



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA

HEBER SOUSA SANTOS

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DO SOMBREAMENTOS EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Palmas – TO

2021

HEBER SOUSA SANTOS

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DO SOMBREAMENTO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia elaborada e apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins.

Orientador: Msc Alcy Monteiro Junior

Palmas –TO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- S237a Santos, Heber Sousa.
ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DO SOMBREAMENTOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. / Heber Sousa Santos. – Palmas, TO, 2021.
80 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.
Orientador: Msc. Alcy Monteiro Junior
1. Sombreamento em sistema fotovoltaico. 2. Análise de sistemas sombreados. 3. Rendimento de módulos fotovoltaicos. 4. Simulações. I. Título
- CDD 621.3**

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

HEBER SOUSA SANTOS

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DO SOMBREAMENTOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 18/08/2021

Banca Examinadora



Assinado digitalmente por ALCY MONTEIRO JUNIOR:
02054783102
DN: C=BR, O=ICP-Brasil, OU=AC SOLUTI Multipla v5,
OU=32075287000105, OU=Presencial, OU=Certificado PF
A1, CN=ALCY MONTEIRO JUNIOR:02054783102
Razão: Eu atesto a precisão e a integridade deste documento
Localização: Palmas - TO
Data: 2021.05.18 20:06:43-03'00'

Prof. M^c. Alcy Monteiro Júnior, UFT



Assinado de forma digital por Gisele Souza Parmezani Marinho
DN: cn=Gisele Souza Parmezani Marinho, o=Universidade
Federal do Tocantins - UFT, ou=Engenharia Elétrica - Campus de
Palmas, email=giselemarinho@uft.edu.br, c=BR
Dados: 2021.05.18 20:15:21 -03'00'
Versão do Adobe Acrobat Reader: 2021.001.20155

Prof^a M^a. Gisele Souza Parmezani Marinho, UFT



Prof. M^c. Alex Vilarindo Menezes, UFT

Palmas - TO, 2021

*Dedico aos meus pais. Elza Maria
e Francisco de Assis*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus e a toda minha família.

SANTOS, Heber Sousa. **Análise e simulação dos efeitos do sombreamento em sistemas fotovoltaicos**. 2021. 80 f. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

RESUMO

O presente trabalho propôs a simulação de sistemas fotovoltaicos submetidos a efeitos de sombreamento parcial e a análise de seus rendimentos. Existe uma gama de vantagens em analisar o sombreamento mesmo antes da execução do projeto fotovoltaico onde são elas: Conhecer o formato da sombra e sua orientação facilitando o local para instalação dos módulos; avaliar a média de sombreamento que uma superfície experimenta em um prazo de 12 meses. Para uma análise mais detalhada a respeito dos dispositivos fotovoltaicos, nota-se a importância de estabelecer as suas características perante as condições reais de funcionamento, onde as características de cada módulo são determinadas de acordo com a potência máxima de saída, conforme as condições de ensaio padrão. Para isso é necessário a verificação de testes de funcionamento e rotulagem dos módulos fotovoltaicos. É necessário recorrer a padrões de irradiação, temperatura e massa de ar com o objetivo de padronizar as medidas e facilitar os valores comparados entre módulos e medidas padrões. Os procedimentos realizados foram simulações com diferentes condições e disposições de módulos, com inversores strings, microinversores e otimizadores de potência. Onde a maior porcentagem de rendimento foi com microinversores chegando a 83,2%.

Palavras-chave: Simulação. Sistema fotovoltaico. Rendimento. Sombreamento

SANTOS, Heber Sousa. **Analysis and simulation of the effects of shading in photovoltaic systems**. 2021. 80 f. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

ABSTRACT

The present work proposed the simulation of photovoltaic systems developing partial shading effects and the analysis of their adjustments. There is a range of advantages in shading analysis even before the execution of the photovoltaic project where they are: Knowing the shape of the shadow and its orientation, facilitating the location for installing the modules; evaluate the average shading that a surface experiences over a period of 12 months. For a more detailed analysis regarding the photovoltaic devices, note the importance of establishing as their characteristics under the real operating conditions, where the characteristics of each module are determined according to the maximum output power, according to the test conditions. standard. For this, it is necessary to verify the functional tests and labeling of the photovoltaic modules. It is necessary to use irradiation, temperature and air mass standards in order to standardize how measures and facilitate the values compared between modules and standard measures. The procedures performed were simulations with different conditions and module layouts, with string inverters, microinverters and power optimizers. Where the highest percentage of income was with microinverters reaching 83.2%.

Keywords: Simulation. Photovoltaic system. Yield. Shading.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CORTE TRANSVERSAL DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	14
FIGURA 2 CÉLULA DE SILÍCIO MONOCRISTALINA.....	18
FIGURA 3 CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO.....	19
FIGURA 4 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO.....	20
FIGURA 5 MÓDULO FOTOVOLTAICO DE 72 CÉLULAS.....	21
FIGURA 6 PROCESSO HIERARQUIZADO DE AGRUPAMENTO.....	22
FIGURA 7 CURVAS I-V E P-V DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO CRISTALINO. .	24
FIGURA 8 CURVAS I-V DE CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO CRISTALINO QUANDO CONECTADA EM SÉRIE.	25
FIGURA 9 CURVAS I-V DE CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO CRISTALINO QUANDO CONECTADA EM PARALELO.	25
FIGURA 10 INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA CURVA I-V DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO CRISTALINO NA TEMPERATURA DE 25°C.....	27
FIGURA 11 LIGAÇÃO EM PARALELO DE DOIS MÓDULOS FOTOVOLTAICO.....	28
FIGURA 12 ASSOCIAÇÃO EM PARALELO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.	29
FIGURA 13 LIGAÇÃO EM SÉRIE DE DOIS MÓDULOS FOTOVOLTAICO.....	29
FIGURA 14 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.	30
FIGURA 15 LIGAÇÃO EM SÉRIE-PARALELO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICO.....	30
FIGURA 16 VISTA DA CÉLULA, MÓDULO E PAINEL FOTOVOLTAICO.	32
FIGURA 17 TIPOS DE APLICAÇÕES DE SISTEMAS FV	33
FIGURA 18 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM SFI DOMICILIAR.....	34
FIGURA 19 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM SFVCR.....	34
FIGURA 20 CLASSIFICAÇÃO DE INVERSORES POR PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO.....	36
FIGURA 21 CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM INVERSORES STRING.	36
FIGURA 22 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM INVERSOR CENTRAL.....	37
FIGURA 23 CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM INVERSOR MULTI-STRING.	38
FIGURA 24 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM INVERSOR COM MÓDULO INTEGRADO.	39
FIGURA 25 CURVAS P-V DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO.	40
FIGURA 26 CIRCUITO ELÉTRICO E FOTO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.	41
FIGURA 27 EFEITO DE QUEDA DE GERAÇÃO DEVIDO A SOMBREAMENTO.....	42
FIGURA 28 OTIMIZADORES DE POTÊNCIA INSTALADO SOB MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. .	43
FIGURA 29 VISTA SUPERIOR DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR STRING.....	44
FIGURA 30 PREVISÃO DE RENDIMENTO DO GERADOR FOTOVOLTAICO.	45
FIGURA 31 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR STRING-SEM SOMBREAMENTO, 08H00MIN DE 21 DE JUNHO.....	47
FIGURA 32 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR STRING-SEM SOMBREAMENTO, 10H00MIN DE 21 DE JUNHO.....	48
FIGURA 33 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR STRING-SEM SOMBREAMENTO, 12H00MIN HORAS. 21 DE JUNHO.	48
FIGURA 34 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR STRING-SEM SOMBREAMENTO, 14H00MIN HORAS. 21 DE JUNHO.	49

FIGURA 35 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR STRING-SEM SOMBREAMENTO, 16H00MIN HORAS. 21 DE JUNHO.	49
FIGURA 36 VISTA SUPERIOR COM SOMBREAMENTO 21 DE DEZEMBRO A 08H00MIN.....	50
FIGURA 38 VISTA NOROESTE COM SOMBREAMENTO A 12H00MIN.....	51
FIGURA 39 VISTA NOROESTE COM SOMBREAMENTO A 12H00MIN.....	51
FIGURA 40 DIVISÃO DE STRINGS POR INVERSORES.	54
FIGURA 41 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA 08H00MIN.	55
FIGURA 42 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA 10H00MIN.	56
FIGURA 43 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA 12H00MIN.	56
FIGURA 44 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA 14H00MIN.	57
FIGURA 45 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA 16H00MIN.	57
FIGURA 46 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 08H00MIN.	58
FIGURA 47 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 10H00MIN.	58
FIGURA 48 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 12H00MIN.	59
FIGURA 49 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 14H00MIN.	59
FIGURA 50 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 16H00MIN.	60
FIGURA 51 PREVISÃO DE RENDIMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSORES STRINGS COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA AO LONGO DO PRIMEIRO ANO.	61
FIGURA 52 PREVISÃO DE RENDIMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSORES STRINGS SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA AO LONGO DO PRIMEIRO ANO.....	61
FIGURA 53 VISTA SUPERIOR - CONFIGURAÇÃO AMBIENTE SOMBREADO COM MICROINVERSORES 21 DE JUNHO AS 08H00MIN.....	62
FIGURA 54 TAXA DE SOMBREAMENTO- 1ª CONFIGURAÇÃO: AMBIENTE SOMBREADO COM MICROINVERSORES.	62
FIGURA 55 PREVISÃO DE RENDIMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM MICROINVERSORES 1ª CONFIGURAÇÃO.	63
FIGURA 56 PREVISÃO DE RENDIMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM MICROINVERSORES 2ª CONFIGURAÇÃO SEM SOMBREAMENTO.	63
FIGURA 57 DISPOSIÇÃO DE STRINGS POR MICROINVERSORES.	64
FIGURA 58 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR DE POTÊNCIA, 08H00MIN.	64
FIGURA 59 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR DE POTÊNCIA, 10H00MIN.	65
FIGURA 60 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR DE POTÊNCIA, 12H00MIN.	65
FIGURA 61 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR DE POTÊNCIA, 14H00MIN.	66

FIGURA 62 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR DE POTÊNCIA, 16H00MIN.....	66
FIGURA 63 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR SEM SOMBREAMENTO, 08H00MIN.....	67
FIGURA 64 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR SEM SOMBREAMENTO, 10H00MIN.....	68
FIGURA 65 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR SEM SOMBREAMENTO, 12H00MIN.....	68
FIGURA 66 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR SEM SOMBREAMENTO, 14H00MIN.....	69
FIGURA 67 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR SEM SOMBREAMENTO, 16H00MIN.....	69
FIGURA 68 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 08H00MIN.	71
FIGURA 69 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 10H00MIN.	72
FIGURA 70 CURVA CARACTERÍSTICA PV E IV DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA, 12H00MIN.	72

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: CONDIÇÕES DE TESTE E OPERAÇÃO DOS MÓDULOS FV	23
QUADRO 2: SISTEMA FOTOVOLTAICO COM INVERSOR <i>STRING</i> SEM SOMBREAMENTO	45
QUADRO 3: BALANÇO ENERGÉTICO	45
QUADRO 4: CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	52
QUADRO 5: BALANÇO ENERGÉTICO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO SOMBREADO- INVERSOR <i>STRINGS</i>	53
QUADRO 6: BALANÇO ENERGÉTICO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO MICROINVERSOR	70
QUADRO 7: BALANÇO ENERGÉTICO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO-INVERSOR 6KW.....	74

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivo específico	15
1.3	Metodologia.....	15
2.	A CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	17
2.1	Estrutura e funcionamento da célula fotovoltaica.....	17
2.2	Sistema fotovoltaico.....	20
2.2.1	Módulos fotovoltaicos:.....	21
2.2.2	Curvas características dos módulos fotovoltaicos.....	23
2.2.3	Associação em paralelo:	27
2.2.4	Associação em série:.....	29
3.	SISTEMA FOTOVOLTAICO:.....	32
3.1	Inversores (eficiência e perdas):.....	35
3.2	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica:.....	36
3.2.1	Inversor string:.....	36
3.2.2	Inversor Central:	37
3.2.3	Inversor multi-string:	37
3.2.4	Inversor com módulo integrado:.....	38
3.2.5	Recursos utilizados para melhorar o rendimento dos módulos fotovoltaicos sombreados:.....	39
3.2.6	Micro-inversor	41
3.2.7	Diferença entre microinversores e inversores string.....	41
3.2.8	Otimizadores de potência:	42
	CONCLUSÃO.....	76

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por energias renováveis, e a preocupação em aumentar a produção energética e a escassez de fontes primárias, tem incentivado inúmeras pesquisas e investimentos a fontes de energia limpa, em especial a energia fotovoltaica que é gerada por meio de sistemas fotovoltaicos, que converte diretamente energia solar em energia elétrica (COUTINHO, 2016).

Atualmente no Brasil as usinas hidrelétricas representam uma grande parcela da matriz de energia elétrica, responsáveis por um vasto impacto ambiental e social causado pelo alagamento e realocação de comunidades, causando um desequilíbrio econômico e no ecossistema local. Já na utilização de módulos fotovoltaicos a geração costuma ser em locais de pequeno ou médio porte e requer apenas pequenas áreas, como telhados residenciais ou áreas menores do que as necessárias para a implantação de uma usina hidrelétrica. Desde modo, o investimento em energias renováveis como a fotovoltaica é de suma importância, pois a produção geralmente é perto do local de consumo, reduzindo as perdas na transmissão e evitando os impactos ambientais. (DRIEMEIER, 2009)

A energia solar fotovoltaica é considerada uma das mais eficientes quando comparada a outras fontes renováveis, visto que a energia solar é abundante. De modo que, em razão do crescimento populacional e do consumo de energia, nos últimos anos tem-se apostado em uma energia limpa, tornando o crescimento da produção exponencial a nível mundial. (LOPES, 2013).

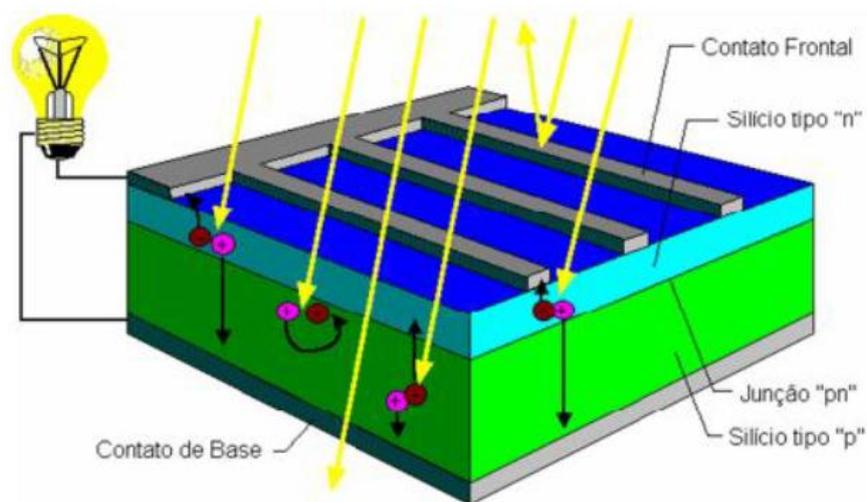
A obtenção da energia elétrica fotovoltaica é feita por meio de conversão de luz solar para eletricidade, através do efeito fotovoltaico, onde as células fotovoltaicas convertem diretamente energia solar em eletricidade, por meio de um fenômeno que ocorre quando a luz ou a radiação eletromagnética do sol atinge a célula, que é constituída de materiais semicondutores. A célula fotovoltaica é formada por camadas de material semicondutor, no caso o silício “N” e “P”. Onde o Silício (Si) é a principal matéria prima para a fabricação das células fotovoltaicas.

Segundo Severino e Oliveira (2010), o efeito fotovoltaico é gerado pela absorção da luz solar causando uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor. Porém a célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, ela apenas mantém a fluidez de elétrons mediante a luz solar. A célula fotovoltaica didaticamente pode ser comparada a um diodo de grande área. O material para a construção do semicondutor utilizado em células fotovoltaicas é obtido através de blocos de silício puro que é aquecido em alta

temperatura e submetido a um método de formação de cristal (Método de Czochralski), resultando no lingote de silício monocristalino que nada mais é que uma disposição cristalina incomum e que possui um arranjo molecular homogêneo com aparência brilhante e uniforme. (VILLALVA, 2017).

O material é apresentado em forma de estreitas bolachas de silício (*wafers*) que são separadas a partir dos lingotes, comumente variando entre 0,2 e 0,75mm de espessura. Em seguida os *wafers* recebem impurezas de ambos os lados que formam uma camada de silício “P” e “N” que serão a base para a célula. Finalmente uma camada metálica é colocada em uma das faces e na outra um revestimento de material antirreflexo, onde irá incidir a luz, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



Fonte: CRESESB (2012)

1.1 Justificativa

A geração de energia elétrica por meio de um sistema de geração fotovoltaica pode não gerar a quantidade de energia a qual foi planejada, modo que fatores externos influenciam na produção reduzindo assim o desempenho da potência máxima. Como por exemplo: Sujeira e poeira, degradação e vegetação, sombreamento parcial ou descasamento de corrente entre módulos (ZOMER, 2010).

Para a construção e execução de um projeto fotovoltaico em localidades urbanas é necessário adequar o projeto aos aspectos locais existentes como árvores, prédios, torres de comunicação e toda construção que possa causar sombreamento parcial ou total no sistema fotovoltaico de maneira que influencie na geração de energia (PATEL e AGARWAL, 2008). O sombreamento não só causa a redução em absorção de energia,

mas também a incompatibilidade elétrica entre os módulos fotovoltaicos, resultando no surgimento dos *hot spots* que atua como uma carga, aumentando assim a temperatura e causando a queima do módulo (BISHOP, 1988).

De acordo com ZOMER (2010), há uma gama de vantagens em analisar o sombreamento mesmo antes da execução do projeto fotovoltaico: Conhecer o formato da sombra e sua orientação facilitando o local para instalação dos módulos; avaliar a média de sombreamento que uma superfície experimenta em um prazo de 12 meses. Fato que ajuda para a análise da não utilização de irradiação pelos módulos.

Quando é feita a instalação de um projeto, o recomendando é não fazer/montar o sistema em locais sombreados, o melhor é que o local referente a instalação do sistema, esteja livre de sombreamento, desde as primeiras horas do dia, até o pôr do sol. Pois a falta de análise de sombreamento dos módulos, pode comprometer a geração de energia (BERTO, 2020)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo acerca do sombreamento em sistemas fotovoltaicos e suas causas e consequências em um âmbito geral. E quais suas perdas significativas para o módulo devido ao sombreamento.

1.2.2 Objetivo específico

- Elaborar um estudo e simulação de módulos fotovoltaicos;
- Efetuar estudos acerca dos tipos de áreas a qual os módulos são dispostos;
- As principais causas de sombreamento em módulos fotovoltaicos;
- Efeitos dos sombreamentos em módulos fotovoltaicos;
- Perdas de eficiência devido ao sombreamento;
- Recursos utilizados para melhorar o rendimento em módulos sombreados;

1.3 Metodologia

O trabalho em questão retrata o sombreamento em módulos fotovoltaicos e seus efeitos. Sendo desenvolvido por métodos de pesquisas simulações utilizando o programa computacional *PVSOL*. Onde projeto está organizado em quatro capítulos, conforme a ordem abaixo:

- No capítulo 1 é apresentada as fundamentações para o desenvolvimento do projeto: Introdução, justificativa, objetivos gerais e específicos e a metodologia de como foi desenvolvido e todo o cronograma do projeto. Neste mesmo capítulo, algumas citações de trabalhos relacionados ao tema são apresentadas.
- No capítulo 2 retrata toda a parte geral a respeito de sistemas fotovoltaicos (célula fotovoltaica, estrutura de funcionamento, sistema fotovoltaico e módulos fotovoltaicos) e a teoria necessária para o desenvolvimento do trabalho.
- No capítulo 3 apresenta discussões a respeito dos recursos utilizados para melhorar o rendimento em módulos fotovoltaicos em situações de sombreamento e simulações no programa PVSOL PREMIUM.
- No capítulo 4 está fundamentada as discussões e considerações finais a respeito deste trabalho.

2 A CÉLULA FOTOVOLTAICA

O princípio básico de uma célula fotovoltaica é a conversão direta da luz solar em energia elétrica. Sua construção é feita utilizando-se um material semicondutor normalmente o silício. Porém, apesar de ser o material mais utilizado, não é um elemento puro e sim uma ligação química, na forma de SiO_2 , onde a areia de sílica é submetida a altos níveis de temperatura, sendo em seguida fundida com pó de carvão que resultará no silício metalúrgico onde sua pureza é de 98% (DEMONTTI, 2003)

Em seu estado ainda bruto o silício recebe uma purificação por meio de um processo químico, que utiliza um líquido a uma temperatura de 31°C . Este processo é de suma importância, pois em seguida será destilado em inúmeras etapas, para que o grau de impureza seja cada vez menor. No momento em que se obtém o grau de pureza necessária, o triclorosilano (produto químico produzido pela junção de ácido clorídrico submetido a uma temperatura de 31°C e em contato com o silício em estado bruto), tem o seu valor reduzido a silício por meio do elemento H_2 a uma temperatura de 1000°C . Depois do processo é obtido um silício de elevada qualidade que poderá ser processado de modos diferentes, sendo para a produção de células policristalinas e monocristalinas onde as substâncias dopantes serão adicionadas. (LOPES, 2013).

Em um sistema fotovoltaico a célula fotovoltaica é considerada o menor elemento do sistema e a sua produção de potência é na ordem de 0,4 V a 0,5 V e em média produz uma corrente de 3A. Esses valores são considerados pequenos para a produção em grande escala de um sistema maior. Para que isso ocorra geralmente as células são ligadas em série ou paralelo, proporcionando potências maiores (BRAGA, 2008).

