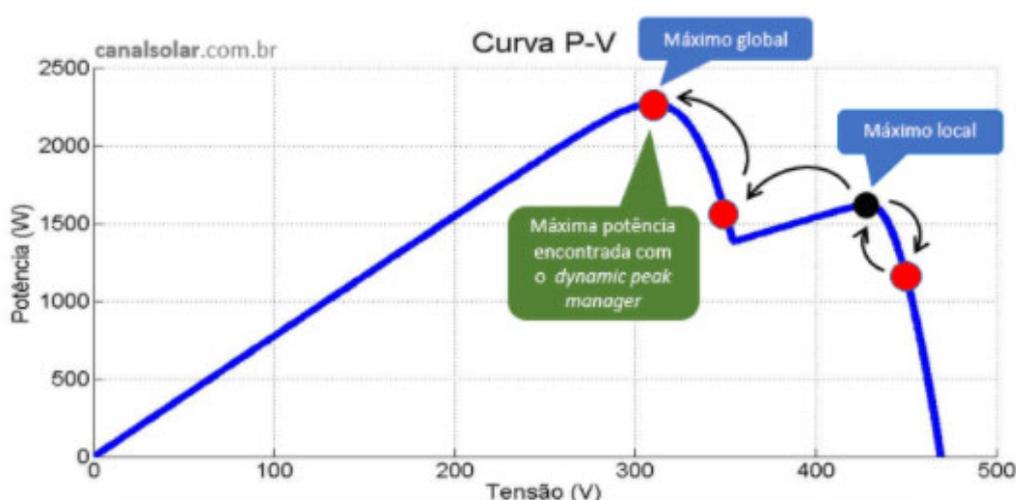


Fonte: Autor

1.8 Dynamic Peak Manager

Para lidar com sombreamento parcial fabricantes de inversores por vezes investem no desenvolvimento e implementação de algoritmos para complementar o já existente MPPT. A fabricante Fronius implementou um algoritmo chamado *Dynamic peak manager*. Seu princípio de funcionamento é relativamente simples, durante o funcionamento do inversor, caso o mesmo apresente um aumento de potência quando era esperado um decréscimo, o algoritmo entende que pode estar preso em um ponto de máximo local e começa a realizar maiores incrementos ou decrementos nos valores de tensão para verificar se o aumento de potência continua, com variações cada vez maiores o algoritmos consegue sair do ponto de máximo local e atingir o global, resultando em um aumento de potência. No gráfico 4 pode ser visto a ilustração do funcionamento do *Dynamic peak manager*.

Gráfico 4 - Funcionamento *dynamic peak manager*



Fonte: CANAL SOLAR, 2020.

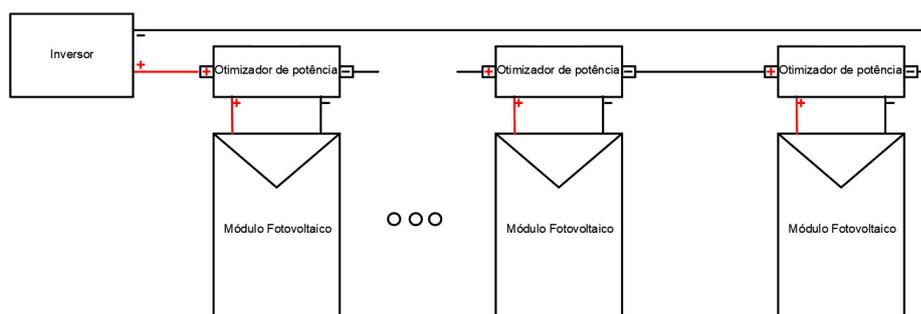
1.9 Otimizadores de potência

Durante o projeto de um sistema fotovoltaico diversos aspectos devem ser observados e um dos principais é a presença de sombras parciais, pois as mesmas alteram as curvas I-V e P-V da *string*, alterando a potência de saída e conseqüentemente a energia gerada pelo sistema, um dos recursos disponíveis no mercado para minimizar esses impactos são os otimizadores de potência.

O otimizador de potência é um dispositivo dotado de um conversor CC/CC (Corrente contínua para corrente contínua) que tem o objetivo de minimizar as perdas elétricas podendo ser elas de sombreamento, incompatibilidade elétrica (*mismatch losses*) ou diferentes níveis de irradiância, usualmente são instalados um por módulo fotovoltaico e são dotados de um algoritmo MPPT que faz com que cada módulo possa ser tratado individualmente e sua máxima potência possa ser extraída sem que os demais módulos da *string* sejam afetados. O uso de otimizadores de potência permite a maior flexibilidade no projeto fotovoltaico, pois é possível montar arranjos com diferentes potências, inclinações, orientações e quantidade de sombra (SILVA et al, 2019).

Como é possível observar na figura 8 os otimizadores de potência atuam em uma etapa de pré-processamento da energia proveniente dos módulos, não dispensando a utilização do inversor de *string* na composição da usina. Para a coleta e envio dos dados de cada otimizador a maioria dos fabricantes opta por usar um módulo de comunicação que precisa ser adquirido separadamente, o que faz com que o custo unitário de cada otimizador seja menor, pois tem em sua construção menos tecnologia embarcada. O funcionamento do sistema não é afetado pela ausência do módulo de comunicação, mas a sua implementação traz uma série de recursos adicionais como o monitoramento dos parâmetros elétricos de cada módulo e em caso de manutenção é possível desligar os módulos individualmente sem que isso afete toda a *string* (CANAL SOLAR, 2019).

Figura 8 - Modelo simplificado ligação sistema fotovoltaico com otimizador de potência



Fonte: Autor

Na tabela 03 são encontrados os dados disponíveis no *datasheet* do otimizador de potência da marca Tigo que será utilizado neste trabalho. E na figura 9 o otimizador pode ser visto.

Tabela 3 - Parâmetros elétricos Tigo TS4-A-O

Fabricante	Tigo
Modelo	TS4-A-O
Classificação externa	IP 68
Peso	520 g
Tensão total máxima de entrada	90V
Faixa de tensão	16 – 90 V
Corrente máxima	15A
Potência máxima	475 W

Fonte: Tigo, 2021

Figura 9 - Tigo TS4-A-O



Fonte: Tigo, 2021

1.10 Software de simulação PV*Sol

Uma maneira de prever com precisão a geração de energia elétrica de uma UFV é dispor de *softwares* capazes de simular tanto as características elétricas de inversores e módulos fotovoltaicos quanto às características físicas da instalação.

O PV*Sol é um *software* alemão próprio para modelagem de UFV, nele é possível desenhar objetos 3d presentes na instalação, estimar as perdas ocasionadas por eventuais obstáculos, perdas gerais, geração de energia elétricas estimada tanto em sistemas *on grid*

quanto em sistemas *off grid*, além da integração com estações de carregamento para veículos elétricos e otimizadores de potência (VALENTIN, 2021).

Na figura 10 é possível ver o percentual de perda anual estimado em uma UFV.

Figura 10 - Percentual de perda anual estimado



Fonte: Autor

1.11 Indicadores de performance

1.11.1 System Yield

O *System Yield* é um parâmetro que indica quantas horas por dia o sistema trabalhou em sua máxima potência, é dado pela equação:

$$Y_f = \frac{E_{PV \text{ produzida}}}{P_o} \quad [\text{kWh/kW ou horas}] \quad [1]$$

Temos que $E_{PV \text{ produzida}}$ é a energia produzida pelo sistema no dia e P_o é a potência instalada do sistema. Com este parâmetro é possível comparar a geração de energia do sistema em relação a sua potência instalada, o que permite que o desempenho de sistemas com diferentes potências possa ser comparado (MENDES, 2016).

