

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL



KENNEDY RICARDO DA SILVA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE**

Cajazeiras – PB
2021

KENNEDY RICARDO DA SILVA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Tecnologia em
Automação Industrial do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
grau de Tecnólogo em Automação Industrial

Orientador: Prof. Dr. Abinadabe Silva
Andrade

IFPB
Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

S586s

Silva, Kennedy Ricardo da

Simulação computacional de um sistema fotovoltaico conectado à rede / Kennedy Ricardo da Silva; orientador Abinadabe Silva Andrade.- 2021.

46 f. : il.

Orientador: Abinadabe Silva Andrade.

TCC (Curso de Tecnologia em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2021.

1. Sombreamento parcial 2. Sistema fotovoltaico 3. Potência injetada I.
Título

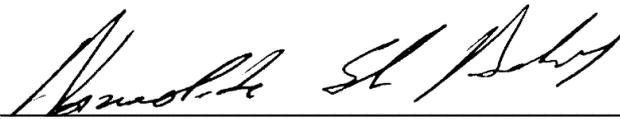
CDU 621.31(0.067)

KENNEDY RICARDO DA SILVA

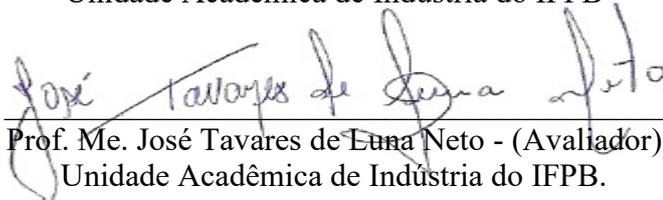
**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Tecnologia em
Automação Industrial do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
grau de Tecnólogo em Automação Industrial

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Abinadabe Silva Andrade - (Orientador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB



Prof. Me. José Tavares de Luna Neto - (Avaliador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.



Prof. Marco Damasceno de Sousa - (Avaliador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, a minha namorada e a todos os meus amigos os quais me apoiaram nesse desafio. Em especial, dedico este trabalho a meu pai que me apoiou mais que todos e sempre acreditou em mim. Dedico também a meu orientador Abinadabe Silva Andrade que desde o início do curso esteve comigo em aulas, orientações e projetos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a nosso grandioso e amoroso Criador do céu e da terra, que com sua permissão vim ao mundo com capacidade intelectual e física suficiente para lograr êxito nesse desafio e em tanto outros da vida.

Aos bons espíritos que vibraram positivamente para me manter focado e consciente nos transcorrer dessa fase vida.

Ao Instituto Federal da Paraíba - IFPB, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao meu orientador Abinadabe Silva Andrade que me auxiliou não só nesse trabalho, mas sim em todo o curso.

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente, principalmente com o aquecimento global, vem estimulando a sociedade em geral ao uso de fontes de energias renováveis não danosas ao ecossistema. Os sistemas fotovoltaicos têm se destacado no setor elétrico devido ao seu potencial e aos benefícios ambientais que este proporciona. Este trabalho retrata uma simulação computacional de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Observa-se como a configuração dos painéis solares e a forma de sombreamento influenciam na potência injetada, como também as perdas que ocorrem geralmente ao longo da geração até a injeção. De maneira geral, este trabalho estuda o desempenho do sistema através dos quesitos injeção de potência, sombreamento parcial, qualidade de energia e perdas no inversor.

Palavras-Chave: Sombreamento Parcial. Sistema Fotovoltaico. Potência Injetada.

ABSTRACT

The concern for the environment, especially with global warming, has been encouraging society in general to use non-polluting renewable energy sources as well as non-harmful to the ecosystem. Photovoltaic systems have been standing out in the electricity sector due to their potential and the environmental benefits it provides. This work portrays a computer simulation of a grid-connected photovoltaic system. It is observed how the configuration of the solar panels and the form of shading influence the injected power, as well as the losses that generally occur from generation to injection. In general, this work studies the system performance through the power injection, partial shading, energy quality and inverter losses issues.