2.1 Estrutura e funcionamento da célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é basicamente uma das partes mais importantes do projeto fotovoltaico em geral, sua composição é de duas camadas de silício dopado. Onde a parte que representa a camada n é voltada para o sol e sua dopagem é negativa. Os elementos utilizados para a sua dopagem geralmente são da quinta família da tabela periódica, um exemplo é o fósforo, e a outra parte da célula sendo denominada p é dopada com elementos químicos da terceira família da tabela periódica, e sua dopagem é positiva, geralmente se utiliza o elemento boro. Em um dos lados da célula fotovoltaica geralmente

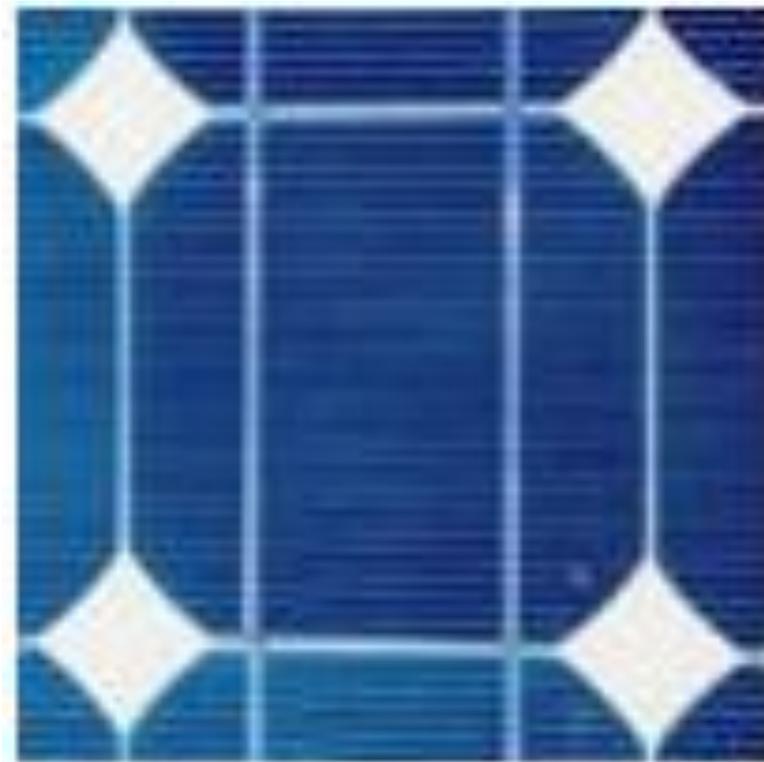
sua estrutura é de dióxido de titânio ou nitreto de silício sendo que este deverá ser o mais límpido possível (MATSUMOTO, 2013).

A célula não acumula energia elétrica, ela é responsável somente por manter o fluxo dos elétrons em um circuito elétrico durante a existência de luz solar. Dentre as células fotovoltaicas existem diferentes tipos, sendo: silício monocristalina, silício policristalina, e silício amorfo (BRAGA, 2008).

- **Células de silício monocristalina:**

As células de silício monocristalina são obtidas por meio de barras que são cortadas em formato cilíndrico do silício monocristalina e fabricado em forno específico, cortado em formato de pastilhas finas de aproximadamente 0,4 a 0,5 mm² de espessura. A eficiência dessa célula é acima de 12%. A Figura 2 representa uma célula monocristalina (NASCIMENTO, 2004)

Figura 2 Célula de silício monocristalina.

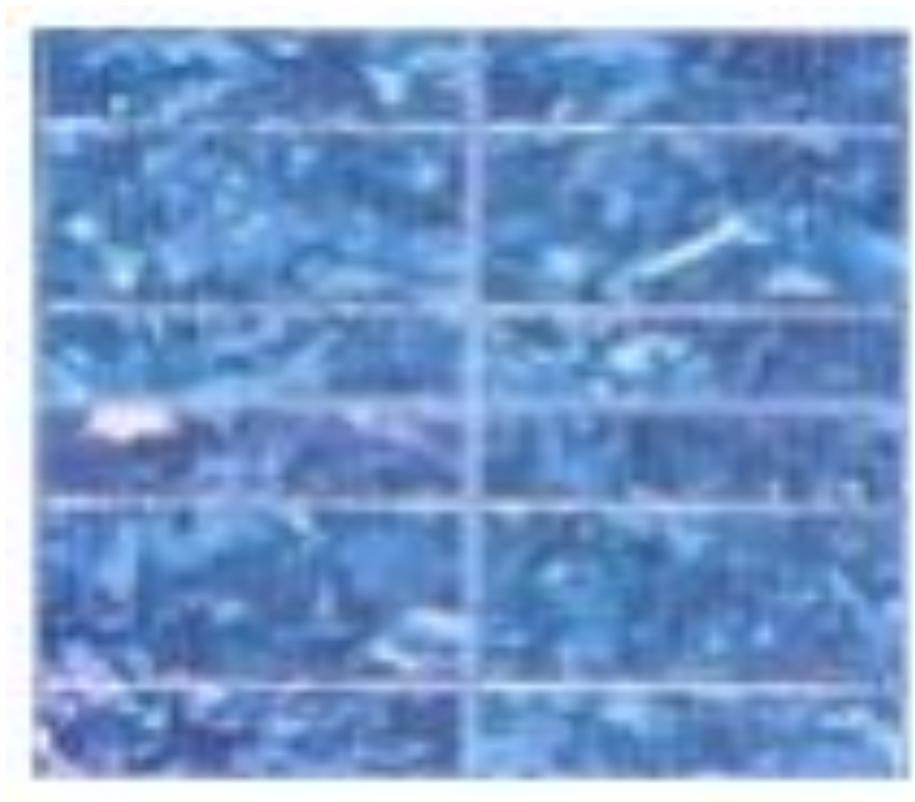


Fonte: Portal Solar (20--)

- **Célula de silício policristalina:**

Diferente da célula monocristalina, a célula policristalina é feita por meio de blocos de silício, fornecido pela fusão do elemento totalmente puro em molde especial. O silício esfria de maneira gradativamente lenta para que o elemento endureça. Neste caso, acontece a desorganização dos átomos em diferentes cristais, formando uma estrutura policristalina com áreas de separação junto dos cristais. Por sua vez a eficiência da célula policristalina é menor do que a de silício monocristalina e seu custo é bem reduzido (NASCIMENTO, 2004). A Figura 3 mostra uma célula de silício policristalina.

Figura 3 Célula de silício policristalino.

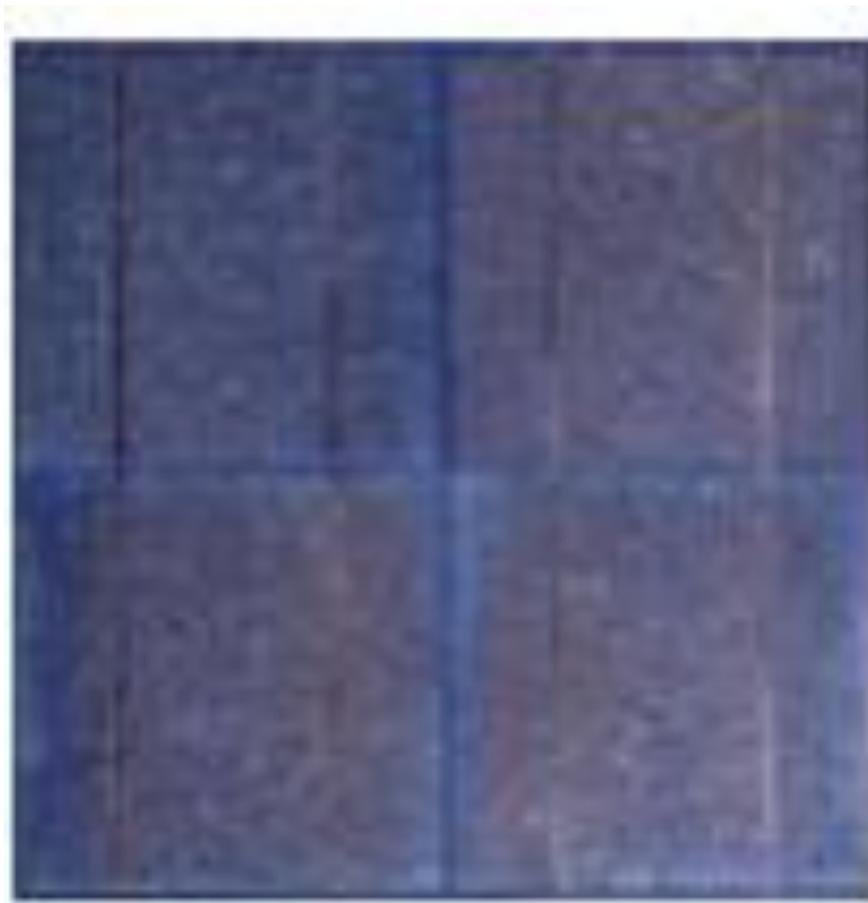


Fonte: Portal Solar (20--)

- **Células de silício amorfo:**

As células de silício amorfo são constituídas por meio de finas camadas de silício sobre uma superfície lisa de um material específico, sendo de metal ou vidro. Estas células tem uma maior vantagem quando se pretende um baixo custo. Porém o seu rendimento é menor. Sua eficiência na conversão da luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7% . Sua maior utilização é para projetos que necessitem de áreas maiores e estéticas mais delicadas. A Figura 4 mostra uma célula de silício amorfo (GOMES 2009).

Figura 4 Célula de silício amorfo.



Fonte: Solenerg (2004)

2.2 Sistema fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é o componente principal de um sistema fotovoltaico para geração de energia. Sua estrutura é composta pelo agrupamento de células fotovoltaicas, podendo ser em série ou paralelo conforme as correntes e tensões do projeto. A junção destes módulos é denominada gerador fotovoltaico, parte inicial da estrutura do projeto, onde sua função é captar a irradiação solar e a conversão em energia elétrica (PEREIRA, OLIVEIRA, 2011).

Em geral, utilizam-se as células solares agrupadas em série visto que com essa associação se assegura um valor maior de tensão de saída do sistema, pois a célula fotovoltaica isolada produz uma tensão de aproximadamente 0,6V, e para uma demanda maior de tensão, é necessária uma quantidade maior de células solares. Atualmente existem muitos exemplos de módulos fotovoltaicos, variando de modelos rígidos à flexíveis, conforme a empregabilidade das células (PINHO, GALDINO, 2014).

O sistema fotovoltaico é constituído basicamente de módulos fotovoltaicos (conjunto de células fotovoltaicas), inversores (responsáveis pela conversão de energia gerada em corrente contínua para corrente alternada), conjunto de baterias (sistema isolado) e toda a parte estrutural para o sistema (MARTINS, 2018).

2.2.1 Módulos fotovoltaicos:

A produção de tensão e corrente elétrica nas células fotovoltaicas é relativamente baixa, em torno de 3A e 0,7V para células de silício cristalino, valor este justificado por sua limitação dimensional. Sendo assim para uma maior produção de tensão e corrente elétrica, associam-se diversas células fotovoltaicas com a finalidade de formar um módulo fotovoltaico. A quantidade destes módulos fotovoltaicos ligados em série que determina a tensão do sistema. A combinação em série garante uma tensão de saída maior, e a potência especificada é em corrente contínua, onde a potência nominal é o resultado da soma da potência de cada módulo. A figura 5 é um exemplo de um módulo fotovoltaico (SANTOS, 2013).

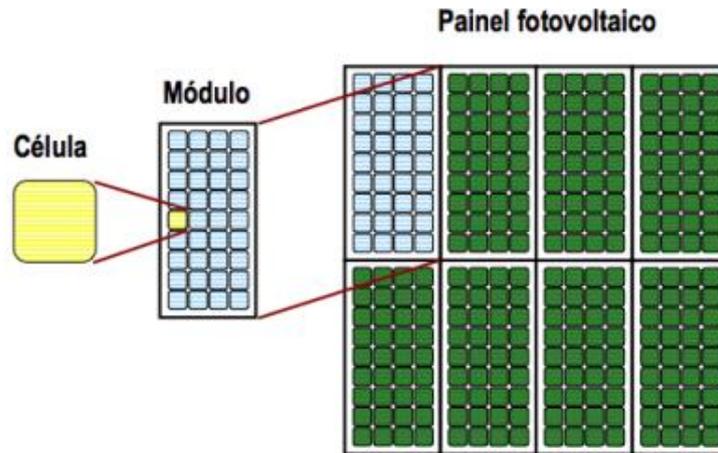
Figura 5 Módulo fotovoltaico de 72 células.



Fonte: NeoSolar (20--)

Por outro lado, o conjunto de inúmeros módulos solares é intitulado painel fotovoltaico, representado na Figura 6. Este método possibilita realizar o controle da energia gerada no módulo fotovoltaico.

Figura 6 Processo hierarquizado de agrupamento.



Fonte: Adaptado de (Carneiro, 2010)

Para uma análise mais detalhada a respeito dos dispositivos fotovoltaicos, nota-se a importância de estabelecer as suas características perante as condições reais de funcionamento, onde as características de cada módulo são determinadas de acordo com a potência máxima de saída, conforme as condições de ensaio padrão. Para isso é necessário à verificação de testes de funcionamento e rotulagem dos módulos fotovoltaicos. É necessário recorrer a padrões de irradiação, temperatura e massa de ar com o objetivo de padronizar as medidas e facilitar os valores comparados entre módulos e medidas padrões (SOUZA, 2016). O Quadro 1 mostra os valores que devem ser utilizados como padrões para os testes.

Os valores descritos no Quadro 1 são denominados Condições Padrões de Teste (STC – *Standard Teste Conditions*) e são obtidos em laboratório. A unidade de medida é o *Watt-pico* no qual é ressignado a circunstâncias padronizadas do teste STC, à uma temperatura de 25°C, e espectro de massa de ar 1,5, com irradiação solar de 1000W/m² (irradiação ao meio-dia de um dia claro e quente) (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Quadro 1: Condições de teste e operação dos módulos FV

Parâmetros	
Irradiação (G)	1.000W/m ²
Massa e Ar (AM)	1,5
Temperatura	25°C

Fonte: Adaptado de SOUZA (2015).

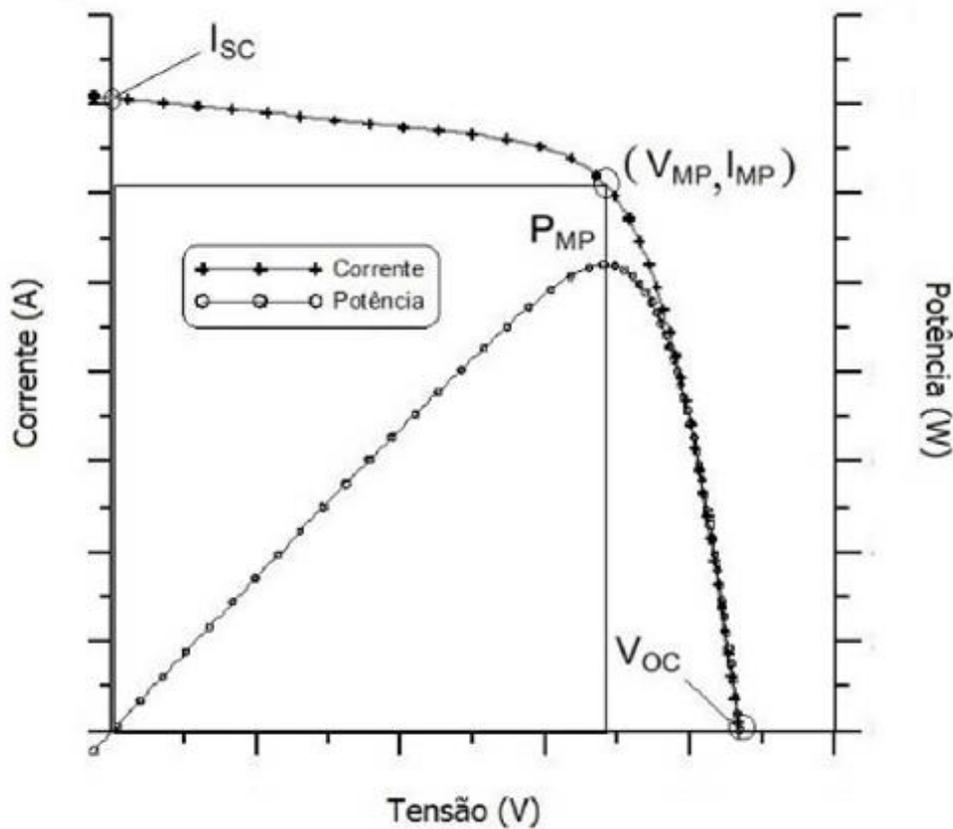
Para a determinação da temperatura de operação da célula fotovoltaica, o fator predominante é a temperatura ambiente, pois a diminuição da tensão pode ocorrer com a redução da temperatura da célula, provocando a elevação da corrente. Contudo, o aumento da corrente é significativamente pequeno para suprir a perda de potência provocada pela diminuição da tensão (PINHO, GALDINO, 2014).

2.2.2 Curvas características dos módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos não possuem a característica de uma fonte elétrica convencional, pois a tensão de saída não é constante. A corrente elétrica nos módulos depende da sua tensão, e a tensão depende da corrente. O ponto principal para a operação do módulo fotovoltaico está relacionado diretamente à carga que está conectada aos seus terminais. Caso conectarmos uma carga que solicita grande quantidade de corrente, a tensão do módulo irá cair. De outra forma conectando uma carga que solicita uma pequena quantidade de corrente, a tensão do módulo será mais alta, podendo ter uma tensão de circuito aberto (tensão máxima) (HECKTHEUER, 2011)

A Figura 7 mostra o vínculo entre a tensão e corrente de saída de um módulo fotovoltaico de silício cristalino (curva característica *I-V*) e também a variação da potência em função da tensão (curva característica *P-V*).

Figura 7 Curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

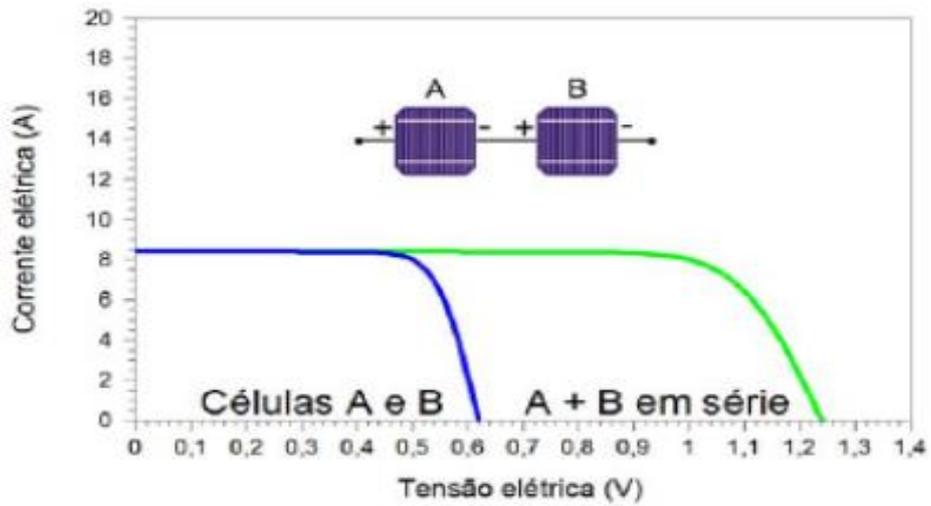


Fonte: PINHO, GALDINO (2014)

No gráfico pode-se observar alguns pontos principais: o primeiro é que o comportamento da fonte não é convencional, pelo fato da tensão na saída não ser constante; o segundo ponto a ser observado no gráfico é o ponto P_{mp} , onde é chamado de ponto de potência máxima, no qual o módulo está trabalhando em potência máxima, consequentemente temos o ponto no gráfico chamado de I_{mp} valor de corrente máxima. Temos também o ponto V_{oc} chamado de tensão de circuito aberto, quando não tem nada conectado ao módulo, onde a corrente é considerada nula. E não menos importante o ponto I_{sc} representando a corrente de curto circuito quando $V = 0$. (CAMILLO, 2015).

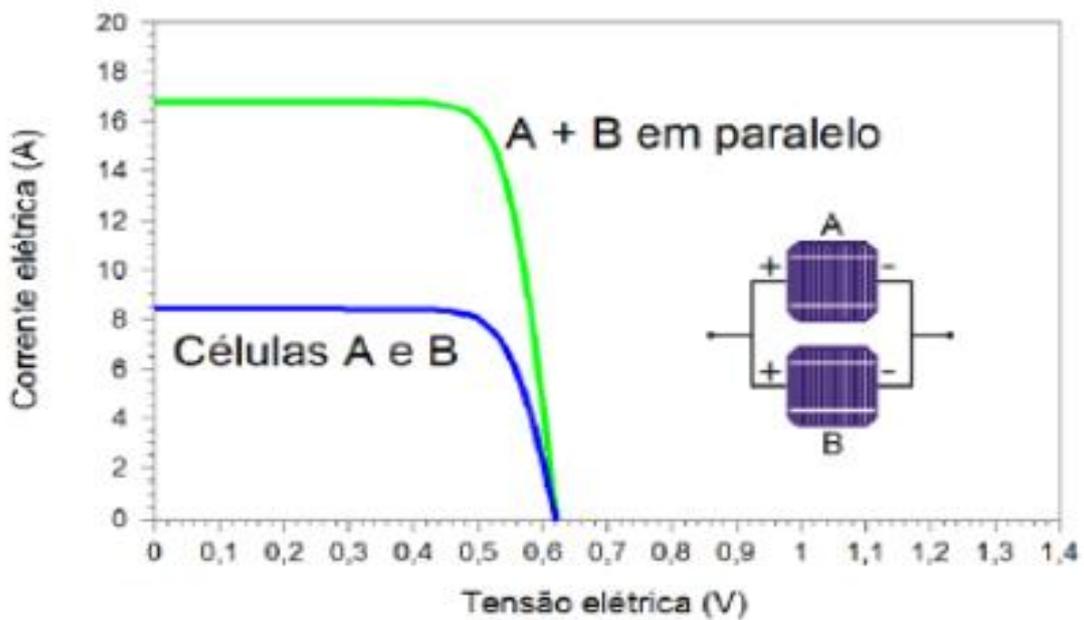
Os gráficos das figuras 8 e 9 representam o comportamento da curva característica I-V de associação células fotovoltaicas de silício cristalino ligadas em série e paralelo.

Figura 8 Curvas I-V de célula fotovoltaica de silício cristalino quando conectada em série.



Fonte: PINHO, GALDINO (2014)

Figura 9 Curvas I-V de célula fotovoltaica de silício cristalino quando conectada em paralelo.



Fonte: PINHO, GALDINO (2014)

Tanto em série quanto em paralelo a soma dos módulos resulta em uma maior potência de saída. Porém a associação dos módulos não é o fator dominante para uma melhor eficiência energética. Fatores naturais como radiação solar e temperatura, também afetam diretamente o desempenho do módulo fotovoltaico (CARVALHO, 2021).