Para calcular a diferença entre a geração da *string* equipada com o otimizador com a *string* sem o mesmo será utilizada a seguinte equação:

$$O_p = \frac{Y_{f_otimizado}}{Y_{f_sem_otimizador}} \times 100 \quad [\%] \quad [2]$$

Ao analisar o O_p será possível mensurar o desempenho da otimização e desta forma estimar o ganho com a adição do otimizador a UFV.

1.12 Estudos de investimento

1.12.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL é o método que consiste em trazer para a data zero todos os fluxos de caixa de um projeto de investimento e os somar ao valor do investimento inicial, utilizando como taxa de desconto a TMA (Taxa Mínima de Atratividade) (CAMARGO, 2017).

O VPL é a diferença entre os recebimentos e os pagamentos de um investimento com os valores monetários corrigidos, é dado pela equação:

$$\sum_{n=1}^N \frac{F_{ct}}{(1+i)^n} \quad [\text{R\$}] \quad [3]$$

VLP= Valor presente líquido (R\$);

Fc= Fluxo de caixa (R\$);

t= momento em que o fluxo de caixa ocorreu (Anos);

i= Taxa mínima de atratividade (TMA) (%);

n= período de tempo (Anos).

Caso o resultado da equação seja positivo, significa que as receitas serão maiores que as despesas, o que é um indicador de viabilidade do projeto, caso seja negativo, o projeto é inviável financeiramente, pois as despesas serão maiores que as receitas.

1.12.2 Payback

O *payback* é o tempo necessário para recuperar o custo de investimento. Seria a indicação do período de recuperação do investimento, o prazo no qual os rendimentos tornam-se iguais ao valor que foi investido (REIS, 2018).

$$Payback = \frac{FV}{(1+I)^N} \text{ [R\$]} \quad [4]$$

Onde FV é o valor futuro, I é a taxa de desconto e N é o período.

1.12.3 Taxa de investimento de retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR), é o indicador que, quando aplicado ao fluxo de caixa, transforma os valores de retorno iguais às despesas trazidas a valor presente (REIS, 2018). A equação para o cálculo do TIR é dada por:

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{(F_{ct})}{(1+TIR)^t} \quad [\%] \quad [5]$$

Onde:

t = Período em que ocorre o fluxo de caixa (Anos);

F_{ct} = fluxo de caixa do período t (R\$);

n = número total de períodos analisados (Anos).

2 METODOLOGIA

O trabalho é uma pesquisa aplicada tendo o objetivo de realizar uma pesquisa exploratória e explicativa sobre o material bibliográfico encontrado e os dados adquiridos por meio de simulação e em campo. Como procedimentos técnicos são utilizados pesquisa bibliográfica e experimental, a método de abordagem é o hipotético-dedutivo seguindo o método de procedimento monográfico.

Foi realizada uma vasta pesquisa bibliográfica nos temas pertinentes ao trabalho, sendo eles: funcionamento de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica, inversores fotovoltaicos, otimizadores de potência, efeitos do sombreamento parcial em UFV e *softwares* relacionados.

Os dados foram obtidos de uma UFV localizada na cidade de Manaus em funcionamento desde 2019, tendo uma produção de energia no ano de 2020 de 11,29 MWh.

Para a avaliação do desempenho da UFV foram utilizadas duas *strings* independentes de 13 módulos associados em série, onde uma será a referência e não sofrerá alterações ao longo dos testes tendo objetivo de indicar quanta energia o arranjo deveria produzir em condições ideais e a outra string será submetida a diferentes níveis de sombreamento parcial, inicialmente equipada com o otimizador de potência TS4-A-0, posteriormente o mesmo teste será refeito, dessa vez sem a presença o otimizador de potência para que possa ser avaliado o comportamento do sistema nas duas situações, sombreamento parcial com o otimizador e sem o mesmo. Usando os indicadores econômicos VPL, *payback* e de performance system yield e desempenho de otimização se tornará possível avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação dos otimizadores de potência em usinas solares fotovoltaicas. Na tabela 4 podem ser visualizadas as características técnicas da UFV.

Tabela 4 - Dados da UFV

Potência instalada	8,71 kWp
Potência nominal	8,2 kW
Número de módulos	26
<i>Strings</i>	2
Inclinação	10 graus

Latitude	-3.0577654
Longitude	-59.974168

Fonte: Autor.

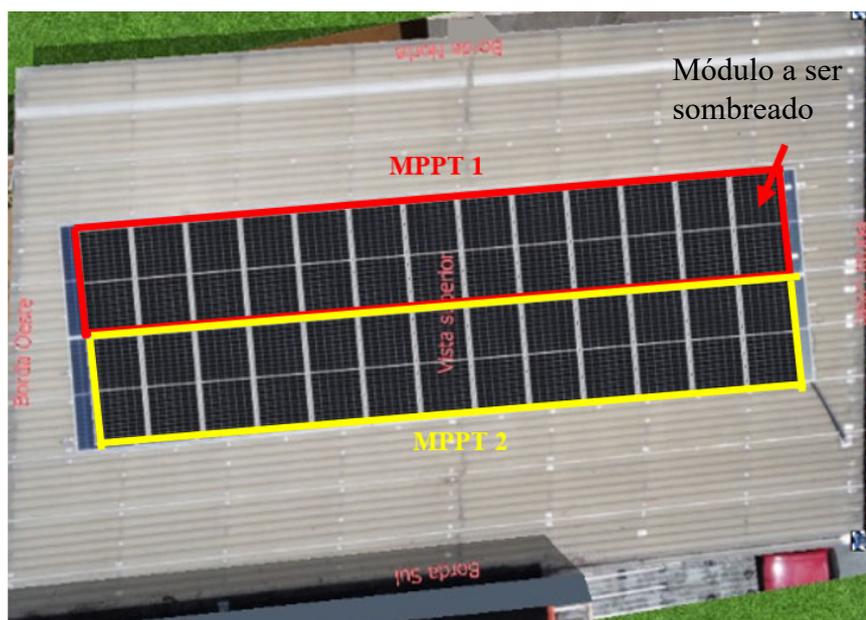
Os dados elétricos foram obtidos através da plataforma de monitoramento *SolarWeb*, onde pode ser selecionado o intervalo de tempo e as grandezas elétricas que serão mostradas, para o trabalho os mais importantes serão soma da energia gerada por MPPT ao final do dia para avaliar o desempenho da otimização e valores detalhados de tensão e corrente para ser possível traçar o gráfico de potência de saída de cada MPPT ao longo do dia.

Avaliando histórico da energia gerada pelos dois conjuntos de placas ao longo dos 18 meses de funcionamento anteriores ao início dos testes em campo, com o objetivo de encontrar a média da diferença de geração de energia entre os dois conjuntos de módulos em condições normais de funcionamento.

Com base em imagens de satélite e drone foi realizada a simulação da UFV afim de encontrar os valores estimados de geração de energia.

A disposição dos dois conjuntos de módulos pode ser visualizada na figura 11, onde os dois encontram-se lado a lado, o sombreamento parcial será induzido no primeiro módulo da do MPPT1.