Keywords: Partial Shading. Photovoltaic System. Injected Power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema fotovoltaico.	14
Figura 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	14
Figura 3 - Participação setorial no consumo de eletricidade.	15
Figura 4 - Curva característica do painel solar.	16
Figura 5 - Diagrama do algoritmo do método P&O.....	17
Figura 6 - Curvas P x V com cenários meteorológicos diferentes.	18
Figura 7 - Algoritmo do Condutância Incremental.	19
Figura 8 - Rastreamento do MPP na curva P x V com o método Condutância Incremental.	19
Figura 9 - Topologias mais relevantes dos inversores multiníveis.....	21
Figura 10 - Inversor trifásico NPC.	22
Figura 11 - Inversor NPC e a completa forma de onda na saída Vout.	23
Figura 12 - Estados de chaveamento.	23
Figura 13 - Comparação da senoide de referência com duas portadoras.	25
Figura 14 - Topologias básicas dos conversores CC/CC.	26
Figura 15 - Estrutura dos módulos solares.	27
Figura 16 - Etapas do sistema proposto.....	29
Figura 17 - Rastreamento do MPP através do conversor <i>Boost</i> com a técnica P&O.....	30
Figura 18 - NPC aplicado à carga.....	31
Figura 19 - Diagrama do controle da corrente.....	32
Figura 20 - Forma de onda dos sinais que controlam as chaves do braço A do NPC.....	33
Figura 21 - Sistema proposto.....	34
Figura 22 - Casos de sombreamento parcial.....	35
Figura 23 - Comparativo da potência gerada e a potência máxima.....	36
Figura 24 - Potência Gerada no caso 01 e 02.	37
Figura 25 - THD no caso 01 e 02.	38
Figura 26 - Perdas totais.	39
Figura 27 - Potência Gerada x Potência Injetada no Caso 01 e 02.....	40
Figura 28 - Comparativo da potência máxima, potência gerada e a potência injetada no Caso 01 e 02.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estados das chaves.	22
Tabela 2 - Parâmetros do painel solar.	28
Tabela 3 - Valores das triangulares tri-sup e tri-inf.	32
Tabela 4 - Potência Gerada x Potência Injetada.	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2 REVISÃO LITERÁRIA	12
2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	12
2.2 PAINEL FOTOVOLTAICO	15
2.3 MPPT.....	15
2.3.1 Perturbe & Observe (P&O).....	16
2.3.2 Condutância Incremental	18
2.4 INVERSORES.....	20
2.4.1 Inversor NPC	21
2.4.1.1 Parte Construtiva do NPC	21
2.4.1.2 Princípio de funcionamento	22
2.4.1.3 Método de modulação	24
2.5 CONVERSORES CC/CC.....	25
3 METODOLOGIA.....	27
4 SISTEMA PROPOSTO	29
4.1 ETAPA 01 – GERAÇÃO DE POTÊNCIA	29
4.2 ETAPA 02 – RASTREIO DO MPP	29
4.3 ETAPA 03 – APLICAÇÃO.....	30
4.3.1 Controle.....	31
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
5.1 DESEMPENHO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM CONDIÇÃO DE SOMBREAMENTO.....	35
5.2 QUALIDADE DE ENERGIA	37

5.3 PERDAS NO INVERSOR	38
5.4 POTÊNCIA INJETADA	39
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A população mundial vem tendo um rápido crescimento nos últimos anos, como consequência disso há o aumento da demanda de energia para sustentar as necessidades da vida em sociedade (SOUZA; ARISTONE, 2016). A preocupação com o meio ambiente, principalmente com o aquecimento global, vem estimulando a sociedade em geral ao uso de fontes de energias renováveis não danosas ao ecossistema. O Brasil possui condições naturais que favorecem e propiciam o aproveitamento das fontes renováveis em quase todas as suas regiões como: grandes dimensões de territórios, localização geografia privilegiada, abundância vegetal, intensa incidência solar, grande faixa litorânea entre outros (CÂMARA, 2011). Os sistemas fotovoltaicos vêm se destacando devido ao seu potencial e aos benefícios ambientais que este proporciona, além do que seu combustível são os raios solares; algo que é abundante e podemos considerar infinito ao tempo do homem. Os sistemas fotovoltaicos são conjuntos de módulos solares, que geram energia elétrica por meio da irradiação solar.