Segundo Villava e Gazoli (2012), o fornecimento da corrente elétrica é diretamente proporcional à intensidade da radiação do sol que atinge suas células fotovoltaicas. Onde o aumento da corrente está ligado à curva de crescimento linear e irradiação solar. Por outro lado, a tensão de circuito aberto cresce de forma logarítmica. Com uma irradiação na faixa de 1000W/m² e corrente elétrica máxima a uma temperatura de 25°C. Contudo no contexto de aplicação real, os valores padrões dificilmente ocorrem, mesmo que a temperatura do ambiente seja igual a 25°C, o valor da temperatura do módulo fotovoltaico será superior (ARAÚJO, 2021). Devido a este fato, é necessário especificar a temperatura nominal de funcionamento (do Inglês, *nominal operating cell temperature*, NOCT), sendo a temperatura obtida pelo módulo solar nas seguintes condições:

- Intensidade da radiação solar incidente na superfície: 800 W/m²
- Temperatura do ar: 20°C;
- Velocidade do vento: 1m/s

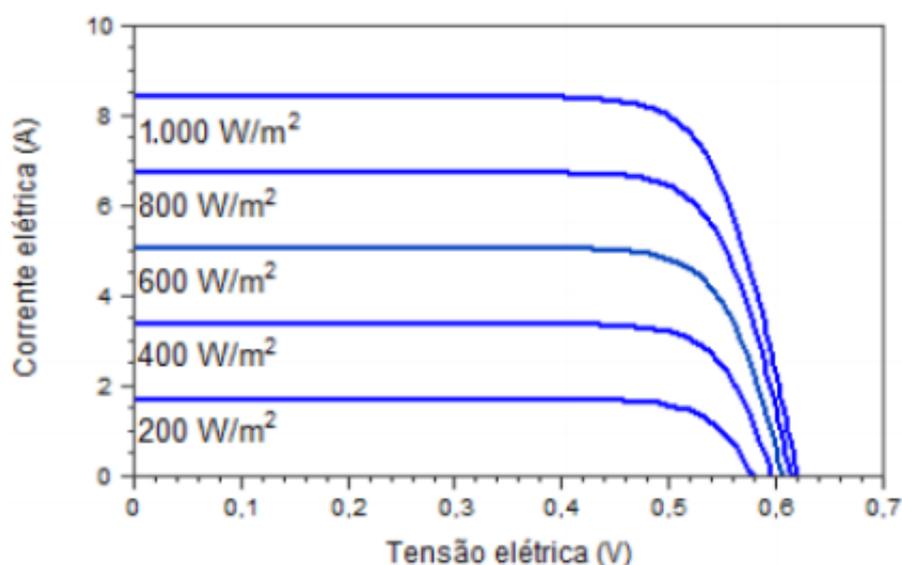
Para o cálculo da temperatura das células fotovoltaicas que fazem parte do módulo solar, utiliza-se a Equação 1.

$$T = T_A + \frac{(NOCT - 20)}{800} \cdot G \quad (1)$$

Onde T e T_A é a temperatura da célula, medida em graus célsius (em °C), G a temperatura do ar (em W/m²) que condiz com à intensidade da radiação. Acaso a velocidade do vento exceda o valor de 1m/s, levará a perdas maiores, fazendo com que a temperatura do módulo seja inferior ao calculado.

Em resumo, quanto menos luz solar o módulo receber, menor será sua capacidade em gerar energia elétrica. A Figura 10 mostra a influência da radiação solar em uma célula fotovoltaica de silício cristalino a uma temperatura de 25°C.

Figura 10 Influência da radiação solar na curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C.



Fonte: PINHO, GALDINO (2014)

Além das propriedades da carga ligada ao sistema, outros fatores são de extrema relevância, para a geração de energia por meio das células fotovoltaicas, tais como:

- Radiação solar: A corrente que a célula produz é equivalente à radiação solar que a célula solar irá receber.
- Temperatura: A tensão gerada pelo módulo fotovoltaico é inversamente proporcional à temperatura do módulo.

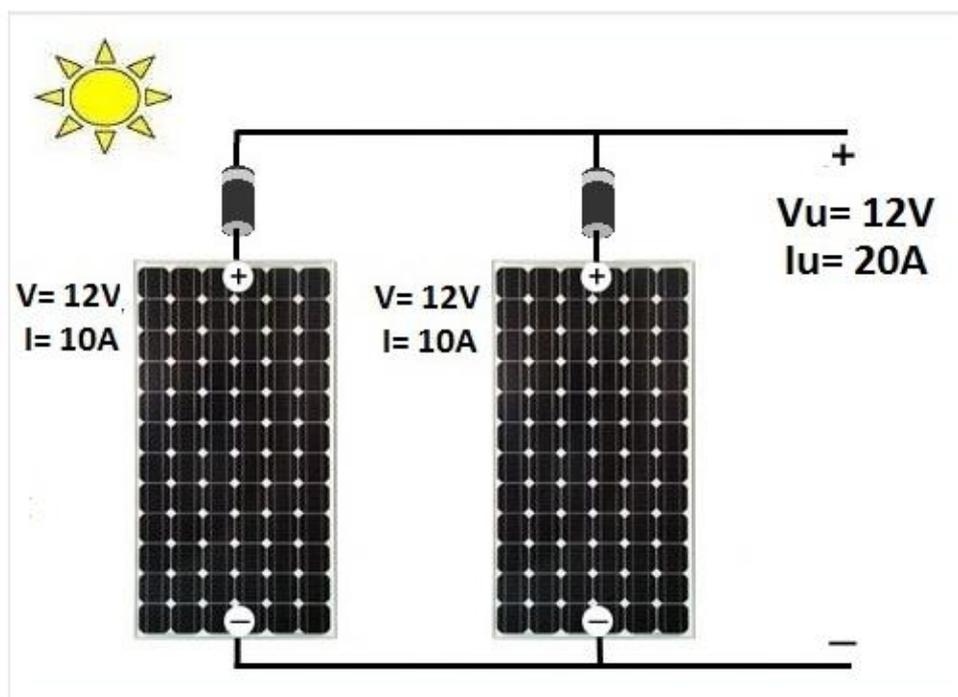
Os dois fatores têm influência direta com a potência gerada pelo módulo, de acordo com a Figura 8.

2.2.3 Associação em paralelo:

Uma célula fotovoltaica dispõe de baixa corrente de saída e tensão. Sendo assim para a obtenção de valores consideráveis de tensão e corrente, é realizada uma junção de diversos módulos fotovoltaicos ou células fotovoltaicas, com o intuito do aumento dos valores de saída. Para a junção dessas células em módulo, é preciso saber o número de células que serão conectadas e o tipo de arranjo. Visto que existem dois tipos de associação, paralelas e série (KAUFMANN, 2012).

A estrutura física de um módulo fotovoltaico se baseia na união de módulos solares que são formados pelas células fotovoltaicas. Portanto quando existe a necessidade de obter valores definidos de corrente elétrica de saída, sem a alteração da tensão utiliza-se o método de associação em paralelo. Logo quando conectados os módulos em paralelo, nota-se o aumento da corrente e a permanência dos valores de tensão de saída. Existindo a configuração de dois módulos fotovoltaicos de mesmo valor de tensão e potência, como apresenta a Figura 11, a ligação dos terminais será terminal positivo de um módulo ligado ao positivo do outro, e em sequência o terminal negativo ligado ao respectivo negativo do outro módulo (DOGADO 2018).

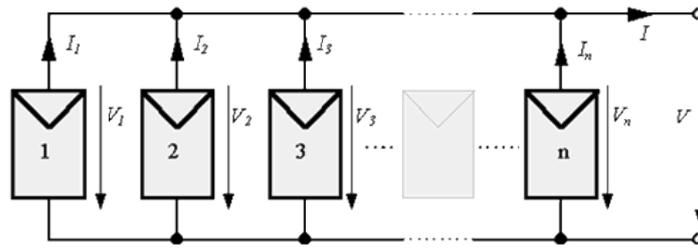
Figura 11 Ligação em paralelo de dois módulos fotovoltaico.



Fonte: (mpptsolar 20--)

A associação em paralelo só é possível se as tensões e potências forem iguais. Se os dois módulos forem diferentes em valores de tensão e potência, não será possível a associação em paralelo. Sendo assim, de suma importância à verificação destes valores, bem antes da realização das ligações. Desse modo a ligação em paralelo pode ser realizada com diversos módulos, porém é necessária uma atenção maior em relação aos valores de corrente, pois se o valor de saída for maior do que 42 Ampères os módulos pode sofrer danos, pois os cabos usados para corrente contínua em sistemas ligados a rede é de 6mm^2 . A Figura 12 mostra o circuito equivalente da associação de módulos em paralelo.

Figura 12 Associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.

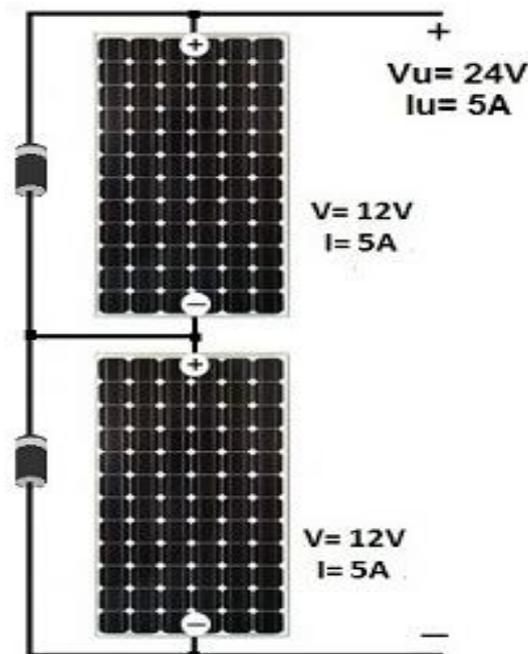


Fonte: (cresesb, 20--)

2.2.4 Associação em série:

Na ocasião em que dois módulos fotovoltaicos de mesma corrente e potência é ligado em série, os valores de tensão são somados e os de corrente permanecem os mesmos. Causando o aumento da tensão e por consequência as perdas serão mínimas. Logo quando se deseja o aumento da tensão e a redução de perdas de energia ao longo dos cabos, a ligação em série é mais recomendada. Para adquirir a tensão máxima do sistema é preciso conferir o valor máximo de tensão do sistema (*Maximun System Voltage*), geralmente informado no rótulo dos módulos. A Figura 13 exemplifica como é a disposição dos módulos fotovoltaicos na associação em série (RAMPINELLI,2007).

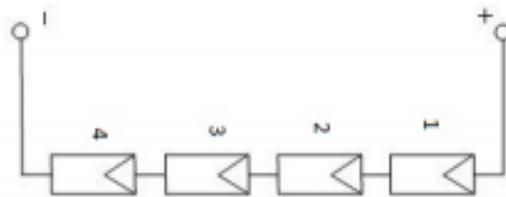
Figura 13 Ligação em série de dois módulos fotovoltaico.



Fonte: MpptSolar (20--)

Observa-se na Figura 13 que, na configuração de módulos fotovoltaicos em série, conecta-se o terminal positivo de um módulo ao terminal negativo do outro módulo, fazendo com que a mesma corrente flua por todos os módulos. Levando em consideração o exemplo da Figura 12, a soma dos dois módulos resulta em uma tensão de 24 volts e a corrente permanece inalterada. Logo a Figura 14 representa a associação em série por meio do circuito equivalente, como o módulo se comporta ligado em série.

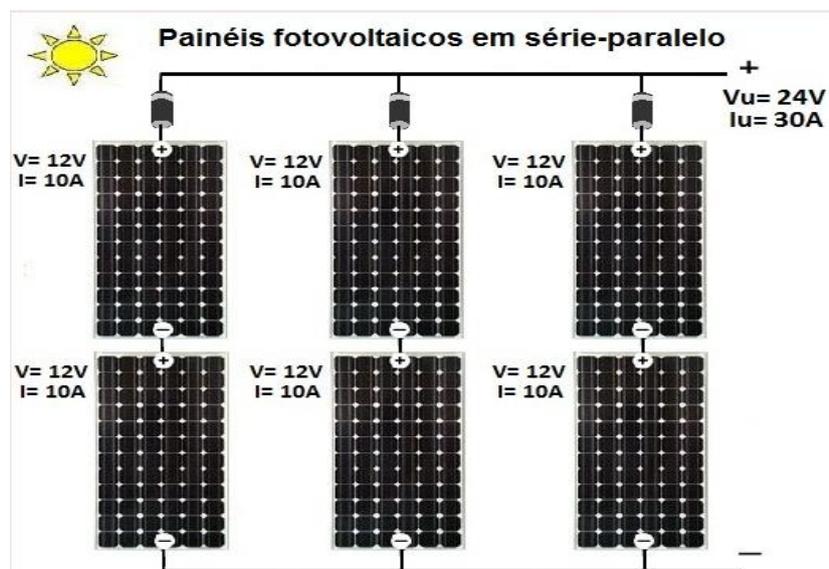
Figura 14 Associação em série de módulos fotovoltaicos.



Fonte: MpptSolar (20--)

Por fim, existe um terceiro modelo de associação para módulos solares, chamado de associação mista, que é a junção dos módulos ligados em série com os módulos em paralelo, logo existe um acréscimo tanto na corrente quanto na tensão, resultando no melhoramento do ponto de máxima potência do sistema, como representa a Figura 15 (SEVERO, 2019).

Figura 15 Ligação em série-paralelo de módulos fotovoltaico.



Fonte: MpptSolar (20--)

2.2.5 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): Tensão máxima que o circuito entrega em condições específicas de temperatura e radiação.
- Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}): Corrente máxima do circuito em determinada condição de temperatura e radiação.
- Potência Máxima (P_m): Máximo valor de potência entregue pelo dispositivo. De acordo com a curva $V \times I$.
- Tensão de máxima potência (V_{mp}): Tensão nominal do módulo, ou seja, é o valor da tensão entregue à carga máxima de potência em condições específicas.
- Corrente de máxima potência (I_{mp}): Valor da corrente entregue para a carga em máxima potência.

3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a formação de um arranjo fotovoltaico é necessário conectar dois ou mais módulos entre si, que conseqüentemente tem-se o aumento da potência final. A interligação entre os módulos resulta em apenas uma única saída de corrente elétrica do arranjo. Já na formação de um sistema fotovoltaico, tem-se o módulo fotovoltaico juntamente com dispositivos responsáveis no controle do sistema como, dispositivos de proteção, supervisão e armazenamento da energia produzida nos módulos (BRAUN-GRABOLLE, 2010). A figura 16 representa melhor a diferença entre uma célula, módulo e um painel fotovoltaico.

Figura 16 Vista da célula, módulo e painel fotovoltaico.

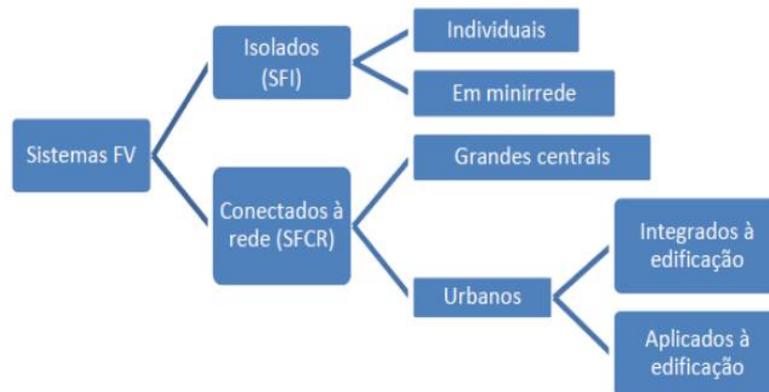


Fonte: URBANETZ JR, (2010)

Existem diversos tipos de sistemas fotovoltaicos, os principais são: Sistema fotovoltaico isolado (SFI) geralmente utilizados em locais onde não se tem acesso a rede elétrica e geralmente utiliza-se baterias como armazenadoras de energia elétrica ou o seu consumo é imediato a produção, e o sistema conectado à rede elétrica (SFCR) que configura geração distribuída. O SFCR tem a particularidade de não necessitar de banco de baterias, devido a energia que é gerada no sistema é posta em paralelo com à rede

elétrica (ZOMER, 2014). A figura 17 mostra como os sistemas fotovoltaicos são dispostos.

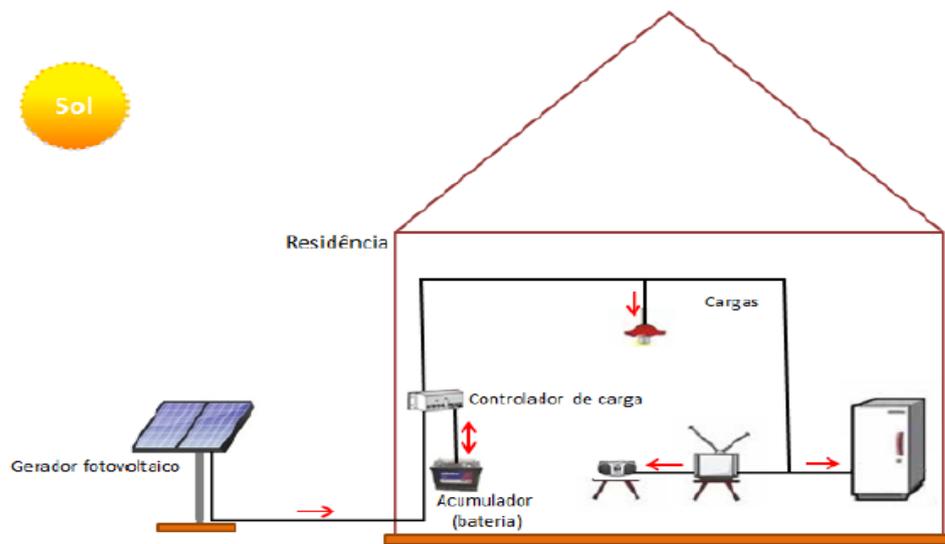
Figura 17 Tipos de aplicações de Sistemas FV



Fonte: URBANETZ JR, (2010)

Os componentes essenciais que formam um sistema fotovoltaico isolado são baterias, módulos fotovoltaicos, inversor de corrente e controlador de carga de acordo com a figura 18.

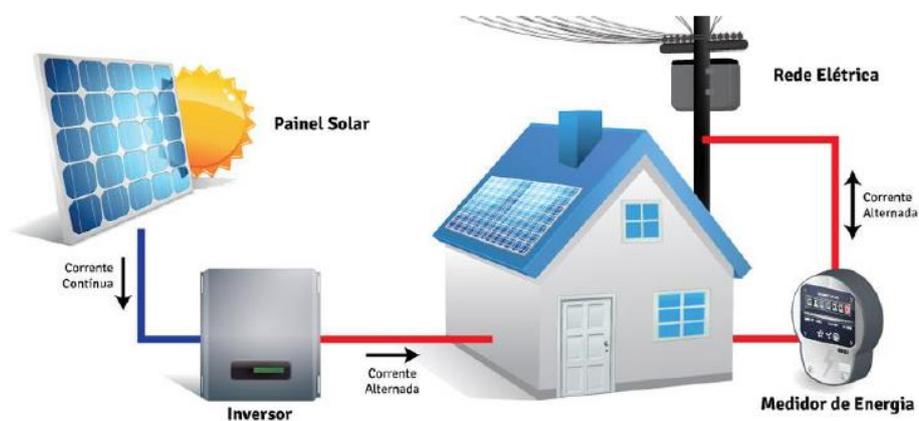
Figura 18 Diagrama simplificado de um SFI domiciliar



Fonte: Pereira *et al*, 2006.

A figura 19 representa bem um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica, onde seus principais elementos são módulos FV que convertem a luz solar em energia elétrica e o inversor que converte a corrente que vem dos módulos FV de corrente contínua em corrente alternada. A vantagem desse sistema é a não utilização de baterias e quando ocorre a queda de energia elétrica na rede, o sistema se auto desliga (URBANETZ JR, 2010).

Figura 19 Diagrama simplificado de um SFVCR



Fonte: (TORTELLI, 2016)

3.1 Inversores (eficiência e perdas):

A energia elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico é produzida em tensão contínua, sendo necessário a conversão para tensão alternada para a utilização nos eletrodomésticos como também para injetar na rede elétrica, quando houver excedente no caso de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. O dispositivo que faz essa comutação é denominado inversor que é responsável tanto pela comutação de tensão quanto pela detecção de sobrecargas, desligando assim o sistema e evitando danos (BRITO, 2013).

A tensão e a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico, variam de acordo com a temperatura, irradiação e sombreamento, podendo causar a redução na geração de energia no sistema, dessa forma o inversor converte a energia produzida nos módulos na mais perfeita relação de corrente e tensão, obtendo-se eficiência maior (CARVALHO, 2013).

Existem dois tipos de inversores que geralmente são utilizados no mercado, os auto-comutados e os comutados, onde os auto-comutados funcionam como fonte de corrente e tensão, já os comutados funcionam apenas como fonte de corrente, ao passo que os auto-comutados são capazes de funcionar em aplicações conectados à rede ou fora da rede elétrica. Porém os comutados só funcionam conectados à rede elétrica. Para determinar a eficiência do inversor deve-se levar em consideração o aproveitamento da energia produzida, pois existem perdas que precisam ser consideradas (Rüther, 2004).

Segundo Rüther (2004) a eficiência máxima de um inversor não é igual a sua potência máxima. Onde a onda senoidal que é obtida na saída do inversor é produzida por meio de semicondutores chaveados, em contrapartida gera componentes harmônicas necessitando assim de indutores e capacitores que atuam como filtros. A consequência obtida devido ao processo é a diminuição na eficiência dos inversores. A figura 20 apresenta a classificação de inversores.

Figura 20 Classificação de inversores por princípio de operação



Fonte: (RAMPINELLI, 2013).

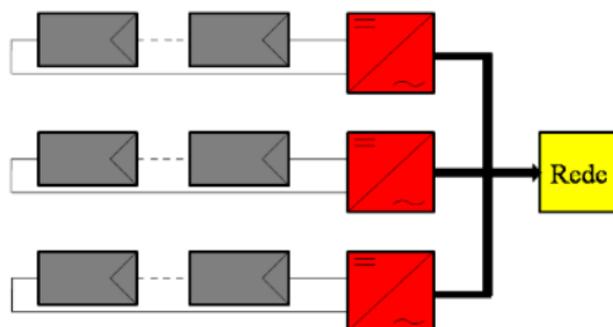
3.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

Segundo RAMPINELLI, (2013) existem quatro configurações de ligação de inversores em arranjos fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

3.2.1 Inversor string:

O inversor *string* é ligado aos módulos diretamente, onde cada fileira de módulos fotovoltaicos recebe um inversor. A figura 21 representa um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com inversor *string*. Onde a imagem em cinza representa os módulos fotovoltaicos, a imagem em vermelho representa o inversor *string*, e a caixa em amarelo a rede elétrica.

Figura 21 Configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversores string.



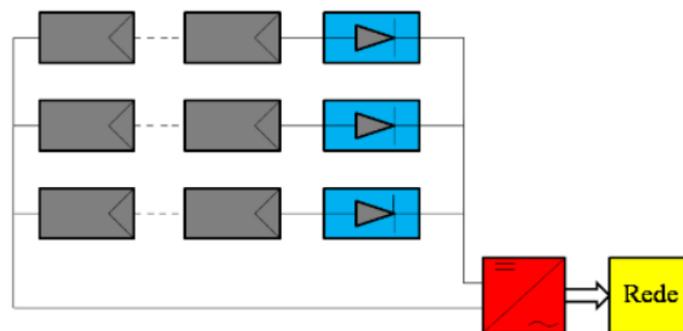
Fonte: (RAMPINELLI, 2013)

Nesta configuração há uma diminuição nas perdas causadas pelo sombreamento e também as perdas nos diodos de bloqueio, aumentando assim a eficiência energética do sistema. Porém como o sistema necessita de um inversor para cada fileiras de módulos fotovoltaicos, há um aumento dos custos, pois quanto maior o número de módulos maior será a quantidade de inversores utilizados por fileiras (DIAS, 2006).