Figura 11 - Divisão dos *MPPT's*

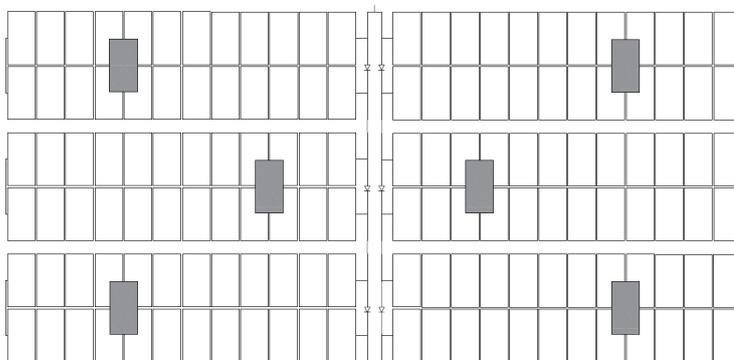


Fonte: Autor.

2.1 25% de sombreamento

Antes de iniciar os testes de campo foi realizada a limpeza dos módulos afim de que os efeitos de sujidade sejam minimizados. O primeiro teste foi o com sombreamento de 25% da área da célula fotovoltaica com o otimizador de potência no módulo sombreado, para isso foi necessário cobrir um quarto da área de uma célula fotovoltaica em cada um dos seis arranjos e instalar o otimizador de potência como é possível visualizar nas figuras 12 e 13. Após 10 dias de coleta de dados, os módulos foram novamente lavados, o otimizador retirado e os dados foram coletados novamente por 10 dias.

Figura 12 - Disposição dos obstáculos



Fonte: Autor

Figura 13 - UFV com 25% de sombreamento

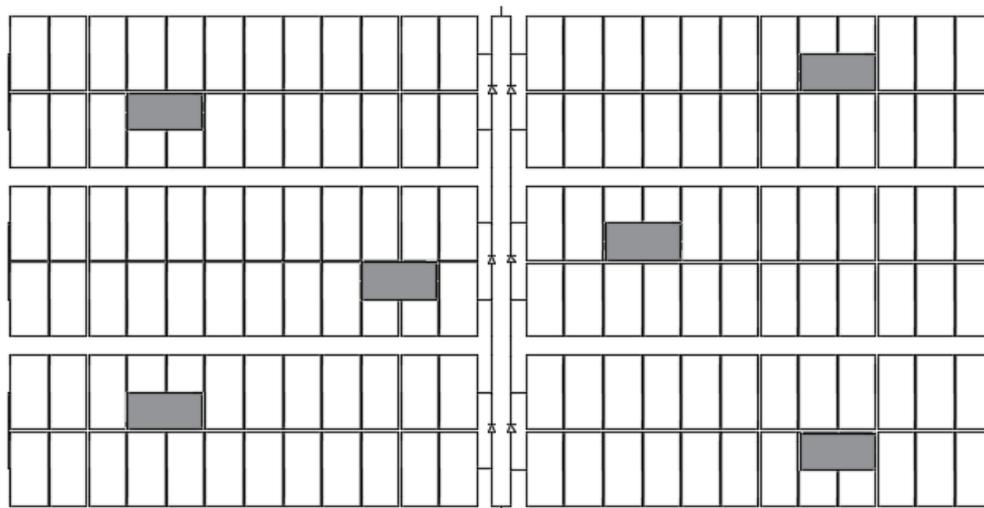


Fonte: Autor

2.2 50% de sombreamento

Para o início do segundo teste os módulos foram novamente lavados a posição do objeto responsável por realizar o sombreamento foi alterada de tal forma que o mesmo agora cubra 50% da área da célula fotovoltaica, como pode ser visto nas figuras 14 e 15.

Figura 14 - Disposição dos obstáculos



Fonte: Autor.

Figura 15 - UFV com 50% de sombreamento



Fonte: Autor.

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

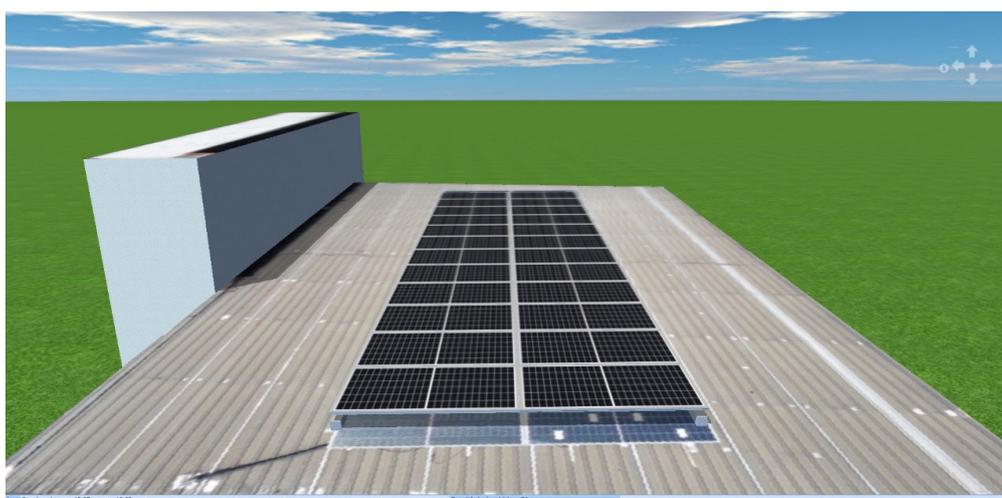
Com o auxílio do software *PVSol* foi realizada a simulação da UFV, a fim de encontrar sua geração anual esperada e o percentual de sombreamento existente. Nas figuras 16 e 17 é possível visualizar a UFV existente e o resultado da simulação.

Figura 16 - Vista frontal UFV



Fonte: Autor.

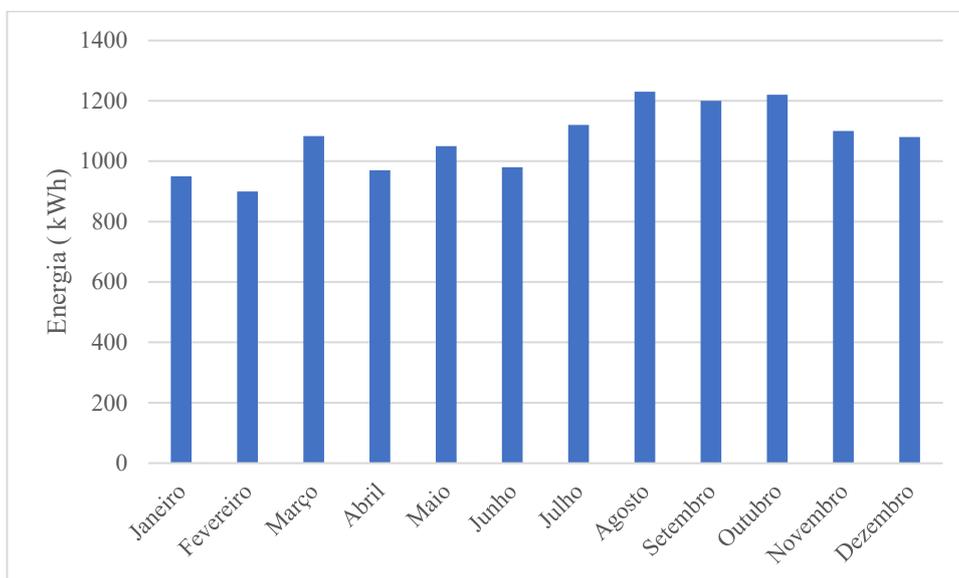
Figura 17 - Simulação UFV



Fonte: Autor.