A importância desse trabalho se dá pelo fato de

o modelo de simulação e análise de implantação de sistemas renováveis possibilita prever efeitos, alterações e/ou emprego de métodos de operação no comportamento do modelo simulado semelhante ao sistema real. Tem como vantagens a facilidade de compreensão, análise e resultados a partir dos testes (simulações) do modelo visando à economia de tempo e recursos com qualidade, a partir de interfaces amigáveis, uso de plataformas de animação dos sistemas que estão sendo simulados (PAINES; VIGNOCHI; POSSAMAI, 2018, p. 23).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- a) Objetivo geral
 - Simular um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica.
- b) Objetivos específicos
 - Estudar a transferência de potência dos sistemas fotovoltaicos.
 - Especificar os tipos de conversores aplicados à injeção de potência na rede.
 - Definir uma estrutura de painéis fotovoltaicos para aplicação do sistema.
 - Definir a técnica de modulação do *Maximum Power Point Tracking* (MPPT).
 - Definir o conversor que será utilizado para a conexão do sistema à rede.
 - Simular o sistema fotovoltaico injetando potência na rede.
 - Realizar aquisição de dados de análise de desempenho do sistema.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1: apresenta uma breve introdução sobre a injeção de potência na rede por meio de sistemas fotovoltaicos. Além disso, foi apresentado os objetivos do trabalho com a devida importância do desenvolvimento deste trabalho;
- Capítulo 2: neste capítulo é apresentado o estado da arte, por meio de uma revisão bibliográfica da literatura. Destacando as principais soluções para a injeção de potência na rede;
- Capítulo 3: A metodologia é apresentada apontando as ferramentas e os métodos adotados para o alcance apresentados nos objetivos;
- Capítulo 4: Dentro de várias possibilidades de configurações de sistemas conectados à rede, é neste capítulo que é definido qual sistema será analisado neste trabalho. Basicamente o sistema será composto em três etapas;
- Capítulo 5: Como análise de desempenho de sistema, este capítulo apresenta os resultados com base no desempenho dos painéis fotovoltaicos em condições de sombreamento; qualidade de energia; perdas no inversor e potência injetada;
- Capítulo 6: Como finalização do trabalho, é apresentado as considerações finais neste capítulo.

2 REVISÃO LITERÁRIA

Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede, também chamada Geração Distribuída, é formado por inversores e painéis solares montados nas edificações ou em outros locais, como áreas livres, estruturas montadas e etc. Os painéis geram a energia elétrica em corrente contínua (CC), os quais estão conectados ao inversor que é responsável por converter em energia elétrica em corrente alternada (CA).

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Segundo a ANEEL (2016, p. 7): “a geração distribuída é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis ou mesmo

utilizando combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica.”

Há duas caracterizações da geração distribuída chamadas de Microgeração e Minigeração (ANEEL, 2016).

Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2016, p. 9).

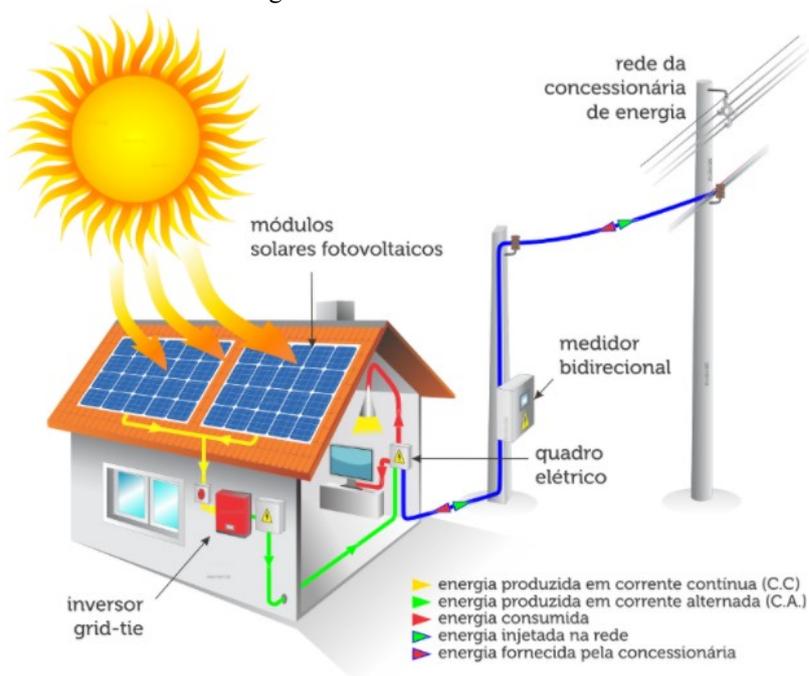
No estabelecimento em que há a geração distribuída, a energia elétrica é provida tanto do sistema fotovoltaico tanto do sistema elétrico da rede da concessionária. Quando o estabelecimento demanda mais energia do que está sendo gerado, a rede elétrica provê essa energia restante demandada. No entanto, quando o sistema gera mais do que o estabelecimento demanda, o excedente é injetado na rede elétrica, gerando crédito na fatura de energia (ANEEL, 2015). A figura 1 ilustra bem o funcionamento deste sistema.