3.2.2 Inversor Central:

A utilização de inversores centrais geralmente é em sistemas fotovoltaicos onde a potência está entre 20 e 400 kW. No qual inúmeros módulos tanto em série quanto em paralelo são conectados somente em um único inversor que é responsável pela conversão de corrente contínua em corrente alternada. A eficiência do inversor central é de alta qualidade devido a poucos estágios de conversão de energia. Porém as desvantagens desse tipo de inversor são, em caso de manutenção ou falha todo o sistema é desligado, exige um local maior e arejado que facilite a circulação de pessoas e a sua saída é monofásica (MARANGONI, 2012). A figura 22 apresenta um sistema fotovoltaico com inversor central, onde toda a conversão do sistema está diretamente ligada ao inversor.

Figura 22 Sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor central.



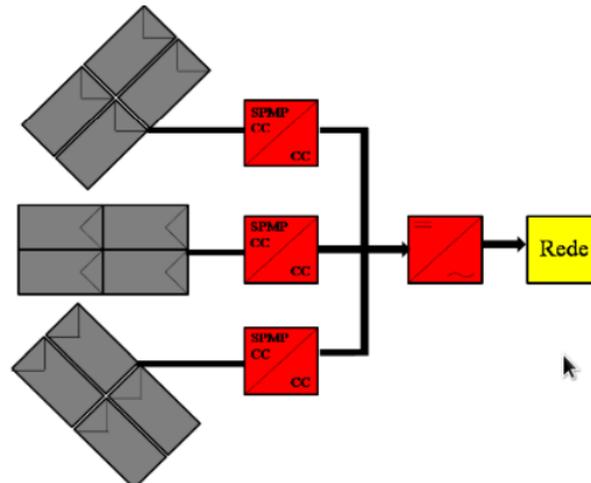
Fonte: (RAMPINELLI, 2013).

3.2.3 Inversor multi-string:

Os inversores *multi-string* são usados em configurações onde o sistema fotovoltaico possui inúmeros módulos com distintas orientações, por conseguinte as condições de irradiação e temperatura serão também diferentes. Os módulos são ligados a conversores c.c/c.c que são responsáveis por reunir o arranjo ou o módulo no seu ponto de máxima potência. A principal vantagem do sistema *multi-string* é o controle de manutenção e reposição que são simples e a possibilidade de aquisição de dados

individuais do sistema fotovoltaico. Em contrapartida há uma redução no rendimento de energia produzida devido a inclusão de outro estágio de potência no caso o conversor c.c./c.c (TAVARES, 2009). A figura 23 mostra a configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor *multi-string*.

Figura 23 Configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor multi-string.

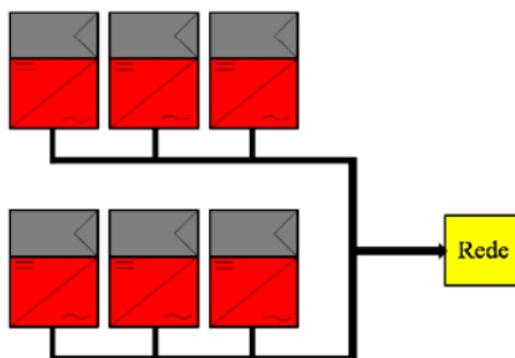


Fonte: (RAMPINELLI, 2013).

3.2.4 Inversor com módulo integrado:

A principal característica do inversor com módulo integrado ou também chamado de módulo c.a é que em sua entrada existe apenas um módulo. Nesta configuração a perda por associação de módulos é praticamente zero, portanto foi muito utilizado na década de 90 em arranjos de baixa potência. Porém devido ao aumento das potências de instalações de sistemas fotovoltaicos, esse tipo de inversor praticamente foi extinto do mercado (RAMPINELLI, 2007). Na figura 24 está representado a configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com inversor com módulo integrado. Onde o módulo possui um inversor c.c./c.a. sendo encarregado pela polarização dos módulos no ponto de máxima potência, mediante as circunstâncias de temperatura, irradiância do módulo, para converter a corrente contínua em alternada.

Figura 24 Configuração do sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor com módulo integrado.



Fonte: (RAMPINELLI, 2013).

3.2.5 Recursos utilizados para melhorar o rendimento dos módulos fotovoltaicos sombreados:

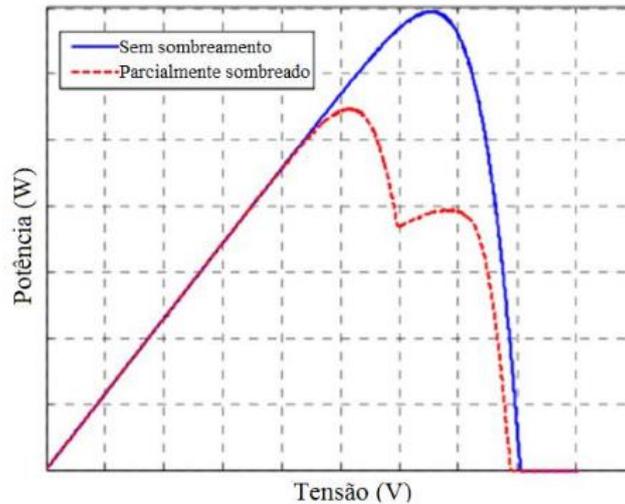
A geração de energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos pode ser prejudicada se no entorno dos módulos existirem construções, árvores ou antenas que produzam sombras nos módulos. O sombreamento causado por essas estruturas interfere na absorção de radiação pelos módulos fotovoltaicos, pois quando uma célula está sombreada ela atua como uma carga dissipando a corrente de entrada, aquecendo a célula e formando os chamados pontos quentes. O correto é que os prováveis sombreamentos sejam dimensionados e mensurados em fase de projetos afim de diminuir perdas do sistema fotovoltaico (PINHO e GALDINO, 2014).

A geração de potência em módulos fotovoltaicos necessita de três fatores sendo estes temperatura da célula, irradiação solar e carga de impedância, onde em situações de luminosidade uniforme a curva de Potência x Tensão do arranjo fotovoltaico demonstrará unicamente um ponto de máximo. Contudo na situação em que o módulo permanecer parcialmente sombreado a curva de Potência x Tensão indicará mais de um ponto de máximo, deste modo uma menor quantidade de irradiação solar será recebida desta maneira a tensão nas células irá diminuir transformando as células fotovoltaicas em cargas e conseqüentemente as células sombreadas irá consumir potência ao invés de produzir (ISHAQUE E SALAM, 2013)

A figura 25 apresenta duas curvas P-V de módulos fotovoltaicos, onde um está sob condições de sombreamento parcial e o outro não está sombreado. Um sistema fotovoltaico está com ponto de máximo e o outro está com dois pontos de máximo.

Analisando as curvas pode-se notar que quando um sistema está sombreado sua geração de energia é afetada.

Figura 25 Curvas P-V de um sistema fotovoltaico.

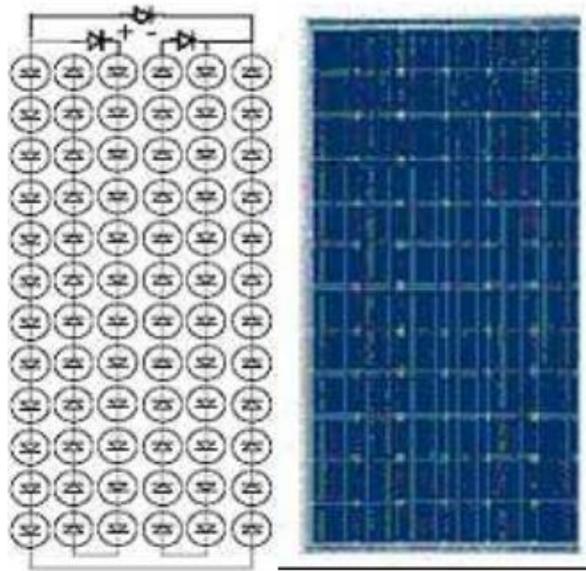


Fonte: (Kandemir et al., 2017)

O método utilizado para minimizar os *hot-spots* ou conhecidos como pontos quentes, onde a célula passa a consumir energia em invés de gerar, é a utilização de díodos de *by-pass*, otimizadores de potência ou microinversores. Na situação em que a célula não estiver sombreada o diodo funciona com polarização reversa onde a corrente elétrica não pode circular por ele, porém quando a célula estiver sombreada o diodo de *by-pass* irá funcionar polarizado diretamente permitindo a circulação de corrente por ele. (HECKTEUER, 2001).

Em sistemas fotovoltaicos onde há associações de módulos tanto em paralelo quanto em série é necessário a utilização de díodos de bloqueio e diodo *by-pass* em série com o módulo, evitando assim as correntes reversas. A corrente reversa é originada quando existe diferença de tensão nos módulos por causa de situações já citadas. (HINCAPIÉ, 2015). A figura 26 representa um módulo fotovoltaico com 72 células em série, onde há diodo de *by-pass* para cada *string*, também há um diodo de bloqueio para todo o módulo fotovoltaico atuando como dispositivo de proteção ao módulo.

Figura 26 Circuito elétrico e foto de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (Rampinelli, 2015).

3.2.6 Micro-inversor

No sistema fotovoltaico tradicional com inversor *string* (única entrada de MPPT) os módulos são conectados em séries formando uma *string*, o qual é conectado a um inversor, onde cada entrada de um inversor é ligada apenas a uma *string*. Posto isto, para monitorar os módulos fotovoltaicos o inversor analisa as características elétricas apenas por *strings*. Portanto se houver problemas em um único módulo, como sombreamento e situações de falhas, todo o desempenho da *string* será afetada (Zheng et al., 2014).

Segundo BRITO MOACY (2013) um dos recursos para evitar essas situações que são responsáveis pela redução da potência máxima no módulo, é o uso do micro inversor que diferentemente do inversor central analisa os módulos isoladamente, uma vez que acontecendo a falha, a produção de energia reduz apenas no módulo afetado e os outros continuam em funcionamento pleno. Porém o seu custo em relação a inversor central é maior a depender da quantidade de módulos necessários no projeto.

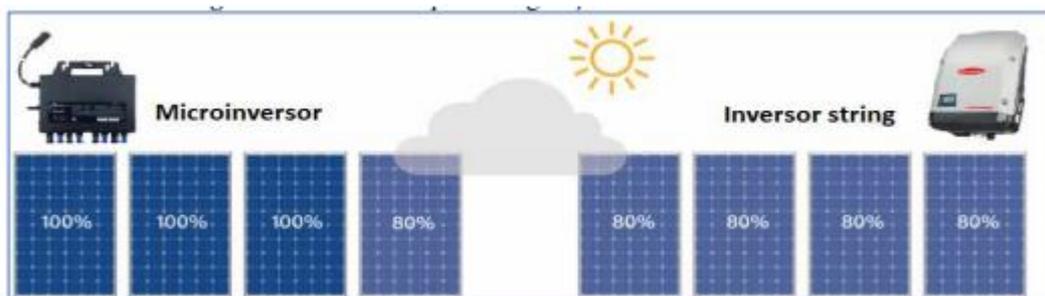
3.2.7 Diferença entre microinversores e inversores string

Embora o objetivo dos dois inversores seja o mesmo, a conversão de corrente contínua para corrente alternada, suas características são bem distintas, onde a utilização de cada um é de acordo com o projeto. Os microinversores por serem conectados

individualmente, ou em alguns modelos até dois módulos, tem como característica o rastreamento da máxima potência em cada módulo utilizando o MPPT, diminuindo assim consideravelmente os efeitos do sombreamento parcial. Diferentemente dos inversores *string*, onde havendo sombreamento parcial toda a fileira (*string*) terá sua produção de energia comprometida pois o monitoramento dos módulos não acontece de forma individual (ZIPP 2015).

Entre outras diferenças estão as dimensões e pesos, onde os inversores *strings* são maiores que o microinversores, porém os microinversores tem durabilidade maior, e a instalação de módulos em configurações com inversores *strings* é exatamente na mesma inclinação e direção pois inclinação diferente são capazes de causar perdas na geração de energia. E como a configuração de microinversor usa a tecnologia MLPE (module level power electronics- Eletrônica de Potência a Nível de módulo) que monitora cada módulo específico, logo o sombreamento não influencia na geração de energia nos demais módulos que estão ligados no mesmo microinversor e muito menos no sistema, como representado pela figura 27 (FERNANDES CAIQUE, 2020).

Figura 27 Efeito de queda de geração devido a sombreamento.



Fonte: (Fernandes Caique, 2020).

3.2.8 Otimizadores de potência:

Entre as inúmeras configurações da arquitetura de sistemas fotovoltaicos, tem-se a utilização de otimizadores de potência, o qual é composto por um conversor de corrente contínua conectado diretamente aos módulos fotovoltaicos. Sua instalação geralmente é embaixo dos módulos fotovoltaicos, e a sua finalidade é amenizar prováveis perdas que acontecem por consequência de sombreamentos, e o aumento da geração de energia nos módulos que maximiza a eficiência do sistema fotovoltaico (VILLALVA, 2010). A forma de instalação é análoga aos dos microinversores, na parte inferior dos módulos fotovoltaicos de acordo com a figura 28.

Figura 28 Otimizadores de potência instalado sob módulos fotovoltaicos.



Fonte: Villalva, 2010

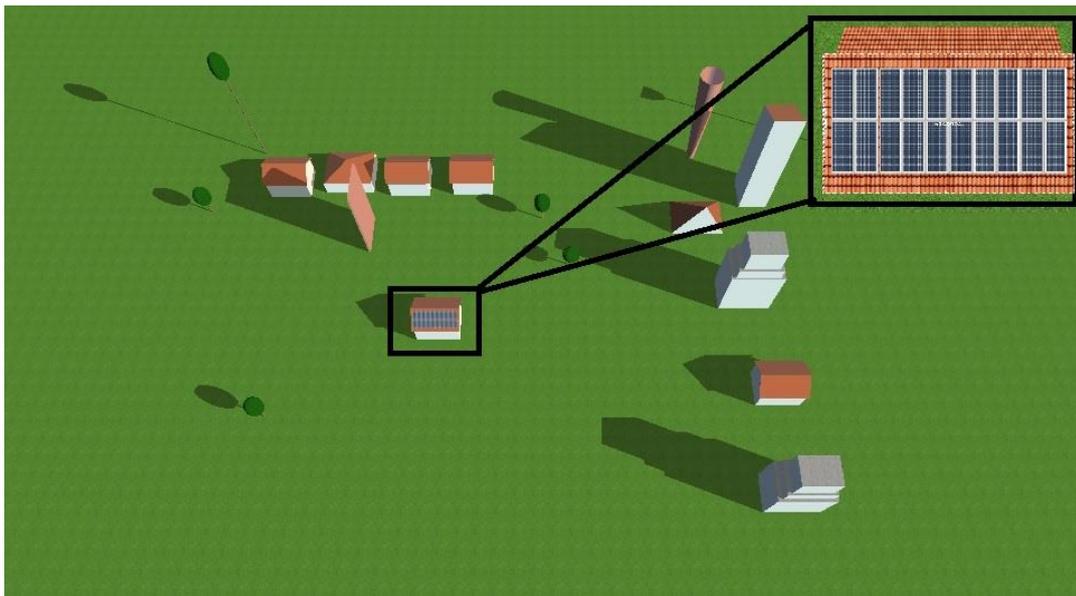
A redução na geração de energia no módulo fotovoltaico devido ao sombreamento não é apenas um dos problemas que os otimizadores de potência são capazes de solucionar. Existem outras contribuições importantes, principalmente para os projetistas, porque a sua utilização viabiliza os projetos mais complexos, onde existem módulos fotovoltaicos dispostos em diversas águas de telhado ou em distintas orientações azimutais. Visto que nos sistemas com inversores tradicionais é recomendado a não utilização de módulos com características diferentes na mesma *string* enquanto nos sistemas fotovoltaicos com otimizadores não há esta ressalva (VILLALVA, 2010).

~~4~~ PROCEDIMENTOS (simulações) Resultados das Simulações

Neste capítulo se iniciarão as simulações que compõe esse trabalho. Com a finalidade de diminuir as perdas em um sistema fotovoltaico hipotético e maximizar a geração de energia, foram realizadas simulações utilizando o *software* PV*SOL em distintas situações com inversores *strings*, microinversores e otimizador de potência. O *software* utilizado é constituído por uma soma de algoritmos e uma estrutura de informações meteorológicas, permitindo apresentar as variáveis que causam influência em um sistema fotovoltaico hipotético ou real simulado no decorrer do ano, tais como temperatura, irradiância, sombreamento, perdas no cabeamento e entre outras.

Inicialmente foi-se projetado um sistema fotovoltaico conectado à rede sem consumo hipotético, sem a presença de sombreamentos consideráveis: Prédios, árvores, antenas e qualquer outra construção que venha causar sombra parcial ou total no sistema fotovoltaico estudado. A figura 29 representa a vista superior da maquete em 3D construída no *software* PV*SOL, onde fora adotado um sistema com 20 módulos fotovoltaicos monocristalino HCM 72X9 de 400W da marca DAH SOLAR e 4 inversores *strings* Inc CSI-1,5K-TL da marca CANADIAN SOLAR. Somando um total de 8KWp de potência total do sistema fotovoltaico.

Figura 29 Vista superior do sistema fotovoltaico com inversor string.



Fonte: Autor.

Em seguida os dados referentes a primeira simulação do sistema fotovoltaico, estão representados no quadro 2. Pode-se notar que o desempenho do sistema é 84,6% e a diminuição do rendimento por sombreamento é praticamente nula, pois não existe construções ou árvores no entorno do sistema fotovoltaico. Após a inclusão dos dados no

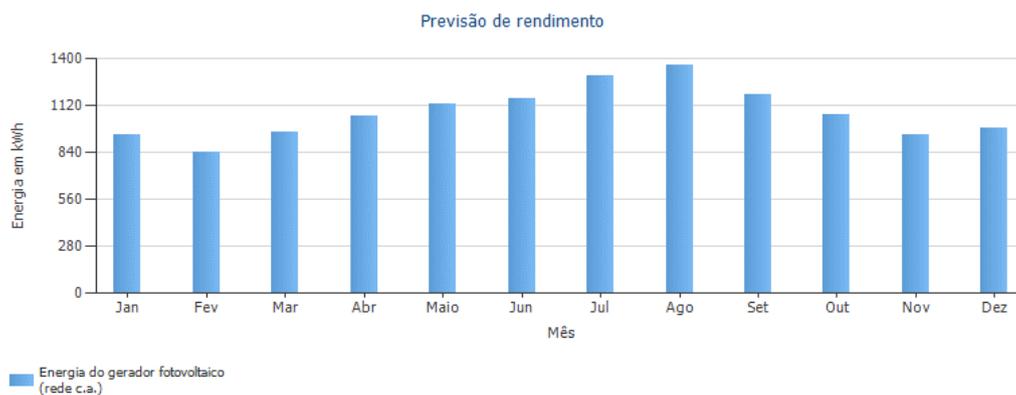
programa e o resultado da potência, rendimento e desempenho do sistema fotovoltaico, o *software* gera resultados estimados para um prazo de 25 anos, que é o prazo do projeto de acordo com o SAM (*System Advisor Model*). A figura 30 representa o gráfico da geração de energia elétrica ao longo do ano inicial do sistema fotovoltaico, onde pode-se notar que nos meses de verão a geração de energia elétrica é maior.

Quadro 2: Sistema fotovoltaico com inversor *string* sem sombreamento

Potência do gerador fotovoltaico	8 kWp
Rendimento anual específico	1.611,37 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	84,6%
Diminuição do rendimento por sombreamento	0,3%/Ano
Injeção na rede	12.900 kWh/Ano
Injeção na rede no primeiro ano (incl. degradação do módulo)	12.900 kWh/Ano

Fonte: Autor.

Figura 30 Previsão de rendimento do gerador fotovoltaico.



Fonte: Autor.

O Quadro 3 mostra os dados detalhados do sistema fotovoltaico com inversor *string* e sem a variável sombreamento. Nota-se que a variável (sujeira) e (perdas por cabeamento total) não foram consideradas no projeto pois o estudo se limita apenas ao funcionamento do sistema fotovoltaico mediante a sombreamento parcial. Como esperado, não há perdas por sombreamentos na geração de energia.

Quadro 3: Balanço energético

Irradiação global - horizontal	1.883,02	kWh/m²	
---------------------------------------	-----------------	--------------------------	--

Desvio em relação ao espectro padrão	-18,83	kWh/m ²	
Reflexão do solo (albedo)	4,78	kWh/m ²	
Orientação e inclinação do plano dos módulos	39,15	kWh/m ²	
Sombreamento independente do módulo	-5,29	kWh/m ²	
Reflexão na superfície de módulo	-16,61	kWh/m ²	
Irradiação global no plano dos módulos	1.886,22	kWh/m ²	
Irradiação global fotovoltaica	75.977,52	kWh	
Sujeira	0,00	kWh	
Conversão de STC (eficiência nominal do módulo 19,88 %)	-60.875,88	kWh	
Energia fotovoltaica nominal	15.101,65	kWh	
Sombra parcial, específica do módulo	-8,28	kWh	
Comportamento sob baixa irradiação	-212,30	kWh	
Desvio em relação à temperatura nominal do módulo	-1.188,30	kWh	
Diodos	-0,92	kWh	
Mismatch (indicações do fabricante)	-273,84	kWh	
Mismatch (conexão/sombra)	-0,08	kWh	
Energia fotovoltaica (c.c.) sem redução pelo inversor	13.417,93	kWh	
Potência CC mínima não atingida	-0,65	kWh	
Redução devido à faixa de tensão PMP	0,00	kWh	
Redução devido à corrente c.c. máx.	0,00	kWh	
Redução devido à potência c.c. máx.	0,00	kWh	
Redução devido à potência c.a. máx./cos phi	-51,09	kWh	
Perda no seguidor PMP	-0,41	kWh	
Energia fotovoltaica (c.c.)	13.365,77	kWh	
Energia na entrada do inversor	13.365,77	kWh	
Divergência entre tensão de entrada e tensão nominal	-18,60	kWh	-0,14 %
Conversão c.c./c.a.	-447,42	kWh	-3,35 %
Consumo em espera (Inversor)	-8,81	kWh	-0,07 %
Perda cabeamento total	0,00	kWh	0,00 %
Energia fotovoltaica (c.a.) menos consumo em espera	12.890,94	kWh	
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	12.899,75	kWh	

Fonte: Autor

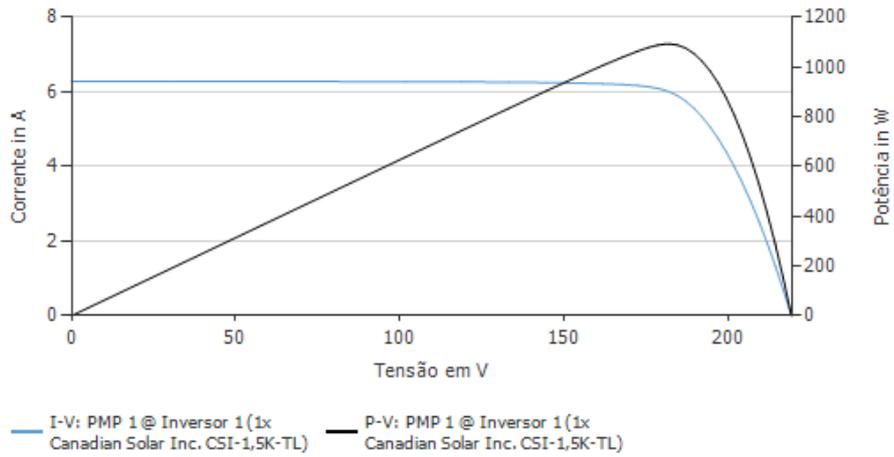
Com todos os dados detalhados do sistema fotovoltaico com inversor *string* e sem a presença de sombreamento, pôde-se gerar no *software* os gráficos das curvas características do sistema fotovoltaico (PV e IV). Onde os meses escolhidos foram: 21 de junho (solstício de inverno), 21 de setembro (primavera), 21 de dezembro (verão) e 21 de março (outono) nos horários de 08h00min, 10h00min, 12h00min, 14h00min e as 16h00min. Os dados climáticos utilizados foram da cidade de Palmas Tocantins, que fica na região norte do Brasil. De acordo com os gráficos das curvas características das figuras 31, 32, 33 e 34 pode-se observar os valores de correntes, tensão e potência onde a potência elétrica é obtida por meio do produto de tensão e corrente. Na qual as medidas de um módulo fotovoltaico podem ser plotadas por meio de um gráfico denominado curva IV e PV. Estas curvas representam os cinco parâmetros para classificar os aspectos de um módulo fotovoltaico que são: Tensão e corrente de potência máxima (V_{mp} , I_{mp}), potência máxima (P_m), corrente de curto circuito (I_{sc}) e tensão de circuito aberto (V_{oc}) (CARVALHO, 2012).