Ao realizar a simulação da UFV pôde ser visto que esta se encontra livre de sombreamento parcial em ambas *strings*. A geração média de energia elétrica mensal e a variação esperada ao passar dos meses pode ser encontrada no gráfico 5 e tabela 5.

Gráfico 5 - Energia anual esperada



Fonte: Autor.

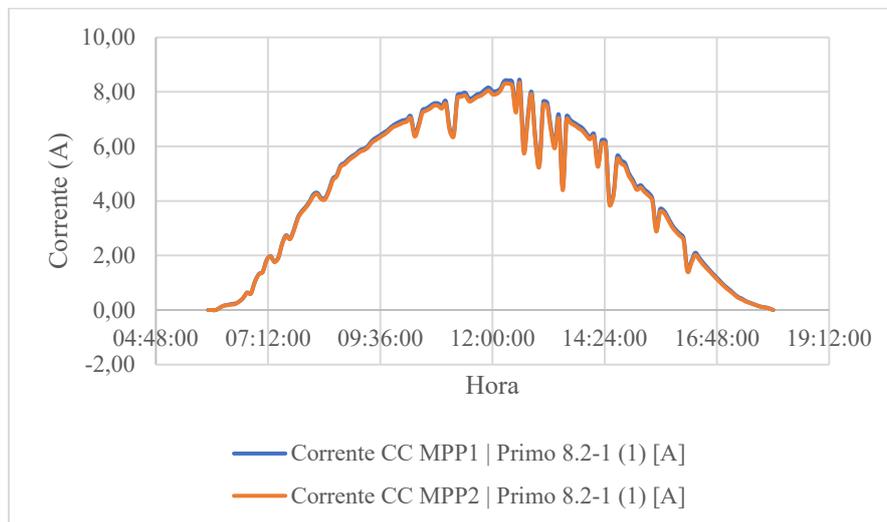
Tabela 5 - Energia esperada anualmente

Mês	Energia (kWh)
Janeiro	950
Fevereiro	900
Março	1083
Abril	970
Maio	1050
Junho	980
Julho	1120
Agosto	1230
Setembro	1200
Outubro	1220
Novembro	1100
Dezembro	1080
Energia Anual	12883

Fonte: Autor.

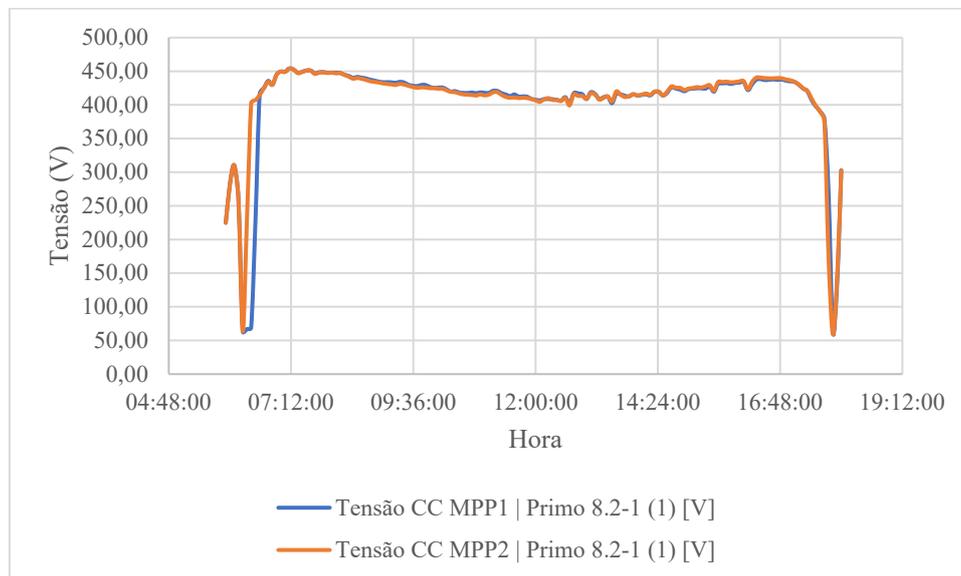
Os gráficos 6 e 7 apresentam a variação de corrente e tensão dos *MPPT's* em um dia anterior ao do início dos testes.

Gráfico 6 - Corrente por MPPT



Fonte: Autor.

Gráfico 7 - Tensão por MPPT

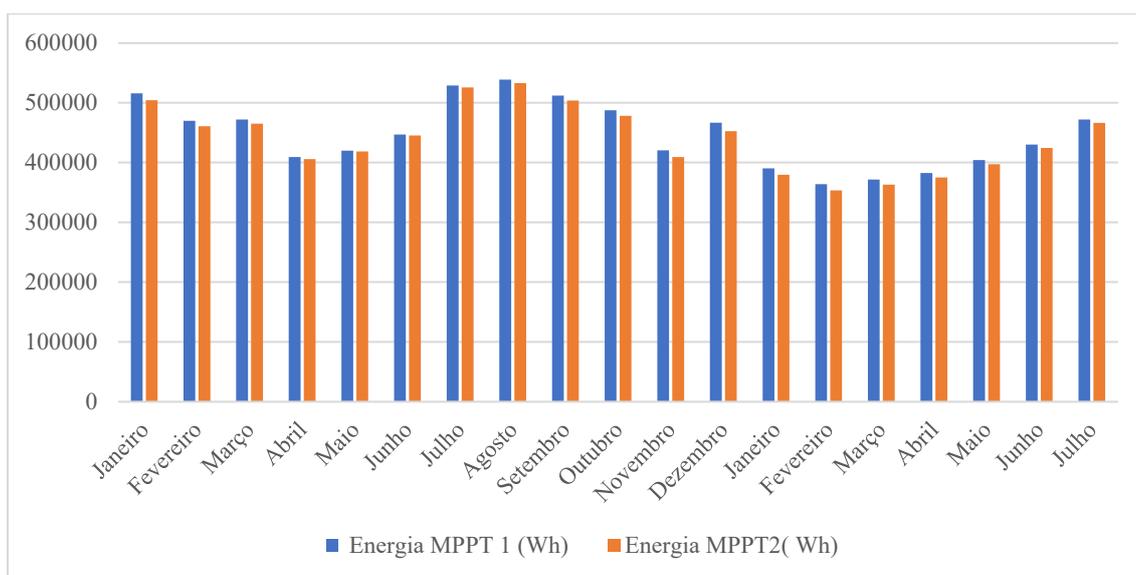


Fonte: Autor.

Ao analisar os gráficos é possível perceber que a tensão e corrente de ambos MPPT's apresentam valores muito semelhantes ao decorrer do dia, o que indica que a energia gerada por ambas apresenta valores muito próximos.

Na tabela 6 e gráfico 8 pode ser visto o histórico de geração de energia de cada conjunto de placas bem como sua diferença percentual no período de janeiro de 2020 a setembro 2021.