No gráfico da figura 31 nota-se que o valor inicial da corrente é aproximadamente 3,5 A e a tensão inicial é zero, sendo assim temos a corrente inicial chamada de corrente de curto circuito (I_{sc}), pois não existe uma diferença de potencial e conseqüentemente não há geração de potência. Já no ponto denominado V_{oc} não há corrente elétrica, porém existe a máxima diferença de potencial, portanto temos um circuito aberto e a geração de potência inexistente neste ponto. Contudo no mesmo gráfico observa-se que conforme o nível de tensão aumenta os valores de potência aumentam. O ponto de potência máxima (P_m) é o joelho da curva IV no qual a máxima potência é extraída. O ponto de potência máxima se dá pelo produto da tensão de potência máxima (V_{mp}) e corrente de potência máxima (I_{mp}) calculado utilizando a fórmula $P_m = I_{mp} \times V_{mp}$. Desse modo os inversores operam para que os módulos trabalhem neste ponto de potência máxima (P_{mp}) (ARAÚJO, 2016).

Figura 31 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com inversor string-Sem sombreamento, 08h00min de 21 de junho.

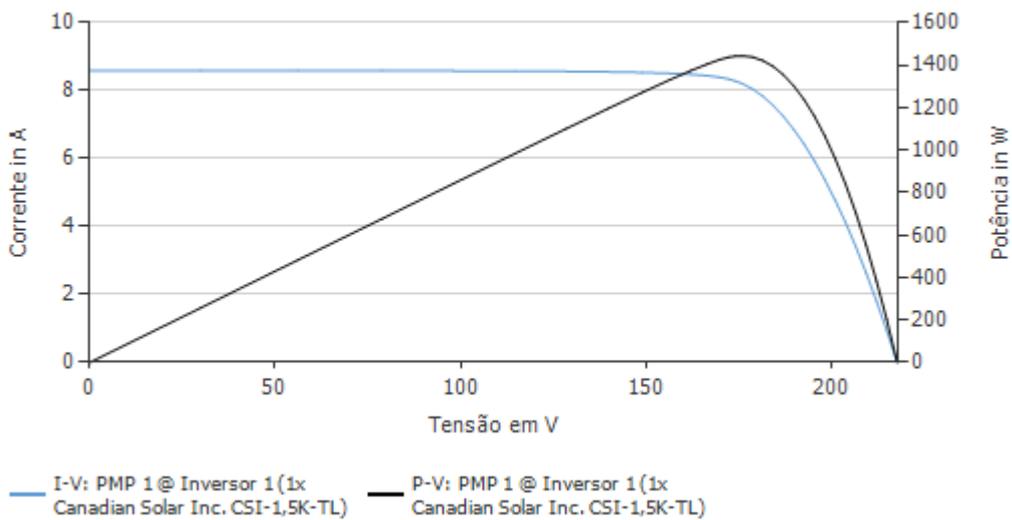
Fonte: Autor.

Figura 32 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com inversor string-Sem sombreamento, 10h00min de 21 de junho.



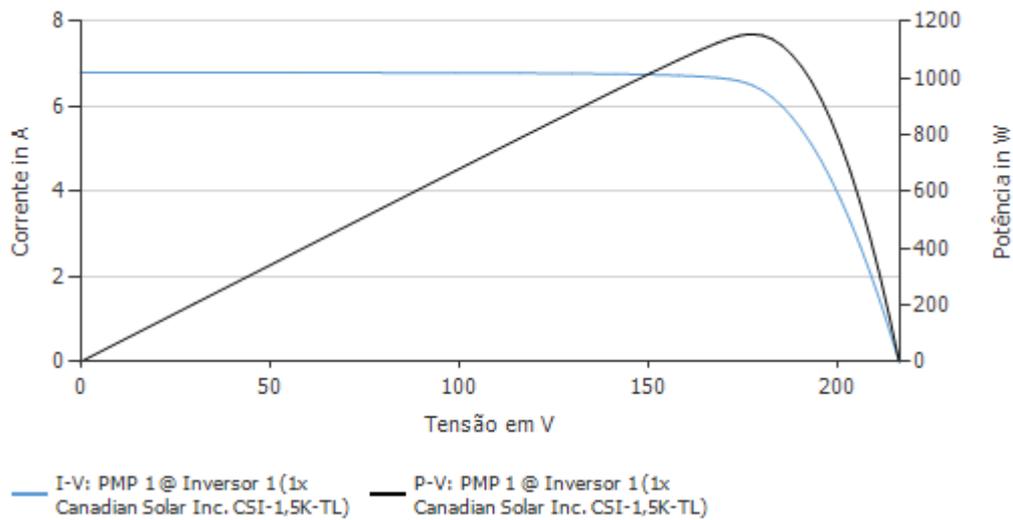
Fonte: Autor.

Figura 33 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com inversor string-Sem sombreamento, 12h00min horas. 21 de junho.



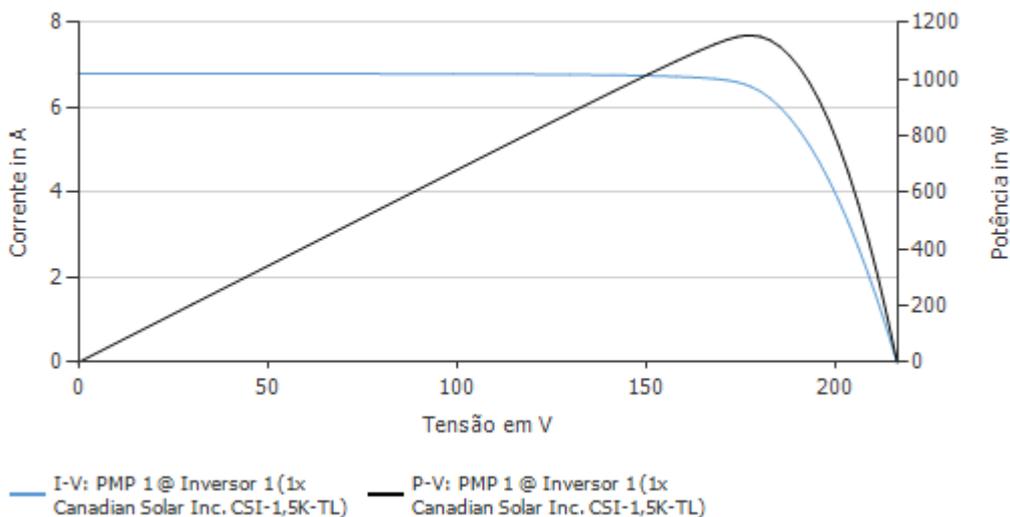
Fonte: Autor.

Figura 34 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com inversor string-Sem sombreamento, 14h00min horas. 21 de junho.



Fonte: Autor.

Figura 35 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com inversor string-Sem sombreamento, 16h00min horas. 21 de junho.



Fonte: Autor.

Já nos gráficos das figuras 36, 37, 38 e 39, a variação da corrente elétrica é proporcional a irradiação solar, oscilando de acordo com as diferentes horas do dia. Quanto mais ensolarado o dia mais corrente elétrica o módulo produzirá. Já a tensão elétrica sofre influência pela temperatura, onde o aumento da temperatura nos módulos causa uma redução da eficiência, (ARAÚJO 2016).

Para a segunda simulação foram utilizados os mesmos módulos fotovoltaicos e inversores *string*, porém com otimizadores e sem o dispositivo, levando em consideração o sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos. Os dados climáticos utilizados nas simulações são os mesmos referentes a cidade de Palmas Tocantins (Latitude: 10° 10' 8" Sul, Longitude: 48° 19' 54" Oeste). A figura 36 representa uma situação hipotética de um sistema fotovoltaico com inversor *string* Inc CSI-1,5K-TL da marca CANADIAN SOLAR e utilizando otimizadores de potência da marca Tigo TS4 com módulos fotovoltaicos HCM 72X9 de 400W da marca DAH SOLAR. Foram utilizados 20 módulos gerando uma potência total de 8 KWp. E a figura 37 representa a taxa de sombreamento do sistema fotovoltaico.

Figura 36 Vista superior com sombreamento 21 de dezembro a 08h00min.



Fonte: Autor

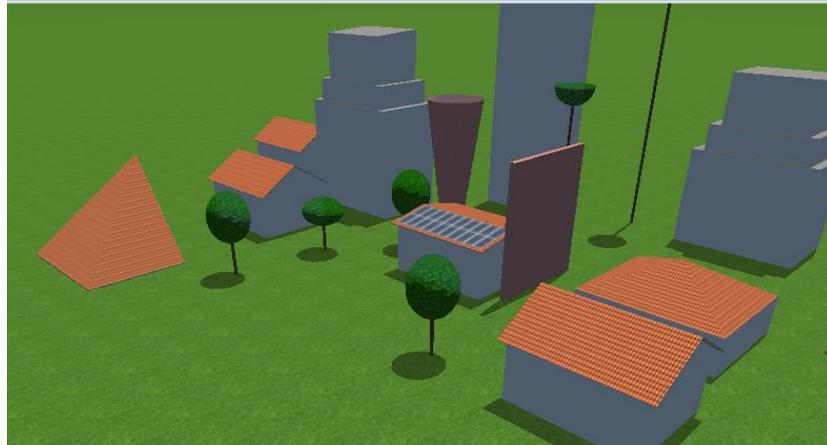
Figura 37 Taxa de sombreamento inversores strings



Fonte: Autor

Já a figura 38 representa a vista lateral da maquete onde nota-se tanto os módulos fotovoltaicos quanto a presença do sombreamento sobre o sistema fotovoltaico, as 12 horas da manhã de 21 de dezembro.

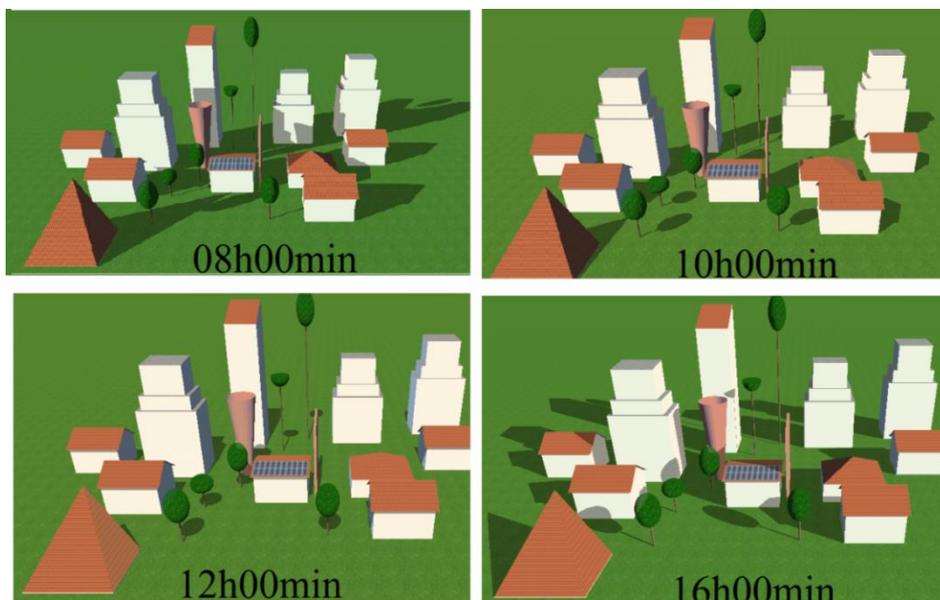
Figura 37 Vista Noroeste com sombreamento a 12h00min.



Fonte: Autor

Por meio do programa PVSOL, foi possível a verificação das sombras nos módulos em diferentes horas e dias do ano, onde o software é capaz de realizar cálculos de taxas de sombreamentos, como mostrado na figura 39 onde as ilustrações representam o sistema sombreado no dia 21 de junho, nos horários de: 08h00min, 10h00min, 12h00min e 16h00min.

Figura 38 Vista Noroeste com sombreamento a 12h00min.



Fonte: Autor

O programa admite que o utilizador inclua módulos em série ou paralelo e exhibe a curva IV e PV, e o ponto de potência máxima conforme os dados inseridos pelo usuário. Para este trabalho o projeto foi dividido em duas áreas de 10 módulos cada, com uma potência total de 4KWp com todos os módulos em série. Sendo assim foi possível a análise dos efeitos do sombreamento parcial do sistema.

Os módulos utilizados em todas as simulações foram os monocristalinos, que se encontram no acervo do *software*. As informações desses módulos estão presentes no quadro 4 em condições padrões (irradiância solar de 1000W/m² e temperatura a 25°C).

Quadro 4: Características dos painéis fotovoltaicos

CARACTERÍSTICAS	MONOCRISTALINO
Potência Nominal	400 W
Corrente de curto-circuito	10,32 A
Corrente de máxima potência	9.86 A
Tensão de circuito aberto	49 V
Tensão de máxima potência	40 V
Número de células em série	144

Fonte: PVSOL

Com os dados do quadro 4 acima, cada módulo fotovoltaico fora submetido a ambientes diferentes com dois tipos de configurações, com inversores *strings* com e sem otimizadores de potência e micro inversores. Ambas sob o efeito do sombreamento causado por árvores e prédios ao entorno e sem os elementos que causassem sombras nos módulos. De acordo com as características detalhadas previamente no quadro 2, para cada tipo de módulo fotovoltaico fora utilizado dias, hora e meses iguais (março, junho, setembro e dezembro, 08h00min, 10h00min, 12h00min, 14h00min e 16h00min). A primeira simulação é de dois sistemas fotovoltaicos com 20 módulos em série e com 4 inversores *string* Inc CSI-1,5K-TL da marca CANADIAN SOLAR com e sem a utilização de otimizadores de potência e sob condições de sombreamento.

Na configuração tanto com otimizadores de potência como sem o dispositivo, devido a pouco sombreamento, a diferença do rendimento é pequena, de acordo com os dados produzidos pelo programa, porém uma diferença relevante é que, com a utilização de otimizadores de potência os valores de *mismatch* zeraram. Os quais segundo RÜTHER, 2004 é quando um módulo tem capacidade maior ou menor de gerar energia

comparado com outro módulo, causando assim problemas a todo o sistema fotovoltaico, sendo que existem dois tipos de *mismatch*, o de indicações do fabricante (diferença de potência dos módulos do mesmo modelo) e o *mismatch* de operação (aumento dos *mismatch* de fabricação por elementos externos, como sombreamentos, inclinações diferentes, sujeira e temperaturas elevadas nos módulos fotovoltaicos). O quadro 5 contém o balanço energético de ambas configurações.

Quadro 5: Balanço energético do sistema fotovoltaico sombreado- inversor *strings*.

	COM OTIMIZADOR Tigo Energy, Inc-TS4-A-O.			SEM OTIMIZADOR	
Irradiação global - horizontal	1.883,02	kWh/m ²		1.883,02	kWh/m ²
Desvio em relação ao espectro padrão	-18,83	kWh/m ²	-1,00 %	-18,83	kWh/m ²
Orientação e inclinação do plano dos módulos	39,15	kWh/m ²	2,09 %	39,15	kWh/m ²
Sombreamento independente do módulo	-79,35	kWh/m ²	-4,16 %	-79,35	kWh/m ²
Irradiação global no plano dos módulos	1.812,90	kWh/m ²		1.812,90	kWh/m ²
Conversão de STC (eficiência nominal do módulo 18,39 %----- 19.88%)	-58.509,64	kWh	-80,12 %	-58.509,64	kWh
Energia fotovoltaica nominal	14.514,65	kWh		11.443,96	kWh
Sombra parcial, específica do módulo	-2.060,55	kWh	-10,58 %	-1.527,67	kWh
Comportamento sob baixa irradiação	-176,92	kWh	-1,36 %	-177,04	kWh
Desvio em relação à temperatura nominal do módulo	-1.027,74	kWh	-8,03 %	-1.028,27	kWh
Diodos	-9,04	kWh	-0,08 %	-16,35	kWh
Mismatch (indicações do fabricante)	0,00	kWh	0,00 %	-235,31	kWh
Mismatch (conexão/sombra)	-0,33	kWh	0,00 %	-86,06	kWh
Otimizador de potência (conversão/compensação CC)	-98,66	kWh	-0,84 %	0,00	kWh
Energia fotovoltaica (c.c.) sem redução pelo inversor	11.666,33	kWh		11.443,96	kWh

Perda no seguidor PMP	0,00	kWh		-0,57	kWh
Energia fotovoltaica (c.c.)	11.529,45	kWh		11.288,66	kWh
Conversão c.c./c.a.	-412,66	kWh	-3,58 %	-407,29	kWh
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	11.116,79	kWh		10.864,94	kWh

Fonte: Autor

Com o uso de otimizadores de potência os valores de *mismatch* são zerados, porém por ser um dispositivo eletrônico existe um consumo de energia para o seu funcionamento. Esta é uma das desvantagens da utilização de otimizadores de potência em sistemas fotovoltaicos, a outra seria em relação ao aumento do custo no projeto. Que podem ser consideradas pequenas em relação as vantagens que o dispositivo tem para o sistema fotovoltaico em escala de minigeração, pois em microgeração a diferença não é tão notável (MELO, 2017).

Já na configuração sem otimizadores de potência, a perda no sistema é maior considerando um projeto em grande escala onde qualquer pequeno detalhe repercute nos valores finais de gastos, devido a fatores já citado como, sombreamento, sujeira e altas temperaturas ou inclinações diferentes dos módulos, causando assim as perdas por *mismatch*, que só podem ser evitadas com um sistema fotovoltaico bem planejado ou com a utilização de tecnologia MLPE (Eletrônica de Potência a Nível de Módulo) (MARANGONI, 2012).

Porém no sistema simulado sem a utilização de otimizadores de potência, as perdas são minimizadas devido a utilização de vários inversores strings de 1,5Kw divididos em cada 5 módulos fotovoltaicos, que minimiza o impacto causado pelas sombras. A figura 40 representa a divisão das strings por inversores. Onde cada inversor com apenas uma MPPT está conectada a uma string com 5 módulos fotovoltaicos.

Figura 39 Divisão de strings por inversores.

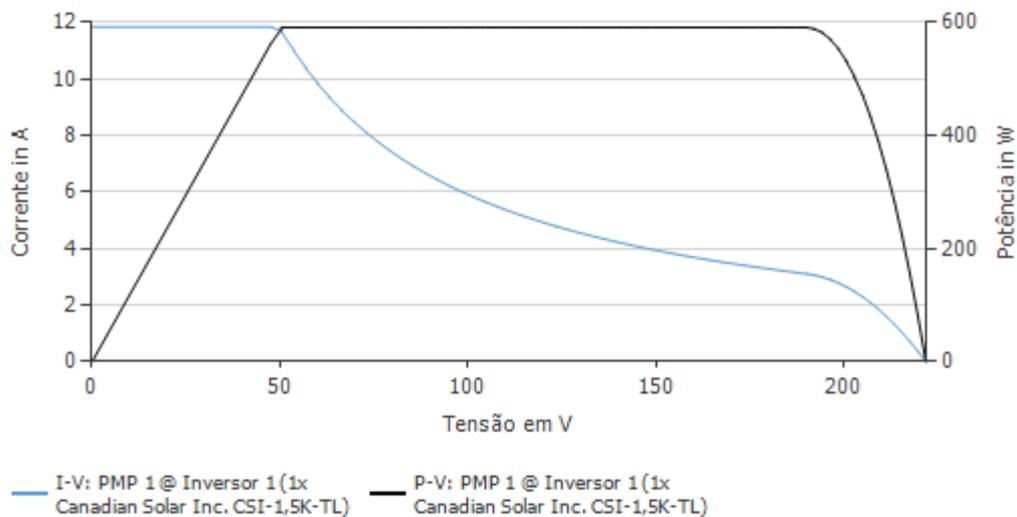


Fonte: Autor.

Nas figuras 41, 42, 43,44 e 45 são representadas as curvas características (PV e IV) do sistema fotovoltaico com inversores *string*, e otimizadores de potência no dia 21 de junho nos horários de 8h00min, 10h00min, 12h00min, 1400hmin e 16h00min. Onde a utilização do dispositivo de acordo com os gráficos provoca uma melhora significativa nos níveis de corrente do sistema, que conseqüentemente aumenta os níveis de potência do sistema fotovoltaico. Pois o otimizador de potência para a conservação da potência abaixa os níveis de tensões e aumentam os níveis de corrente corrigindo-as para equiparar-se as outras correntes dos módulos que não estão sofrendo o sombreamento (Markvart & Castañer, 2003).