Gráfico 8 - Energia gerada por MPPT



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Energia gerada por MPPT

	Energia MPPT 1 (Wh)	Energia MPPT2 (Wh)	Δ %
Janeiro	515566,15	504179,32	97,79%
Fevereiro	469736,54	460540,7	98,04%
Março	471757,66	464938,19	98,55%
Abril	409072,1	405672,47	99,17%
Mai	419734,29	418485,61	99,70%
Junho	446660,95	445197,38	99,67%
Julho	528753,99	525654,82	99,41%
Agosto	538505,56	532809,57	98,94%
Setembro	511932,96	503720,5	98,40%
Outubro	487394,01	477872,78	98,05%
Novembro	420408,44	408989,17	97,28%

Dezembro	466470,93	452469,08	97,00%
Janeiro	390192,82	379375,89	97,23%
Fevereiro	363637,12	353210	97,13%
Março	371559,92	362792,4	97,64%
Abril	382290,09	374986,05	98,09%
Maio	404084,94	396999,02	98,25%
Junho	429878	424368	98,72%
Julho	471788,32	466129,13	98,80%

Fonte: Autor.

Ao longo dos 19 meses de funcionamento da UFV, em média o MPPT 1 gerou 1,69% mais energia que o MPPT2. Levando em consideração que os dois conjuntos de placas possuem orientação, ângulo de azimute e não estavam sujeitos a nenhum sombreamento parcial, pode-se afirmar que essa diferença se dá por incompatibilidade elétrica característica dos próprios módulos, não prejudicando os resultados encontrados no decorrer da pesquisa.

Como resultado da simulação o sistema de 8,71 kWp livre de sombreamento deve gerar em média 12 800 kWh anualmente.

O custo de implementação de um sistema de solar fotovoltaico de 8,71 kWp no ano de 2021, tem um custo estimado de R\$ 4,38/ Wp instalado, resultando em um investimento de R\$ 38 149,8 e o custo R\$ 550, 0 / otimizador instalado (Greener, 2021).

3.1 Sombreamento de 25%

Os dados coletados do primeiro experimento com 25% de sombreamento e com otimizador de potência podem ser vistos na tabela 7.

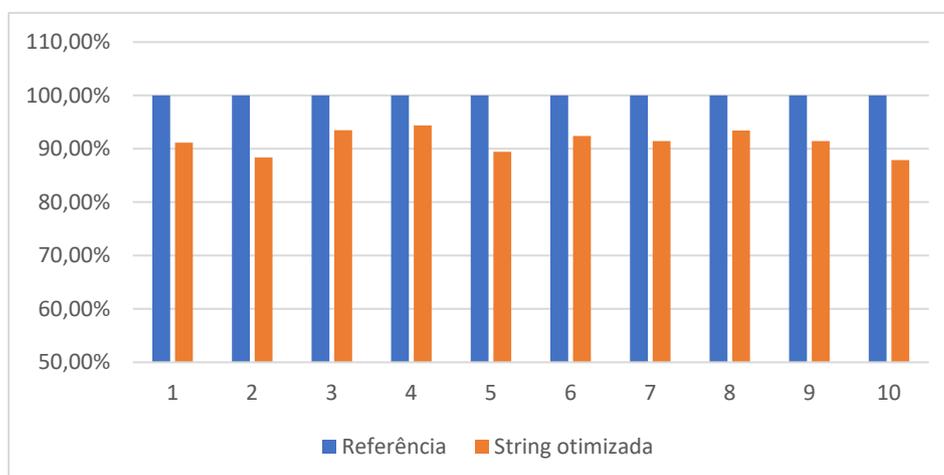
Tabela 7 - Energia gerada por MPPT para 25% de sombreamento com otimizador

	Energia MPPT 1	Energia MPPT 2	Δ %
dia 01	7059,32	7744,84	91,15%
dia 02	11483,6	12997,42	88,35%
dia 03	18278,92	19558,11	93,46%
dia 04	15807,58	16753,08	94,36%
dia 05	3604,06	4029,54	89,44%
dia 06	18856,77	20406,52	92,41%
dia 07	12835,07	14034,7	91,45%
dia 08	21773,24	23310,7	93,40%
dia 09	20442,51	22354,16	91,45%
dia 10	22634,12	25756,45	87,88%

Fonte: Autor.

Ao longo dos 10 dias de coleta de dados pôde ser observado que a string submetida ao sombreamento parcial gerou em média 91% da energia gerada pela string de referência. No gráfico 9 pode ser visto o comportamento do sistema, considerando a string de referência como 100%.

Gráfico 9 - Desempenho sistema otimizado



Fonte: Autor.

Na tabela 8 pode ser visto o resultado do teste de 25% de sombreamento sem o uso do otimizador de potência.

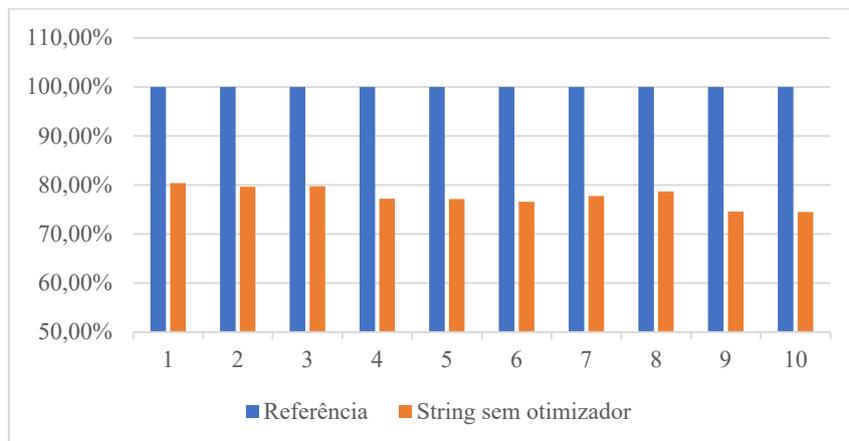
Tabela 8 - Energia gerada por MPPT para 25% de sombreamento sem otimizador

	Energia MPPT 1	Energia MPPT 2	Δ %
dia 01	20459,62	25452,012	80,39%
dia 02	12854,03	16141,419	79,63%
dia 03	5806,16	7282,744	79,72%
dia 04	14138,04	18317,279	77,18%
dia 05	15043,4	19507,302	77,12%
dia 06	18200,76	23767,163	76,58%
dia 07	16725,05	21512,628	77,75%
dia 08	9371,43	11911,163	78,68%
dia 09	22144,16	29683,861	74,60%
dia 10	13457,66	18063,973	74,50%

Fonte: Autor.

É possível verificar que o sistema sem o otimizador gerou em média 77,6% da energia gerada pela *string* de referência. No gráfico 10 pode ser visto o desempenho do sistema ao longo dos dias.