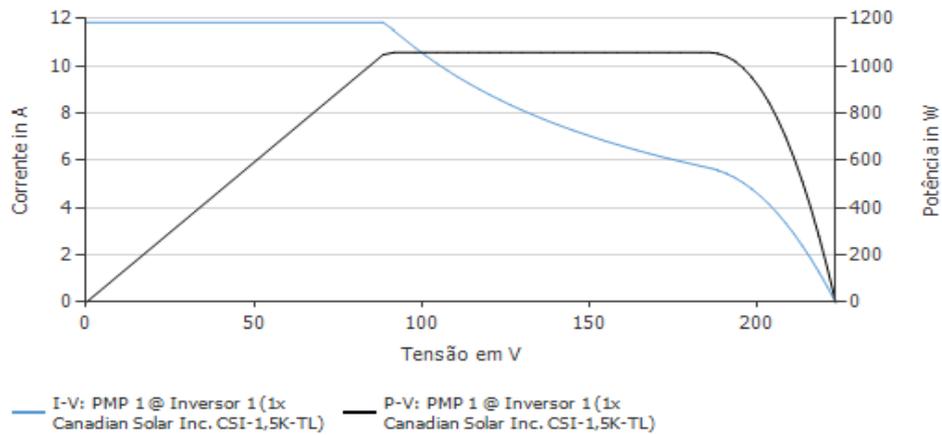
Já as figuras 46, 47, 48, 49 e 50 apresentam o mesmo sistema fotovoltaico nas mesmas condições, porém sem o otimizador de potência, onde os níveis de corrente são menores do que os níveis de tensões que são relativamente maiores comparados os níveis de tensões das simulações com otimizadores de potência.

Figura 40 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com otimizador de potência 08h00min.



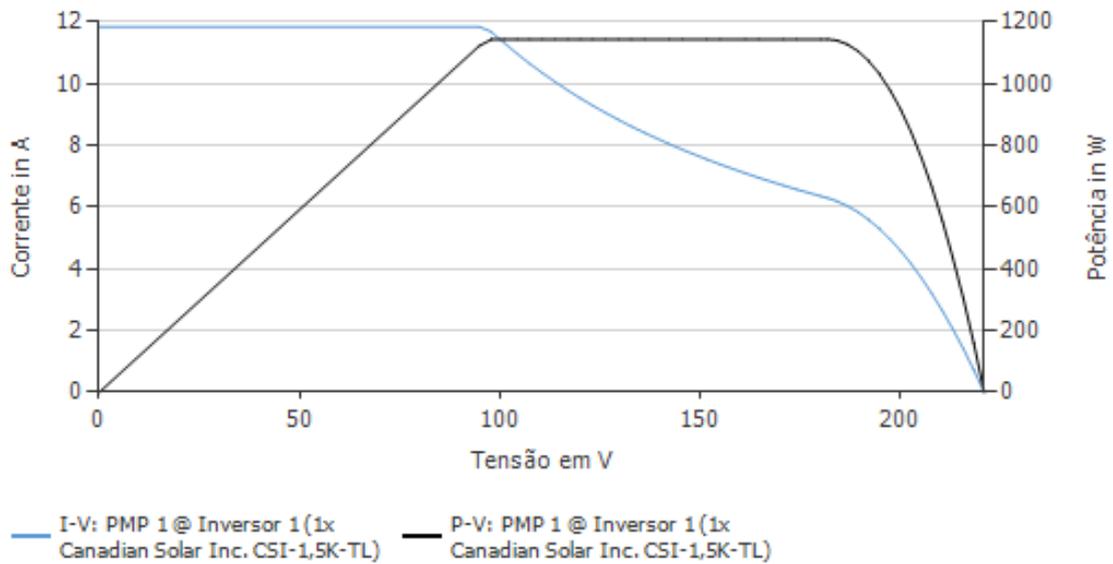
Fonte: Autor

Figura 41 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com otimizador de potência 10h00min.



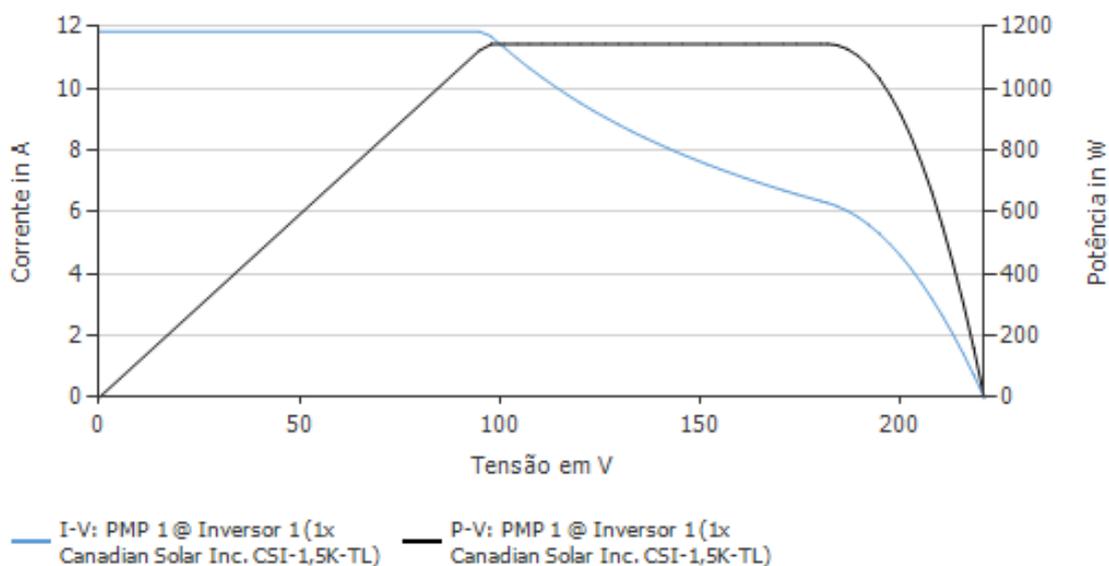
Fonte: Autor

Figura 42 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com otimizador de potência 12h00min.



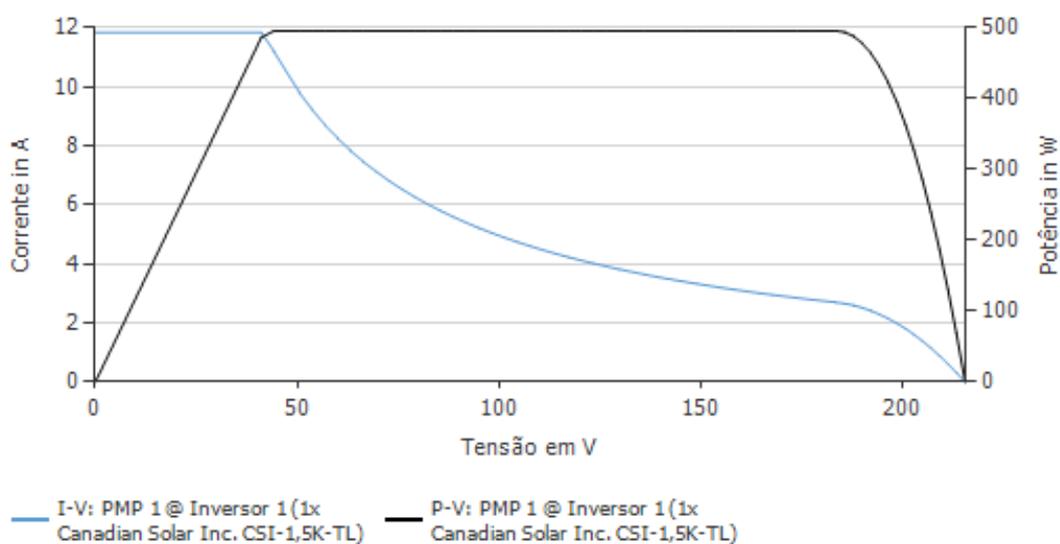
Fonte: Autor

Figura 43 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com otimizador de potência 14h00min.



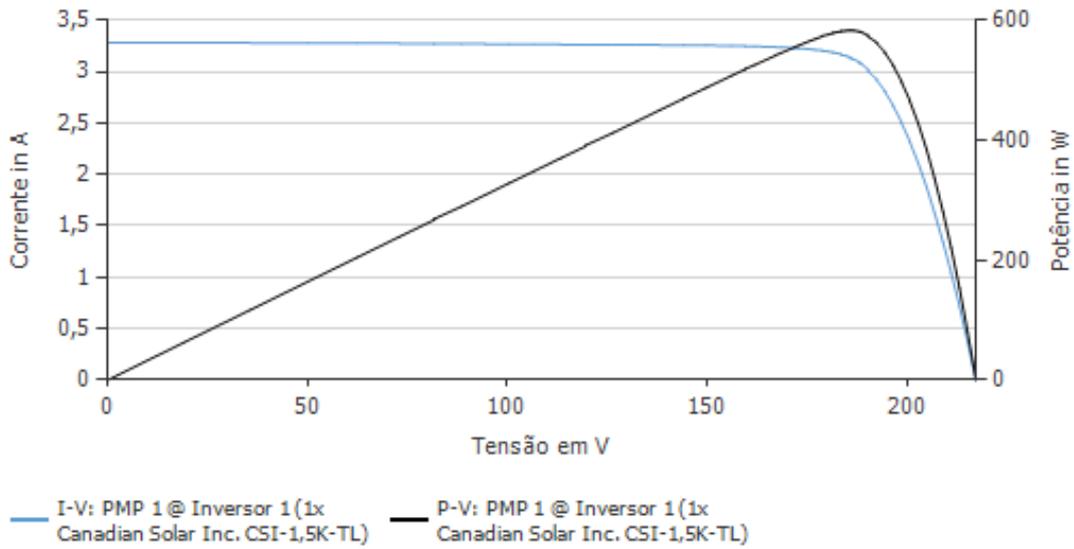
Fonte: Autor

Figura 44 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico com otimizador de potência 16h00min.



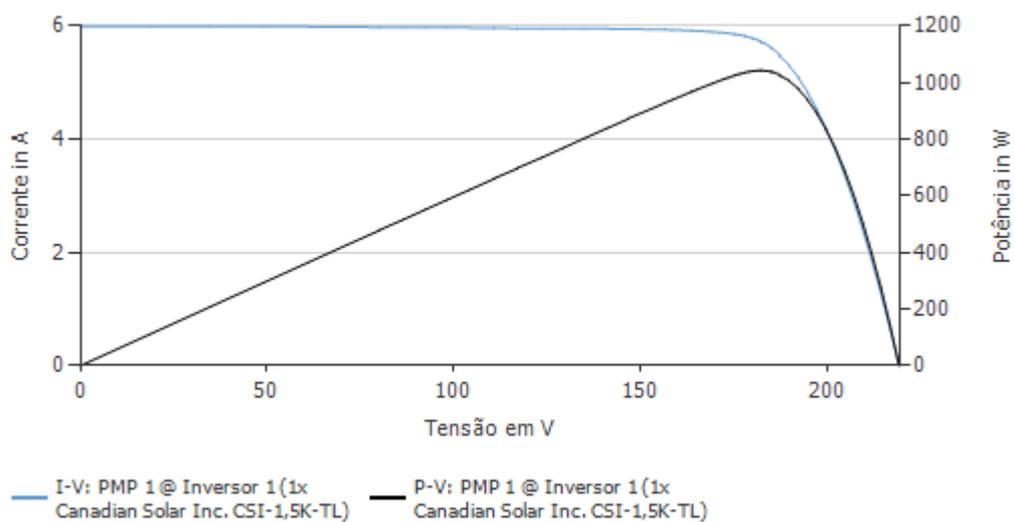
Fonte: Autor

Figura 45 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 08h00min.



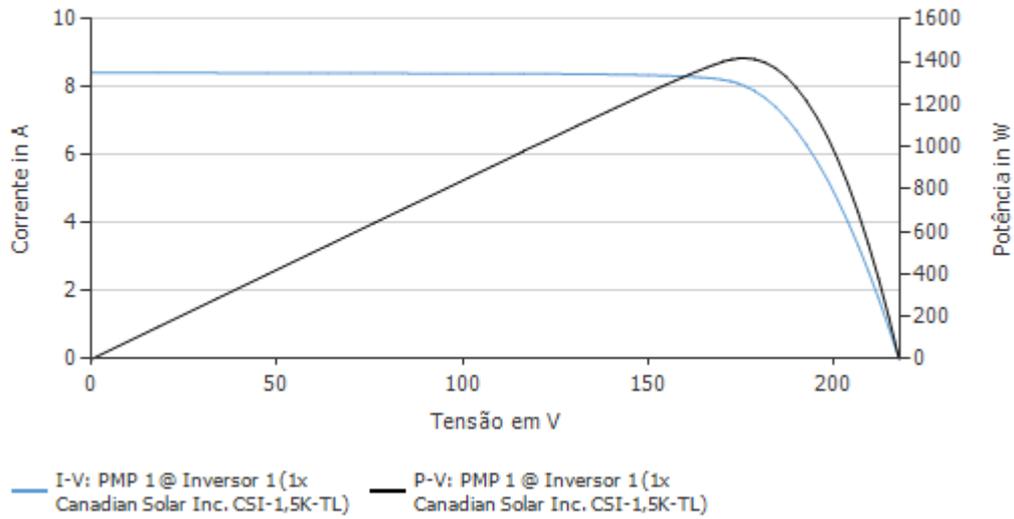
Fonte: Autor

Figura 46 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 10h00min.



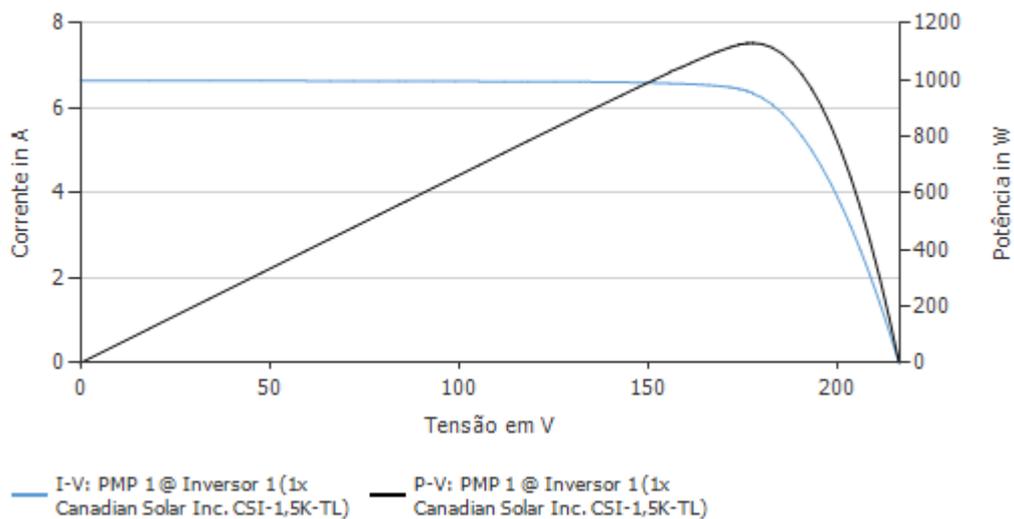
Fonte: Autor

Figura 47 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 12h00min.



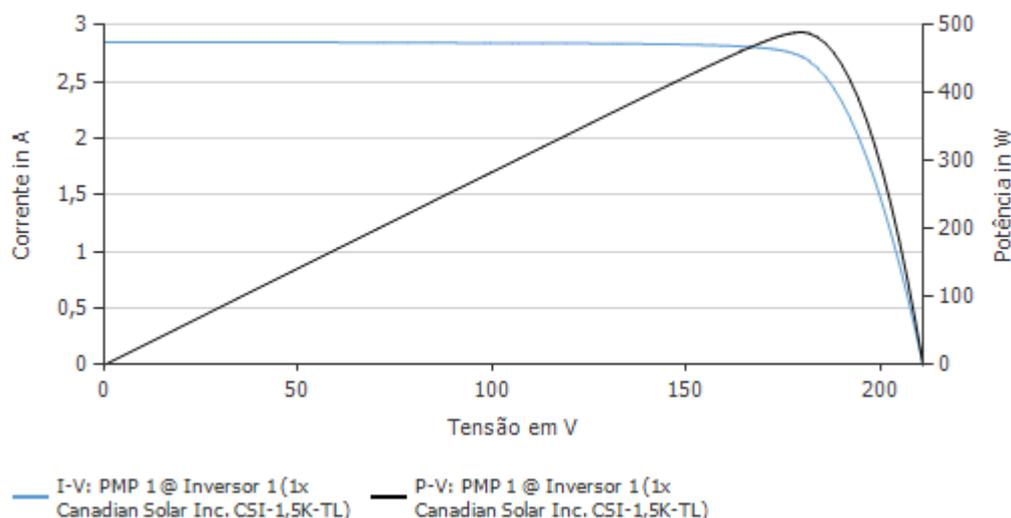
Fonte: Autor

Figura 48 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 14h00min.



Fonte: Autor

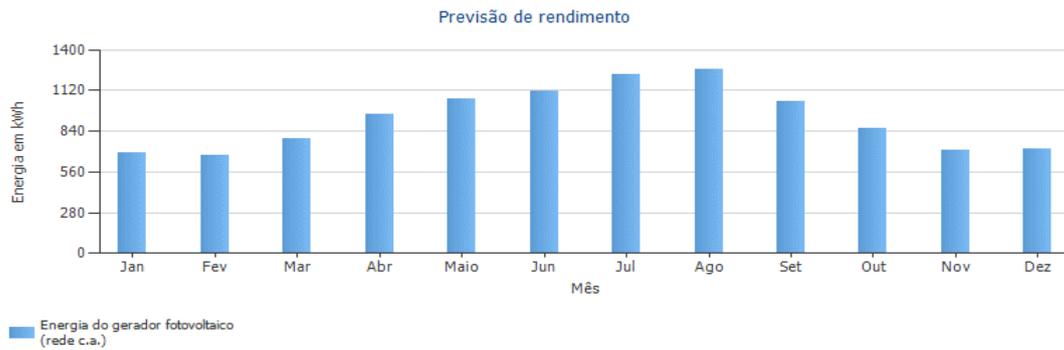
Figura 49 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 16h00min.



Fonte: Autor.

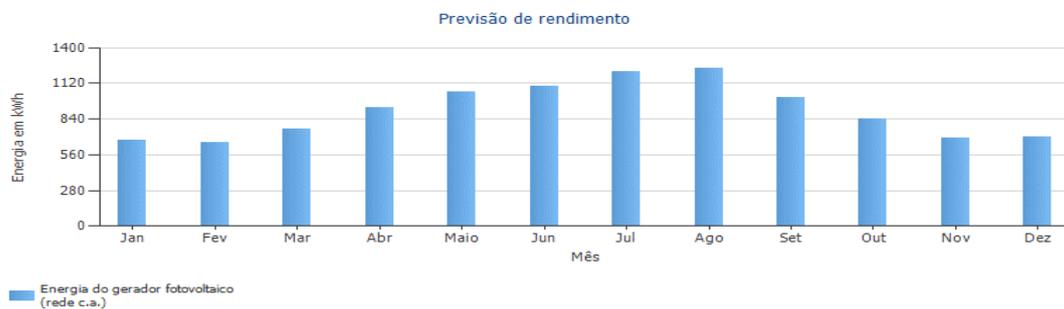
A figura 51 e 52 apresenta a previsões de rendimentos dos módulos sob as mesmas condições anteriores, sofrendo sombreamento e com a utilização de otimizadores de potência e sem a utilização do dispositivo eletrônico. Nas duas configurações foram utilizados os inversores *strings*. O qual foi escolhido para geração em um espaço de tempo de 25 anos. Onde o gráfico mostra uma geração maior de energia nos meses de junho, julho e agosto, onde há uma grande incidência de irradiação solar e o desempenho do sistema é de 75,9% na configuração com otimizador de potência. Já na configuração sem o otimizador de potência o desempenho do sistema é 74,1%. Com relação aos outros meses do ano, pode-se notar que janeiro e dezembro tem uma baixa geração de energia.

Figura 50 Previsão de rendimento sistema fotovoltaico com inversores strings com otimizador de potência ao longo do primeiro ano.



Fonte: Autor.

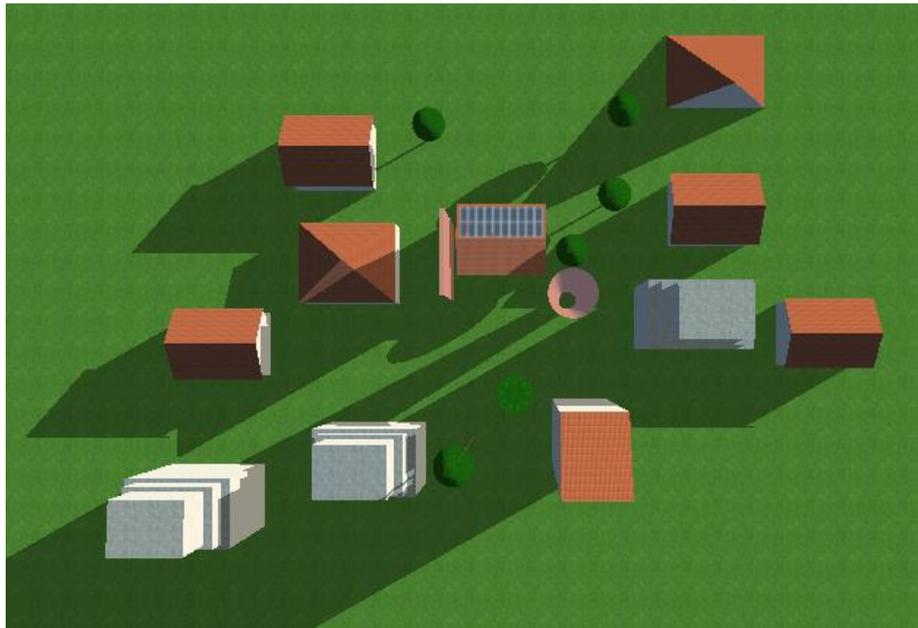
Figura 51 Previsão de rendimento sistema fotovoltaico com inversores strings sem otimizador de potência ao longo do primeiro ano.



Fonte: Autor.

Para a configuração com microinversores, fora utilizada duas configurações a primeira com sombreamento e o aumento da quantidade de elementos causadores de sombras ao entorno do edifício, e a segunda configuração sem sombra alguma. A figura 53 mostra a vista superior usando 5 microinversores HM-1200 da marca Hoymiles Power Electronics Inc.

Figura 52 Vista superior - configuração ambiente sombreado com microinversores 21 de junho as 08h00min.



Fonte: Autor.

Nota-se que nesta primeira configuração a quantidade de módulos continua a mesma, porém foi acrescentado ao entorno do sistema, mais árvores, prédios, e casas com o objetivo de gerar uma quantidade significativa de sombras nos módulos. A figura 54 representa a taxa de sombreamento nos módulos fotovoltaicos em 21 de junho às 12h00min, onde o desempenho do sistema fotovoltaico ficou em 75%.

Figura 53 Taxa de sombreamento- 1ª configuração: Ambiente sombreado com microinversores.