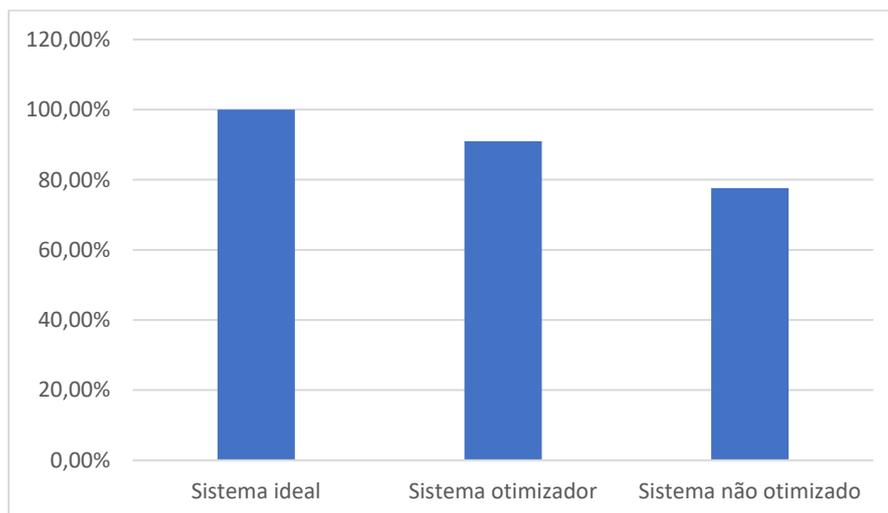
Gráfico 10 - Desempenho sistema sem otimizador



Fonte: Autor.

Como resultado dos testes um sistema com 25 % de sombreamento com otimizador de potência deve gerar 91 % da energia do sistema livre de sombreamento, enquanto que sem o otimizador a geração deve ser de 77,6 %. Como é possível verificar no gráfico 11.

Gráfico 11 - Percentual de geração para 25% de sombreamento



Fonte: Autor.

3.2 Sombreamento 50%

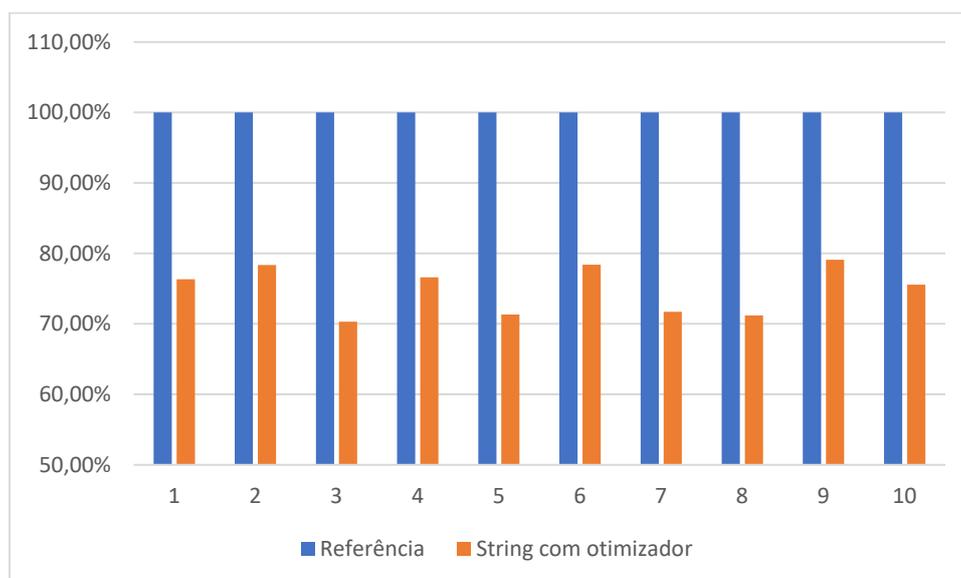
A geração de energia para um sombreamento de 50% utilizando otimizador pode ser visto na tabela 9 e gráfico 12.

Tabela 9 - Energia gerada por MPPT para 50% de sombreamento com otimizador

	Energia MPPT 1	Energia MPPT 2	Δ %
dia 01	8526,96	11170,74	76,33%
dia 02	8284,49	10573,23	78,35%
dia 03	11514,17	16379,34	70,30%
dia 04	4232,96	5525,47	76,61%
dia 05	13649,71	19136,40	71,33%
dia 06	10611,41	13535,58	78,40%
dia 07	9820,40	13694,29	71,71%
dia 08	10562,67	14839,00	71,18%
dia 09	99245,52	125493,08	79,08%
dia 10	128637,25	170263,02	75,55%

Fonte: Autor.

Gráfico 12- Desempenho sistema com otimizador



Fonte: Autor.

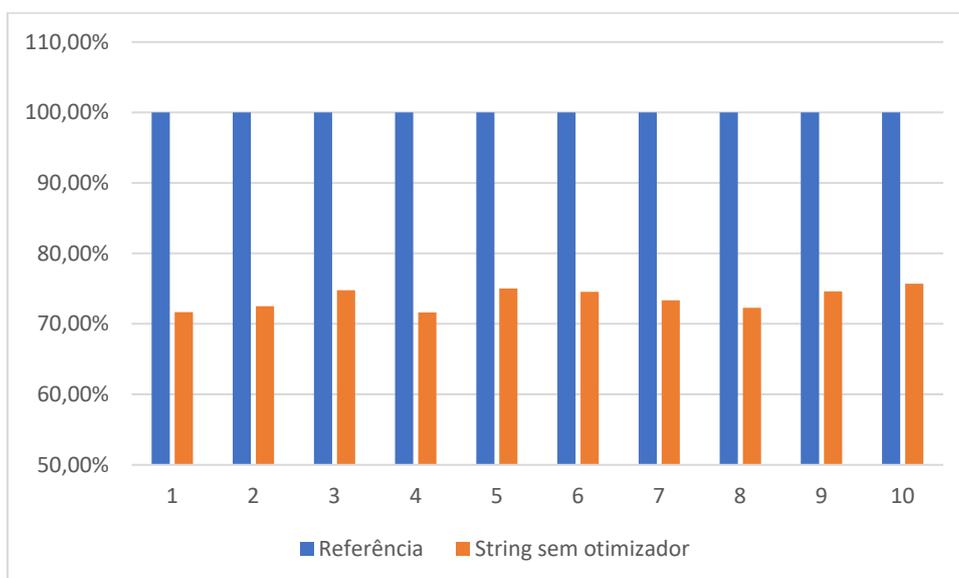
Ao repetir o teste sem o otimizador, os dados de energia podem ser encontrados nas tabelas 10 e gráfico 13.

Tabela 10 -Energia gerada por MPPT para 50% de sombreamento sem otimizador

	Energia MPPT 1	Energia MPPT 2	Δ %
dia 01	15209,25	21226,17	71,65%
dia 02	8631,80	11905,57	72,50%
dia 03	16809,65	22481,49	74,77%
dia 04	6707,37	9365,37	71,62%
dia 05	15010,42	20007,04	75,03%
dia 06	8327,19	11170,74	74,54%
dia 07	9123,82	12438,58	73,35%
dia 08	14362,26	19874,25	72,27%
dia 09	8109,43	10868,98	74,61%
dia 10	10509,33	13882,29	75,70%

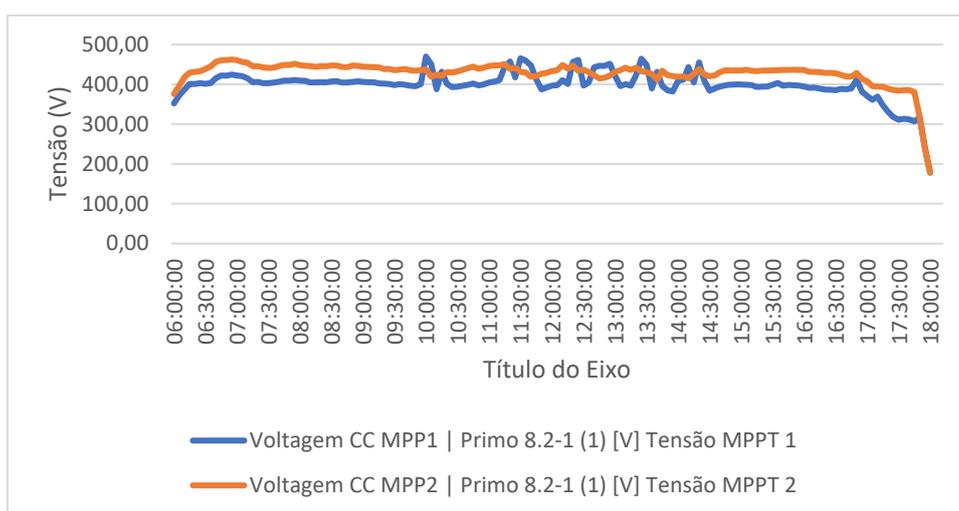
Fonte: Autor.