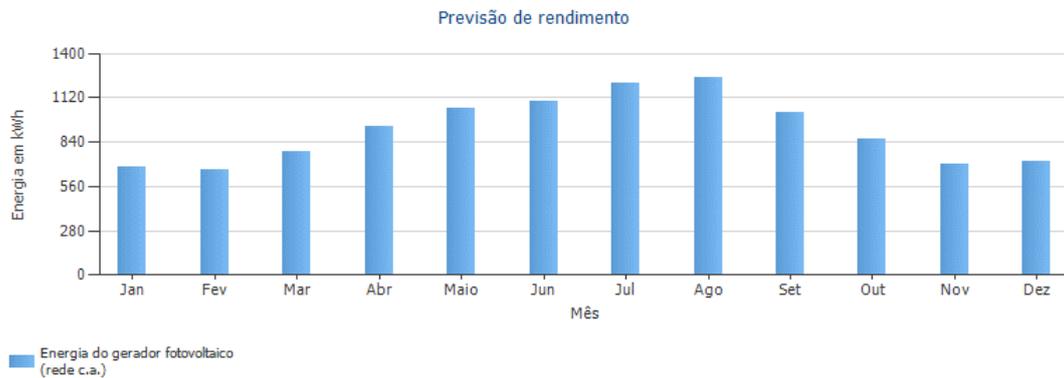


Fonte: Autor.

Segundo Fernandes (2020) a presença de sombras nos módulos fotovoltaicos afeta diretamente a geração de energia elétrica, por isso nos meses de solstício de inverno iniciado em dezembro onde os dias são menores a irradiação solar é proporcionalmente

menor. O sistema fotovoltaico conseqüentemente produz menos. De acordo com a figura 55 existe uma diminuição do rendimento por sombreamento de 13,7%/Ano.

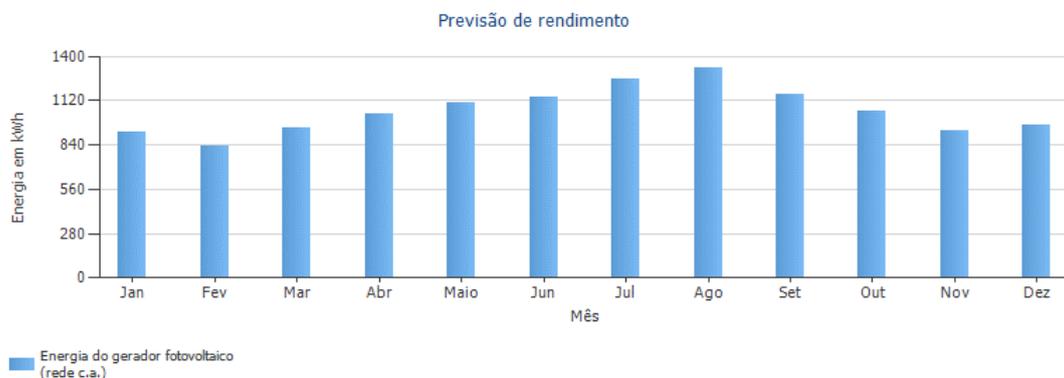
Figura 54 Previsão de rendimento sistema fotovoltaico com microinversores 1ª configuração.



Fonte: Autor.

Já a figura 56 representa a previsão de rendimento do mesmo sistema com a mesma quantidade em módulos e microinversores, porém sem sombreamento algum com um desempenho de 83,2%. Segundo GOMES (2009) apesar dos microinversores possuírem uma maior eficiência em relação aos inversores *strings*, existem projetos em que devido a grande quantidade de sombreamento, a escolha de uma melhor área com baixas taxas de sombreamento, seria mais eficiente do que gastos com microinversores, devido seu valor ser superior aos inversores *strings*.

Figura 55 Previsão de rendimento sistema fotovoltaico com microinversores 2ª configuração sem sombreamento.



Fonte: Autor.

Já nas figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 está à disposição das strings por inversores e os gráficos das curvas características do sistema fotovoltaico com microinversores e sombreamento. Onde cada microinversor possui duas MPPT. Igualmente aos otimizadores de potência, quando os módulos fotovoltaicos são submetidos a condições de

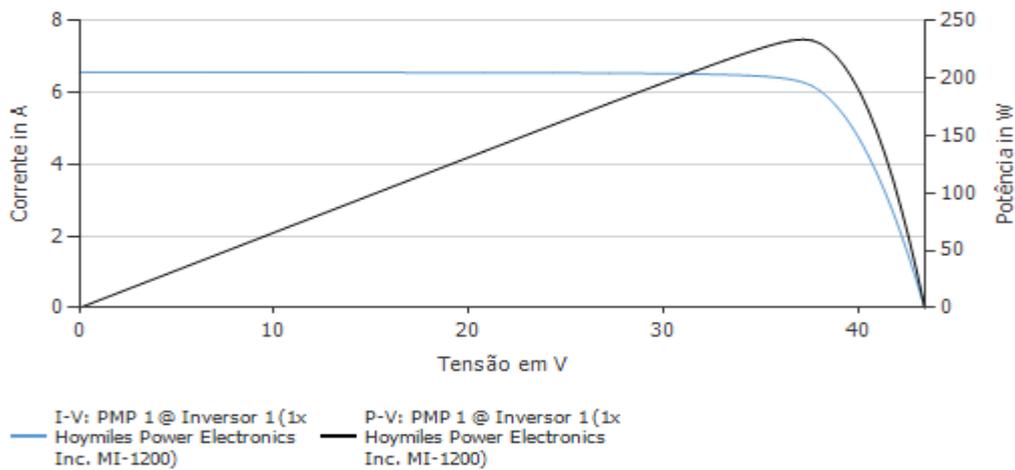
sombreamento, o microinversor também eleva os valores da corrente elétrica para conservação da potência. Onde há a diminuição dos valores de tensões dos módulos sombreados, que produz os chamados pontos-quentes aumentando a temperatura nos módulos e os danificando (HECKTHEUER, 2001).

Figura 56 Disposição de strings por microinversores.



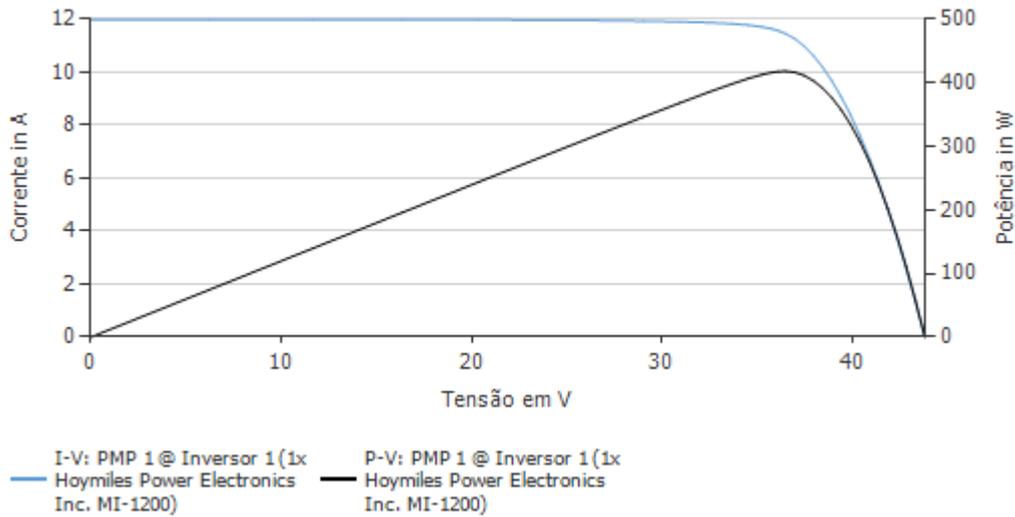
Fonte: Autor

Figura 57 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor de potência, 08h00min.



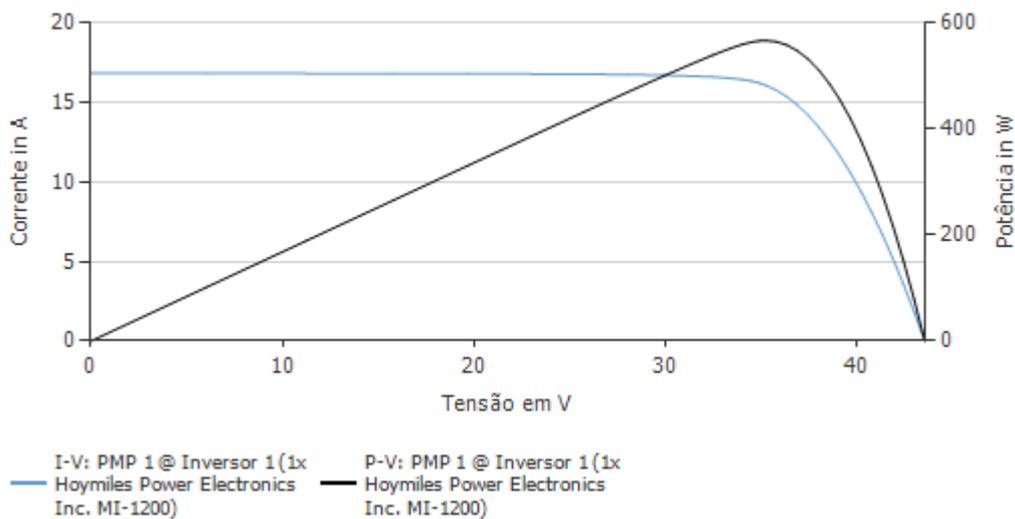
Fonte: Autor.

Figura 58 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor de potência, 10h00min.



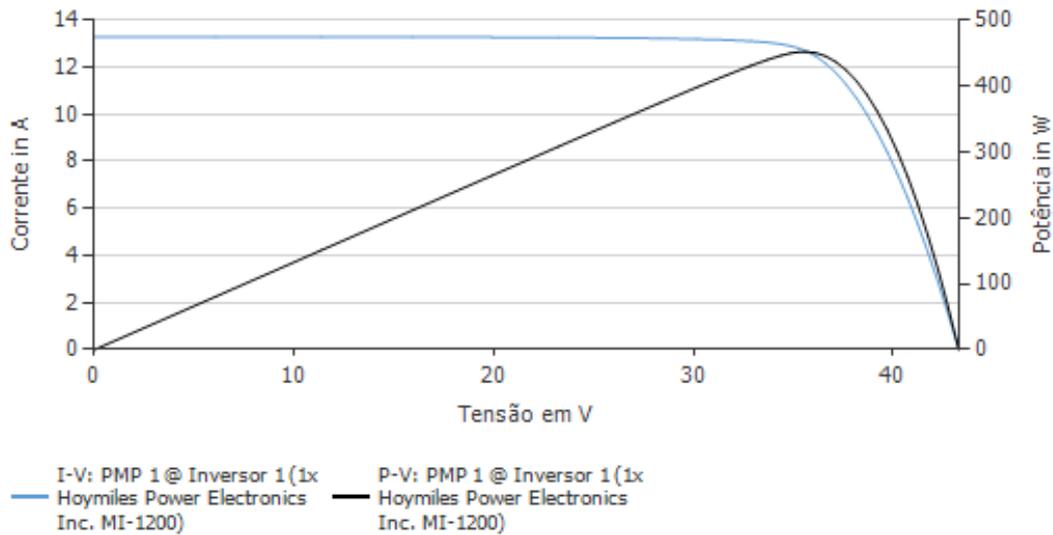
Fonte: Autor.

Figura 59 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor de potência, 12h00min.



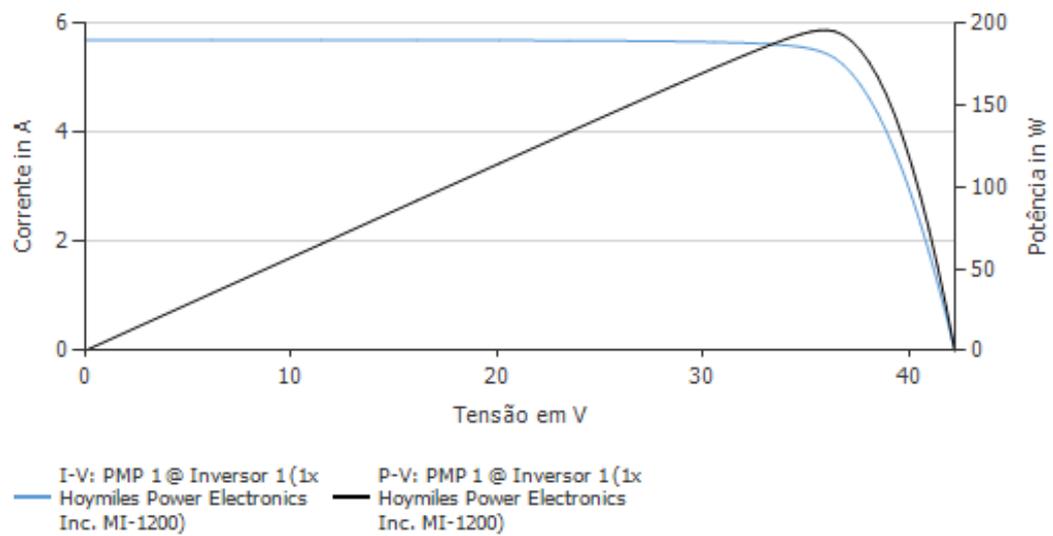
Fonte: Autor.

Figura 60 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor de potência, 14h00min.



Fonte: Autor.

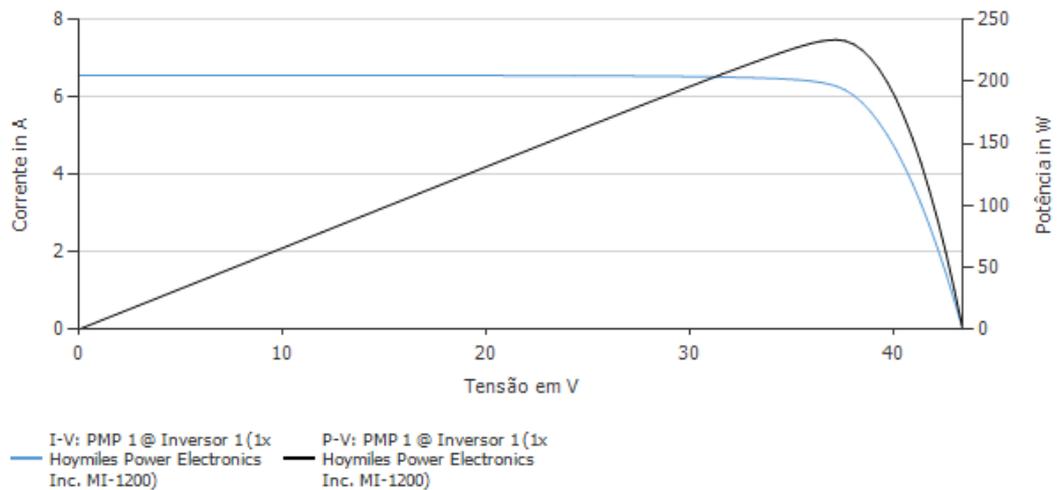
Figura 61 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor de potência, 16h00min.



Fonte: Autor.

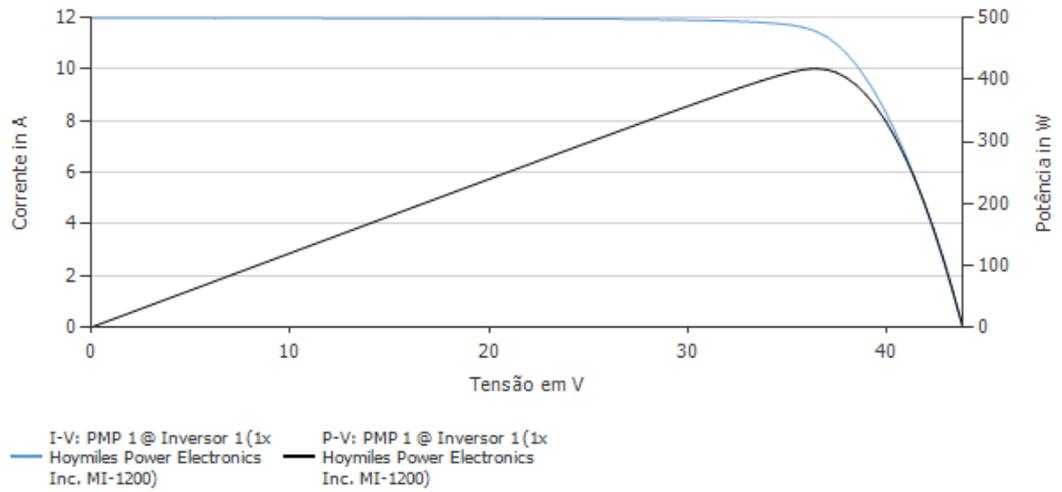
Já com o mesmo sistema utilizando os microinversores porém sem o sombreamento, os valores tanto de corrente quanto de tensões foram elevados, melhorando significativamente os valores de potência e o desempenho do sistema de acordo com as figuras 63, 64, 65, 66 e 67. Como a conversão de energia utilizando os microinversores é dado próxima ao local da geração, isso evita o aumento de algumas perdas como de cabeamento. E o uso de apenas uma MPPT por módulo fotovoltaico garante uma maior eficiência em relação a inversores strings. Sendo assim mesmo com sombreamento parcial quanto sem o mesmo, os microinversores tem uma maior eficiência (RÜTHER, 2004).

Figura 62 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor sem sombreamento, 08h00min.



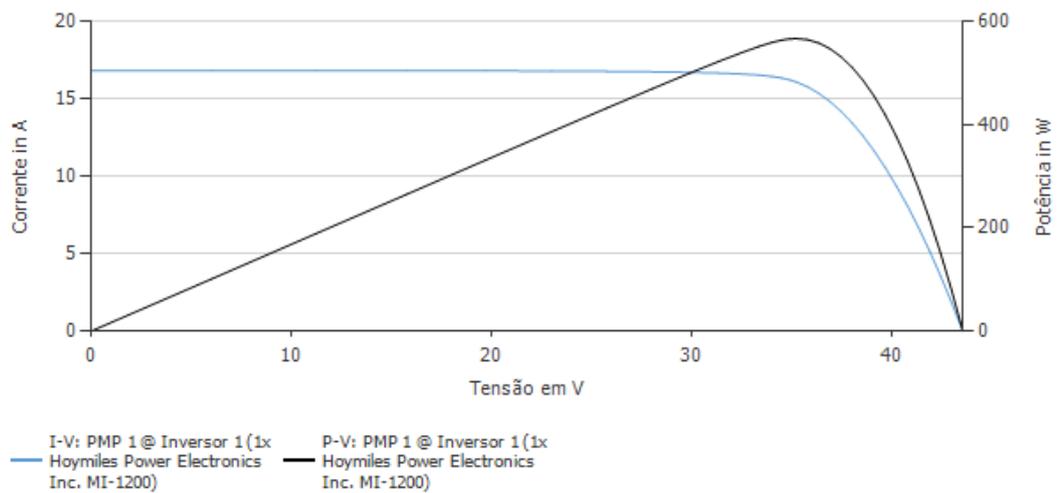
Fonte: Autor.

Figura 63 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor sem sombreamento, 10h00min.



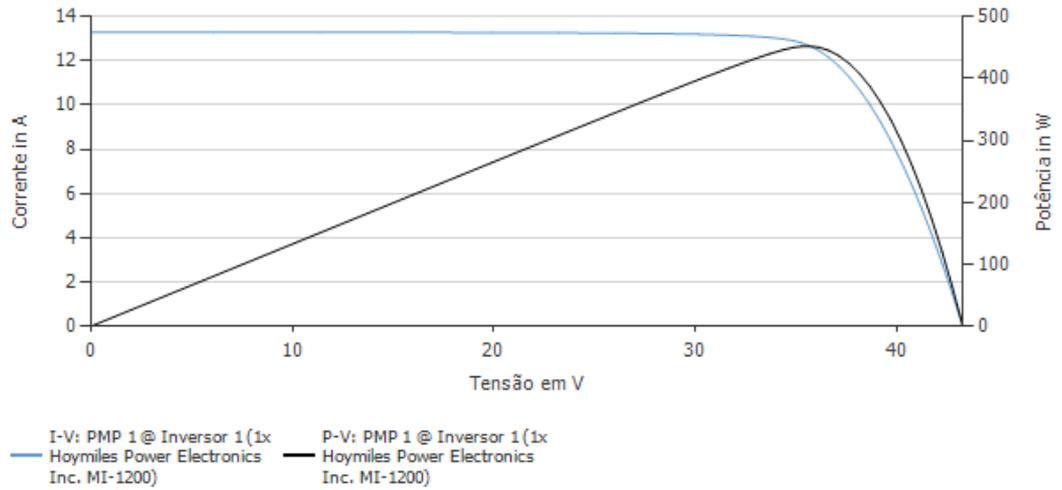
Fonte: Autor

Figura 64 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor sem sombreamento, 12h00min.



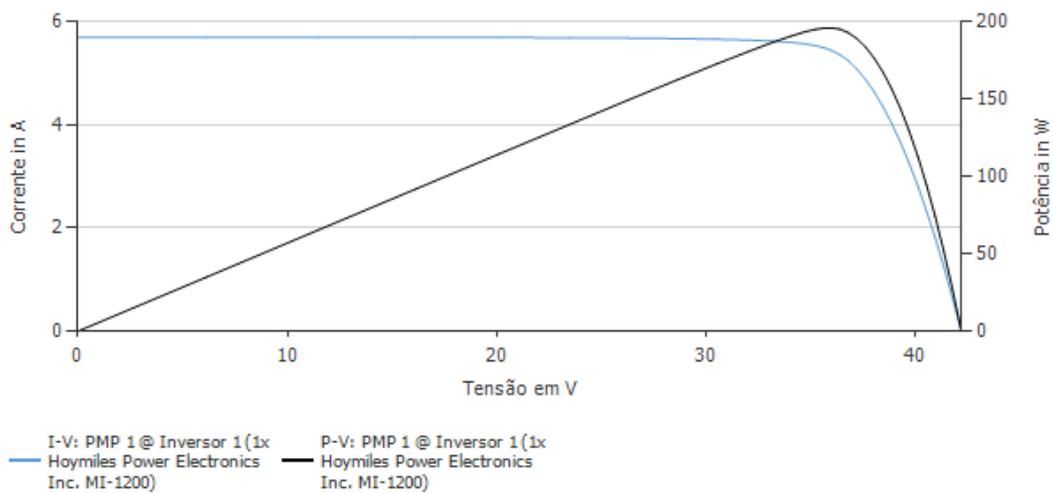
Fonte: Autor

Figura 65 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor sem sombreamento, 14h00min.



Fonte: Autor

Figura 66 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico microinversor sem sombreamento, 16h00min.



Fonte: Autor

Dado o comportamento dos módulos tanto em relação ao sistema com microinversores sombreado e sem a ação do sombreamento representado nos gráficos

acima, o quadro 6 representa as duas configurações com microinverores, com as informações pertinentes.