Gráfico 13 - Desempenho sistema sem otimizador



Fonte: Autor.

Ao fazer análise gráfica da tensão por MPPT ao longo dos testes foi possível identificar uma expressiva variação de tensão no MPPT 1, comportamento característico do algoritmo *Dynamic peak manager*, enquanto a corrente se manteve variando de acordo com a radiação solar incidente nos módulos. Tais comportamentos podem ser visualizados no gráfico 14.

Gráfico 14 - Atuação do *Dynamic peak manager*

Fonte: Autor.

O algoritmo detectou um aumento de potência durante uma iteração que deveria resultar em sua diminuição, então começou a realizar incrementos no valor de tensão a fim de aumentar a potência de saída do MPPT.

3.3 Indicadores econômicos

Considerando um investimento de R\$ 38 149,8 para a implementação do sistema não otimizado, um custo R\$ 550,00 por otimizador instalado e a tarifa de energia a R\$ 1,12/ kWh.

3.3.1 Payback

A implementação do sistema com otimizador de potência apresentou um tempo de retorno de investimento menor quando comparado ao sem otimizador, Na tabela 11 é possível ver o resultado do *Payback* do sistema com 25% de sombreamento, enquanto que na tabela 12 é mostrado o *Payback* do sistema com 50%.

Tabela 11 - *Payback* para 25% de sombreamento

Sistema	<i>Payback</i> (Anos)
Ideal	2,7
Otimizado	3,0
Não otimizado	3,6

Fonte: Autor.

Tabela 12 - *Payback* para 50% de sombreamento

Sistema	<i>Payback</i> (Anos)
Ideal	2,7
Otimizado	4,0
Não otimizado	4,4

Fonte: Autor.

Em ambos cenários de sombreamento a utilização do otimizador de potência faz com que o tempo de retorno do investimento seja menor quando comparado ao mesmo sistema não otimizado.

3.3.2 Valor presente líquido

Analisando o VPL dos três tipos de sistema ao longo de 5 anos e utilizando a taxa Sistema Especial de Liquidação e Custódia (Selic como parâmetro, os resultados podem ser vistos na tabela 13 para 25% de sombreamento e tabela 14 para 50%.

Tabela 13 - VPL para 25% de sombreamento

Sistema	VPL (R\$)
Ideal	17975,8
Otimizado	12374,5
Não otimizado	5403,7

Fonte: Autor.

Tabela 14 - VPL para 50% de sombreamento

Sistema	VPL (R\$)
Ideal	17975,8
Otimizado	4598,3
Não otimizado	3466,0

Fonte: Autor.

A utilização do otimizador de potência faz com que no final de 5 anos em ambos os casos o investimento apresente valor positivo, no cenário com o sombreamento de 50% o valor do VPL dos sistemas com e sem otimizador sejam muito próximos, o que não ocorre no primeiro caso.

3.3.3 Taxa de investimento de retorno (TIR)

Os resultados de TIR encontrando podem ser vistos nas tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - TIR para 25% de sombreamento

Sistema	TIR (%)
Ideal	26%
Otimizado	20%
Não otimizado	14,05%

Fonte: Autor.

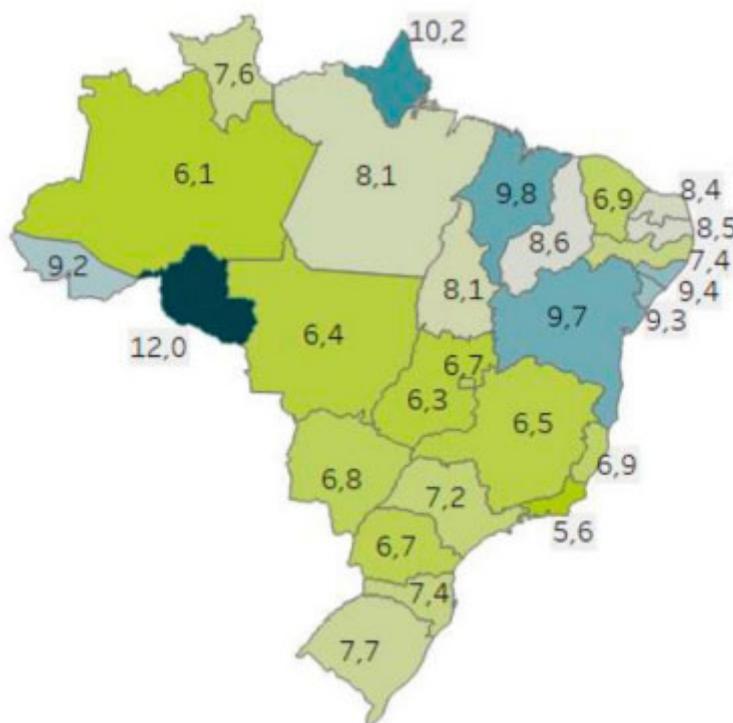
Tabela 16 - TIR para 50% de sombreamento

Sistema	TIR (%)
Ideal	26%
Otimizado	13%
Não otimizado	12,18%

Fonte: Autor.

Ao comparar os valores de TIR encontrados com os disponíveis na figura 18, é possível verificar que tanto o sistema otimizado quanto o não otimizado apresentam valores substancialmente maiores do que o estimado para o estado do Amazonas.

Figura 18 - TIR no Brasil



Fonte: Greener, 2021

3.4 Indicadores Técnicos

3.4.1 System yield

Nas tabelas 17 e 18, é possível verificar que em ambos cenários de sombreamento o sistema otimizado trabalha mais horas na máxima potência do inversor, o que reflete na maior geração de energia elétrica.

Tabela 17 - *System yield* sistema 25% de sombreamento

Sistema	(Horas)
Ideal	4,67
Otimizado	4,07
Não otimizado	3,73

Fonte: Autor.

Tabela 18- *System yield* sistema 50% de sombreamento

Sistema	(Horas)
Ideal	3,74
Otimizado	2,85
Não otimizado	2,77

Fonte: Autor.

3.4.2 Eficiência de otimização

Nas tabelas 19 e 20 pode ser visualizada a relação entre a energia gerada pelo MPPT sombreado com o MPPT de referência.

Tabela 19 - Eficiência de otimização sistema 25% de sombreamento

Sistema	(%)
Ideal	100%
Otimizado	91%
Não otimizado	77,6%

Fonte: Autor.

Tabela 20 - Eficiência de otimização sistema 50% de sombreamento

Sistema	(%)
Ideal	100,00%
Otimizado	76,17%
Não otimizado	74,15%

Fonte: Autor.