Quadro 6: Balanço energético do sistema fotovoltaico microinversor

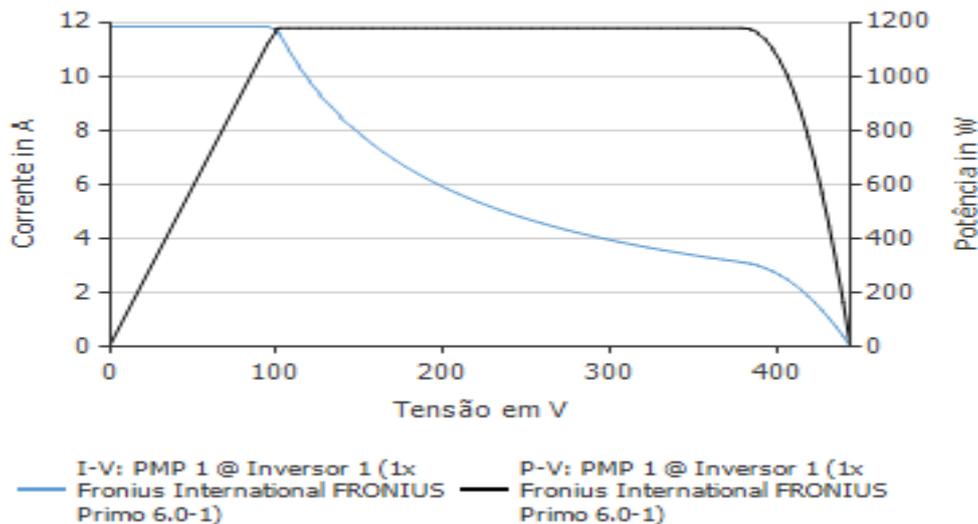
MICROINVERSORES	SOMBREADO			SEM SOMBREAMENTO		
Irradiação global - horizontal	1.883,02	kWh/m ²		1.883,02	kWh/m ²	
Desvio em relação ao espectro padrão	-18,83	kWh/m ²	-1,00 %	-18,83	kWh/m ²	
Orientação e inclinação do plano dos módulos	39,15	kWh/m ²	2,09 %	39,15	kWh/m ²	
Sombreamento independente do módulo	-79,35	kWh/m ²	-4,16 %	-5,29	kWh/m ²	
Irradiação global no plano dos módulos	1.812,90	kWh/m ²		1.886,22	kWh/m ²	
Conversão de STC (eficiência nominal do módulo 19.88%-- 18,39)	-58.509,64	kWh	-80,12 %	-60.875,88	kWh	
Energia fotovoltaica nominal	14.514,65	kWh		15.101,65	kWh	
Sombra parcial, específica do módulo	-1.526,04	kWh	-10,51 %	-42,57	kWh	
Comportamento sob baixa irradiação	-223,98	kWh	-1,72 %	-475,13	kWh	
Desvio em relação à temperatura nominal do módulo	-1.024,57	kWh	-8,03 %	-1.165,95	kWh	
Diodos	-17,81	kWh	-0,15 %	-0,85	kWh	
Mismatch (indicações do fabricante)	0,00	kWh	0,00	0,00	kWh	
Mismatch (conexão/sombra)	-65,43	kWh	-0,56 %	-0,24	kWh	
Otimizador de potência (conversão/compensação CC)	0,00	kWh	0,00	0,00	kWh	
Energia fotovoltaica (c.c.) sem redução pelo inversor	11.656,82	kWh		13.416,91	kWh	
Perda no seguidor PMP	-5,99	kWh	-0,05 %	-15,67	kWh	

Energia fotovoltaica (c.c.)	11.515,6 1	kWh		13.277,40	kWh	
Conversão c.c./c.a.	-537,91	kWh	-4,67 %	-600,27	kWh	
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	10.977,7 2	kWh		12.677,10	kWh	

Fonte: Autor.

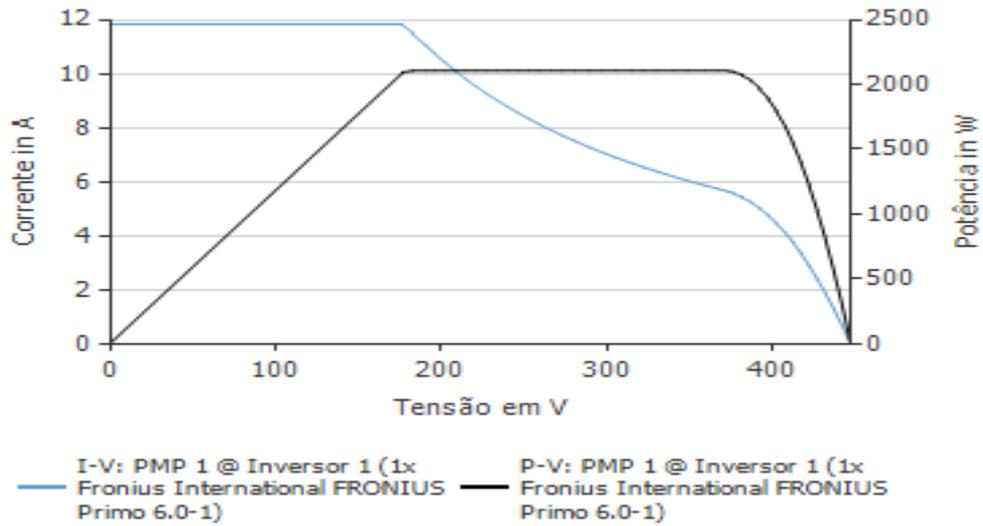
Para método de comparação, o mesmo projeto com os mesmos módulos e especificações foram simulados novamente, porém com apenas um inversor de 6kw da marca FRONIUS primo 6.0-1 com dois MPPT. As figuras 68, 69, 70, 71 e 72 mostra a curva característica do sistema fotovoltaico com apenas um inversor de 6kw em diferentes horários. No qual há uma queda dos valores da curva de corrente e o aumento dos valores de tensão. Aumentando a temperatura dos módulos podendo causar danos irreversíveis ao sistema como a queima dos equipamentos.

Figura 67 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 08h00min.



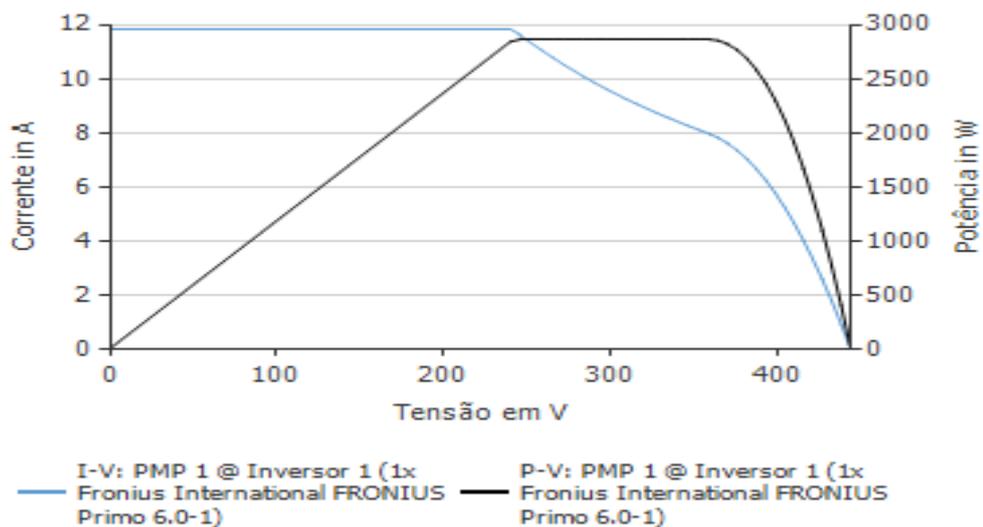
Fonte: Autor.

Figura 68 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 10h00min.



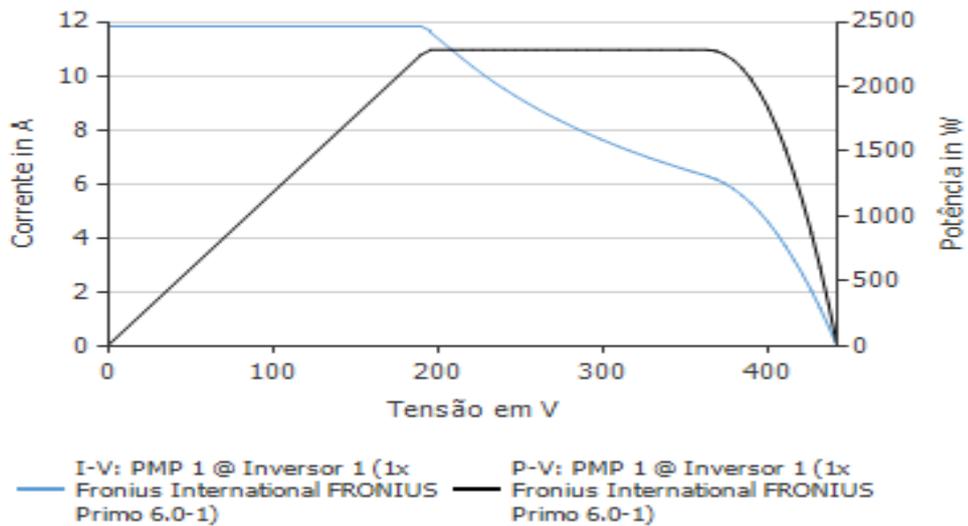
Fonte: Autor

Figura 69 Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 12h00min.



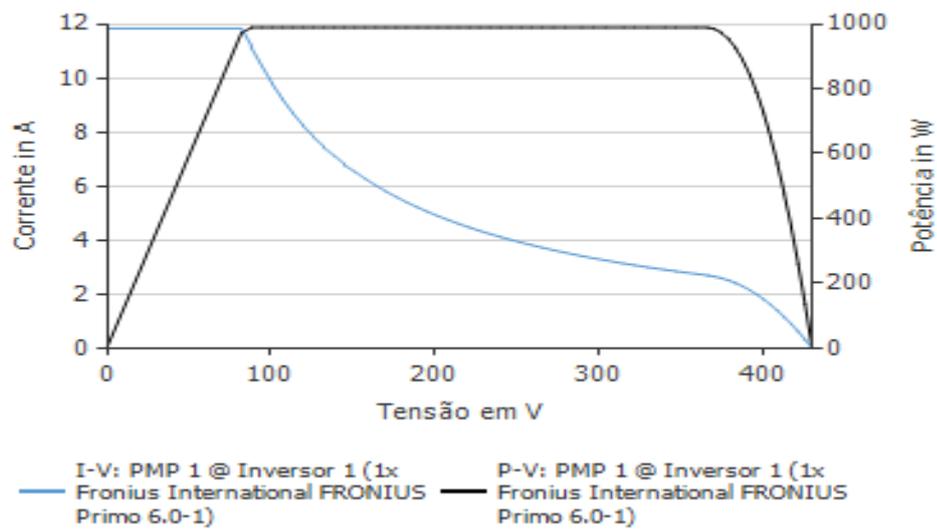
Fonte: Autor

Figura 71 - Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 14h00min



Fonte: Autor

Figura 72 - Curva característica PV e IV do sistema fotovoltaico sem otimizador de potência, 16h00min



Fonte: Autor

Todos os gráficos mostram a real diferença nas duas configurações. A primeira com 4 inversores e a segunda com apenas um inversor, com a mesma potência em ambas. Onde todas as simulações se mostraram extremamente eficientes para determinar os

resultados com o sistema fotovoltaico tanto com sombreamento quanto sem o mesmo. O quadro 7 representa os resultados da simulação com inversor de 6kw. Estão presentes o balanceamento energético e o desempenho do sistema que é de 76,8%.

Quadro 7: Balanço energético do sistema fotovoltaico-inversor 6kw

Irradiação global - horizontal	1.883,02	kWh/m²
Desvio em relação ao espectro padrão	-18,83	kWh/m ²
Reflexão do solo (albedo)	4,78	kWh/m ²
Orientação e inclinação do plano dos módulos	39,15	kWh/m ²
Sombreamento independente do módulo	-79,35	kWh/m ²
Reflexão na superfície de módulo	-15,87	kWh/m ²
Irradiação global no plano dos módulos	1.812,90	kWh/m ²
Irradiação global fotovoltaica	73.024,29	kWh
Sujeira	0,00	kWh
Conversão de STC (eficiência nominal do módulo 19,88 %)	-	kWh
	58.509,64	
Energia fotovoltaica nominal	14.514,65	kWh
Sombra parcial, específica do módulo	-1.541,58	kWh
Comportamento sob baixa irradiação	-176,77	kWh
Desvio em relação à temperatura nominal do módulo	-1.027,32	kWh
Diodos	-3,66	kWh
Mismatch (indicações do fabricante)	0,00	kWh
Mismatch (conexão/sombra)	-0,45	kWh
Otimizador de potência (conversão/compensação CC)	-98,66	kWh
Energia fotovoltaica (c.c.) sem redução pelo inversor	11.666,21	kWh
Potência CC mínima não atingida	-3,88	kWh
Redução devido à faixa de tensão PMP	-3,78	kWh
Redução devido à corrente c.c. máx.	0,00	kWh
Redução devido à potência c.c. máx.	0,00	kWh
Redução devido à potência c.a. máx./cos phi	-156,38	kWh
Perda no seguidor PMP	0,00	kWh
Energia fotovoltaica (c.c.)	11.502,17	kWh
Energia na entrada do inversor	11.502,17	kWh

Divergência entre tensão de entrada e tensão nominal	0,00	kWh
Conversão c.c./c.a.	-255,75	kWh
Perda cabeamento total	0,00	kWh
Energia fotovoltaica (c.a.) menos consumo em espera	11.236,92	kWh
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	11.246,42	kWh

Fonte: Autor

CONCLUSÃO

Na primeira simulação onde foram utilizados 4 inversores de 1,5 kW notou-se que as variáveis de sombreamento e de sujeira não apareceram, devido à falta de sombreamento na simulação, onde o rendimento anual do sistema foi de 1.611,37 KWh/KWp.

Já na segunda configuração, onde a variável de sombreamento é adicionada e a utilização do dispositivo eletrônico denominado otimizador de potência é aplicado ao sistema, de acordo com os resultados, mesmo com a utilização do otimizador de potência, que gera uma melhora nos dados de rendimento do sistema a presença do sombreamento causa uma perda de 18,1% no rendimento anual do sistema deixando o sistema com uma média anual de 1.338,10 KWh/KWp.

A última simulação realizada foi com 5 microinversores de 1200W e ambiente diferente das outras simulações, acrescentando mais árvores e prédios ao entorno do edifício que possui o sistema fotovoltaico. Com o aumento de mais elementos causadores de sombras como prédios, árvores e monumentos ao entorno do sistema fotovoltaico. E sem os elementos que pudessem causar diretamente sombreamento nos módulos fotovoltaicos. Nesta configuração a taxa de rendimento ficou em de 75% mesmo com a grande taxa de sombreamento. Segundo (CARVALHO , 2012) os microinversores são mais eficientes em rendimento em relação aos inversores strings. Já que com o mesmo sistema e levando em consideração apenas o céu limpo, o os mesmos microinversores tiveram uma desempenho de 83,2%. Provando que o sombreamento afeta diretamente na geração de energia.

Foram gerados também os gráficos de previsão de rendimento de cada sistema e o balanço energético, provando assim que sombreamento em sistemas fotovoltaicos afetam diretamente a geração de energia. Portanto de acordo com os resultados e comparações, o necessário quando se tem um projeto fotovoltaico e deseja-se implementá-lo, é necessário a observação e o estudo do local, para evitar o sombreamento, não podendo fazer a mudança do sistema. É necessária a observação do rendimento para cada sistema e podendo haver a utilização de dispositivos para melhorar o aproveitamento ou remoção do sistema alocando em outro espaço que o aproveitamento seja consideravelmente útil.

Comparando a utilização de microinversores a inversores strings, pode-se citar algumas das vantagens que estão ligadas ao rendimento que por consequência gera uma

maior economia, como diminuição por perdas no cabeamento, monitoramento em tempo real de cada módulo fotovoltaico e menores perdas na geração quando os módulos fotovoltaicos são submetidos a sombreamento ou sujeidade.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Ana Júlia Nunes; RANK, Narah Iuata; BUENO, Talita Bezerra de Araujo. **Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba**. 2016. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/docequipe/2015_2_27/2015_2_27_fina1.pdf>. Acesso em 03 de fevereiro de 2021.

BERTO, Alessandra. Efeito do sombreamento em módulos solares fotovoltaicos e consequências para o arranjo solar em sistemas de geração de energia solar fotovoltaica (parte I). **Solar Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.solarbrasil.com.br/blog/efeito-do-sombreamento-em-modulos-solares-fotovoltaicos-e-consequencias-para-o-arranjo-solar-em-sistemas-de-geracao-de-energia-solar-fotovoltaica-parte-i/>> Acesso em 22 de outubro de 2020.

BRAGA, RENATA. **Energia solar fotovoltaica: Fundamentos e aplicações**. TCC. Rio de Janeiro: UFRJ, novembro de 2008.

BRAUN GRABOLLE, P. **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana. (Tese de Doutorado)**. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

BRITO MOACYR. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilha, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica**. Doutorado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP. Ilha Solteira, 2013.

BROWN, Christian. **Shading losses for pv systems and techiques to mitigate them**. Aurora Solar. 2020. Disponível em <<https://blog.aurasolar.com/shading-losses-for-pv-systems-and-techniques-to-mitigate-them/>>. Acesso em 22 de outubro de 2020.

CANAL Solar. **Entendendo o efeito das sombras parciais nos sistemas fotovoltaicos**. 2020. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/index.php/artigos/artigos-tecnicos/item/317-efeito-das-sombras-parciais-nos-sistemas-fv/>>. Acesso em 22 de outubro de 2020.

CARVALHO, Karolina Jorge Schwenck. **Sistemas fotovoltaicos distribuídos e integrados à rede. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE**. Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em:<<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2012-1/2012092101-2012092101/file>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2021.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Módulos Fotovoltaicos**. 2020. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331> Acesso em 02 de novembro de 2020.

COUTINHO, CARLOS. **O efeito do sombreamento e diodos de bypass em módulos fotovoltaicos**. Dissertação. São Mateus. UFES. 2016.

DEMONTI, ROGERS. **Processamento da energia elétrica proveniente de módulos fotovoltaicos**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003

DIAS JOÃO. **Instalação fotovoltaica conectada à rede: estudo experimental para a otimização do fator de dimensionamento.** Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

DOGADO, Luiz. **Análise do comportamento de módulos fotovoltaicos quando conectados em série e paralelo.** TCC. Ponta Grossa: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2018.

FERNANDES, Caíque Gonçalves. **Estudo comparativo do uso de inversor string e microinversores na geração de energia elétrica em instalações fotovoltaicas.** 2020.

Gomes, Lúcia. **Células Solares Semi-transparentes de Silício Amorfo Micro/Nanocristalino.** Dissertação. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2009.

GRUPO Studio. **Qual é o tempo de retorno de investimento em energia solar?.** 2020. Disponível em: <<https://blog.grupostudio.com.br/studio-energy/qual-e-o-tempo-de-retorno-de-investimento-em-energia-solar/>> Acesso em 22 de outubro de 2020.

Hecktheuer, L. A., 2001, **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos.** Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

HECKTHEUER, Lúcio. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos.** Dissertação. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Junho de 2001.

HINCAPIÉ, CAMILO. **Análise do comportamento de uma associação em série de diferentes módulos fotovoltaicos em um sistema conectado à rede.** 2015. Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Ishaque, K., Salam, Z., 2013. **A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition, Renewable and Sustainable Energy Reviews,** vol. 19, pp. 475-488

KAUFMANN, Gustavo. **Avaliação do potencial de geração solar fotovoltaica e análise em tempo real da operação de um painel fotovoltaico instalado na cidade de Lajeado/RS.** TCC. Lajeado: Centro universitário Univates, 2012.

LOPES, RICARDO. **Efeito do Sombreamento nos Painéis Fotovoltaicos.** Dissertação. Lisboa: ISEL, Dezembro de 2013.

MARANGONI, Filipe. **Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede.** Dissertação. Pato Branco: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2012.

Markvart, T., & Castañer, L. (2003). **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications.** Elsevier.

MARTINS, Mateus. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico on-grid com energia de reserva.** TCC. Santa Catarina: Universidade do Sul de Santa Catarina, Junho de 2018.

MATSUMOTO, Agatha. **Desenvolvimento de Células Fotovoltaicas Orgânicas e Flexíveis.** Dissertação. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, fevereiro de 2003.

MELO, Fernando Cardoso et al. **Projeto e desenvolvimento de um novo inversor solar de estágio único sem transformador adequado para aplicações de baixa potência.** 2017.

MPPT Solar. **Painéis Solares: Ligação em Paralelo**. 2020. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>> Acesso em 02 de novembro de 2020.

MPPT Solar. **Painéis Solares: Ligação em Série**. 2020. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>> Acesso em 03 de novembro de 2020.

Nascimento, Cássio. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Pós-graduação Lato-Sensu. Lavras: UFL, 2004.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico 330W - OSDA - ODA330-36-P**. 2020. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-330w-osda-oda330-36-p.html?gclid=CjwKCAiAf78BRBbEiwATKRRBGvBjPz6bpx69EJLGiejSpTodXQWyMkYns-2UGwJ9jC14B-420w_xoC5DEQAvD_BwE> . Acesso em 02 de novembro de 2020.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos: 2006.

RAMPINELLI, Giuliano. **Análise da distribuição de tensões elétricas em uma associação de módulos de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. Dissertação. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2007.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SANTOS, ANA. **Produção de eletrodos por modificações superficiais de ti e caracterização do seu desempenho na intercalação de li+**. Doutorado. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2013.

SEVERO, Luana. **Rastreamento de máxima potência através de redes neurais artificiais aplicado a um sistema fotovoltaico conectado à rede.TCC**. Alegrete: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, 2019.

SILVA, Leonardo. **Utilização de Redes Neurais Artificiais para Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Fotovoltaicos Parcialmente Sombreados. 2019**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

SOLARVOLT Energia. **Dicionário Tudo sobre Energia Solar**. Belo Horizonte, 22 out. 2020. Disponível em <<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/dicionario-tudo-sobre-energia-solar/>>. Acesso em 22 de outubro de 2020.

SOUZA, Arthur. **Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade de energia elétrica**. Dissertação. Uberlândia: UFU, 2016

TAVARES, CARLOS. **Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico**.Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

VILLALVA, Marcelo Gradella et al. **Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2010.

ZHENG, Huiying et al. **Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configuration**. Renewable Energy, Oxford, v. 68, p.58-66, ago. 2014.

ZIPP, K. Solar Power World. 2015 **Renewable Energy Handbook, 2015**. Disponível em:<http://www.myussi.com/pdf_files/solar_handbook/SolarPowerWorld_Handbook_2015.pdf>. Acesso em: 16 janeiro 2021.