Para um sombreamento de 25% o sistema otimizado foi capaz de gerar significativamente mais energia que o sistema não otimizado, já no sistema com 50% de sombreamento a diferença entre a energia gerada pelo sistema foi relativamente pequena, o que reflete também nos indicadores econômicos.

CONCLUSÃO

Com os resultados coletados durante os testes foi possível avaliar econômica e tecnicamente o desempenho de um sistema solar fotovoltaico submetido a dois cenários de sombreamento parcial.

Os resultados encontrados para o sombreamento de 25% foram bastante satisfatórios, a implementação do otimizador de potência foi capaz de melhorar substancialmente todos os indicadores que este trabalho se propôs a analisar. Economicamente, o tempo de *payback* diminuiu 0,6 anos, a taxa de retorno de investimento apresentou um aumento de 5,85% e valor presente líquido um ganho real de R\$ 6970,8; sendo esse último indicador o que apresentou a melhora mais expressiva dentre os três analisados.

Ao analisar os indicadores técnicos também é possível notar uma significativa melhora, o *system yield* apresentou 0,35 h o que indica que a implementação do otimizador de potência faz com que o sistema trabalhe mais tempo na sua máxima potência de saída, o que reflete em uma maior geração de energia elétrica; ao analisar a eficiência de otimização foi possível encontrar um ganho de 13,4% na geração de energia elétrica com o uso do otimizador de potência.

No teste com 50% de sombreamento o uso do otimizador de potência também fez com que os indicadores apresentassem melhora, porém bem menos expressiva do que no cenário de 25% de sombreamento. O *payback* diminuiu 0,4 anos, a taxa de investimento de retorno teve uma melhora de 0,82% no decorrer de 5 anos e valor presente líquido um ganho de R\$ 1132,3. O *system yield* apresentou uma melhora de 0,13 h e a eficiência de otimização indicou um ganho de apenas 2,2% na geração de energia.

A pequena melhora nos indicadores no cenário de 50% de sombreamento se dá ao fato de que na maior parte do dia os diodos de *by-pass* estarem polarizados diretamente devido ao alto grau de sombreamento, com isso o módulo sombreado não gerava energia, logo a implementação do otimizador de potência surtiu pouco efeito.

Os resultados apontam que a implantação de otimizadores de potência em sistemas submetidos a sombreamento parcial apresentam ganho significativo na produção

de energia elétrica e a melhora nos indicadores técnicos e econômicos, apresentando melhores resultados casos onde o grau de sombreamento é menor de 50%.

Por fim, esse trabalho sugere como possibilidade de trabalhos futuros, a utilização de técnicas que façam com que seja possível coletar os dados simultaneamente em todos os casos, podendo ser feito com um inversor que possuam três ou mais entradas MPPT ou com a utilização de mais um inversor.

REFERÊNCIAS

BYD. **PHK-36-SERIES-5BB**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto44858IdArquivo26535.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

CANAL SOLAR. **Entenda os otimizadores para sistemas fotovoltaicos: Otimizadores tornam os sistemas FV mais seguros, eliminando o risco de arco elétrico e incêndio**. [S. l.], 29 abr. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entenda-otimizadores-para-sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 9 jul. 2021.

CANAL SOLAR (Brasil). **Entendendo o efeito das sombras parciais nos sistemas fotovoltaicos: Conheça as principais causas de sombreamento em módulos fotovoltaicos**. [S. l.], 6 mar. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/efeito-das-sombras-parciais-nos-sistemas-fv/>. Acesso em: 20 jun. 2021.

CANAL SOLAR (Brasil). **Entenda os inversores com múltiplos MPPT**. [S. l.], 14 jul. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/inversores-com-multiplos-mppt/>. Acesso em: 17 nov. 2021

CAMARGO, Renata. **Veja como o Valor Presente Líquido (VPL) ajuda na análise de viabilidade de um investimento**. [S. l.], 29 jan. 2017. Disponível em: <https://www.treasy.com.br/blog/valor-presente-liquido-vpl/>. Acesso em: 24 out. 2020.

FRONIUS. **Fronius Primo 208-240 3.8-1 / 5.0-1 / 6.0-1 7.6-1 / 8.2-1 Installation**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: https://www.fronius.com/~/_downloads/Solar%20Energy/Installation%20Instructions/42%2C0426%2C0204%2CPB.pdf. Acesso em: 27 abr. 2021.

Greener. **Greener oferece pesquisa de mercado de GD fotovoltaica**. In: PORTAL SOLAR. Greener oferece pesquisa de mercado de GD fotovoltaica. [S. l.], 8 jan. 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/greener-oferece-pesquisa-de-mercado-de-gd-fotovoltaica/#:~:text=A%20Greener%2C%20empresa%20de%20consultoria,no%20segundo%20semestre%20de%202020>. Acesso em: 10 set. 2021.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. [S.l.]: Cengage Learning. Editores, 2003.LOBATO, C. Salatiel. **Análise Comparativa entre as principais técnicas de MPPT com foco experimental**. Juiz de Fora,2015.

MENDES, Inês Santos. **Avaliação do Desempenho do Sistema de Mini-geração Fotovoltaico na Faculdade de Ciências**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - UNIVERSIDADE DE LISBOA, [S. l.], 2016.

MOREIRA, Hugo. **Estudo de técnicas de rastreamento de máxima potência tolerantes a sombras para sistemas fotovoltaicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade estadual de campinas- Unicamp, [S. l.], 2018.

PINHO, João; GALDINO, Marco. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. Rio de janeiro: [s. n.], 2014.

PORTAL SOLAR (Brasil). **Energia solar vai gerar mais de 147 mil empregos no Brasil em 2021, projeta ABSOLAR**. [S. l.], 13 jan. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-vai-gerar-mais-de-147-mil-empregos-no-brasil-em-2021-projeta-absolar.html>. Acesso em: 5 jul. 2021.

REIS, Tiago. **TIR: aprenda a analisar investimentos utilizando a Taxa Interna de Retorno**. [S. l.], 15 jun. 2018. Disponível em: <https://www.sunoresearch.com.br/artigos/taxa-interna-de-retorno/>. Acesso em: 24 out. 2020.

REIS, Tiago. **Payback: entenda como calcular o prazo de retorno de um investimento**. [S. l.], 25 jul. 2019. Disponível em: <https://www.sunoresearch.com.br/artigos/payback/>. Acesso em: 24 out. 2020.

SILVA DE, J; MOREIRA,H;MESQUITA,D;REIS,M; VILLALVA,M. **Study of Power Optimizers for Grid-Connected Photovoltaic Systems**. IEE Latin America Transactions,VOL 17.NO. 1 Janeiro ,2019.

TIGO. **TS4-A-O: Otimizador FV a nível de módulo**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/605a6e479bbd977173816b6d_TS4-A-O%20700W%20datasheet_PT_030421.pdf. Acesso em: 20 maio 2021.

VALENTIN SOFTWARE (Alemanha). **PV*SOL® premium**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>. Acesso em: 9 jun. 2021.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

VILLAVA, Marcelo. **Dynamic peak manager: solução para sistemas FV com sombreamento**. [S. l.], 28 abr. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/dynamic-peak-manager-solucao-para-sistemas-fv-com-sombreamento/>. Acesso em: 15 set. 2021.