Os sistemas solares fotovoltaicos interligados ao sistema de distribuição oferecem uma série de vantagens para o sistema elétrico. Dentre elas, pode-se destacar: A energia é produzida junto à carga, assim as perdas nas redes de transmissão e distribuição são minimizadas; A produção de energia elétrica ocupa um espaço já utilizado, uma vez que esta é integrada a edificação; Investimentos em linhas de transmissão e distribuição são reduzidos (CÂMARA, 2011, p.35).

Além disso, podemos também mencionar vantagens como redução de custos com perdas técnicas, melhoria da qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia (ANEEL, 2016).

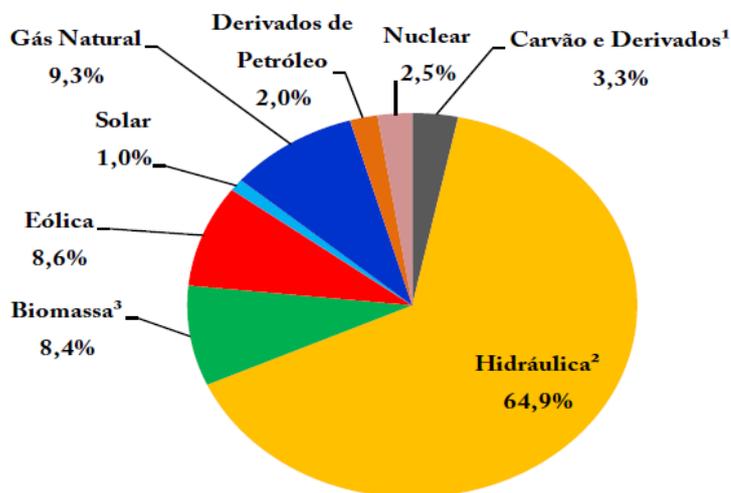
De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, a geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviços públicos e autoprodutores atingiu 626,3 Terawatt-hora (TWh) em 2019, 4,1% a mais que 2018 (BEN, 2020). Na figura 2 vemos que a geração solar é responsável por apenas 1% da oferta interna de energia elétrica em nosso território, sendo a energia elétrica obtida através da água predominante na matriz elétrica com 64,9% da oferta interna. A oferta interna de eletricidade no Brasil é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (BEN, 2020).

Figura 1 - Sistema fotovoltaico.



Fonte: Luz Solar (2021).

Figura 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Notas: 1. Inclui gás de coqueria; 2. Inclui importação de eletricidade; 3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações. Fonte: BEN 2020.

Em relação ao consumo elétrico nacional, o mesmo balanço nos mostra que o setor residencial é o segundo que mais consome eletricidade no país com 26,1%, superado apenas pelo setor industrial com 35,9%. Na figura 3 temos os setores e suas parcelas de participação no consumo de eletricidade do Brasil. Esses dados ratificam que a energia solar ainda é

iniciante na matriz energética do nosso país, contudo a cada dia se desenvolve e conquista mais espaço.

2.2 PAINEL FOTOVOLTAICO

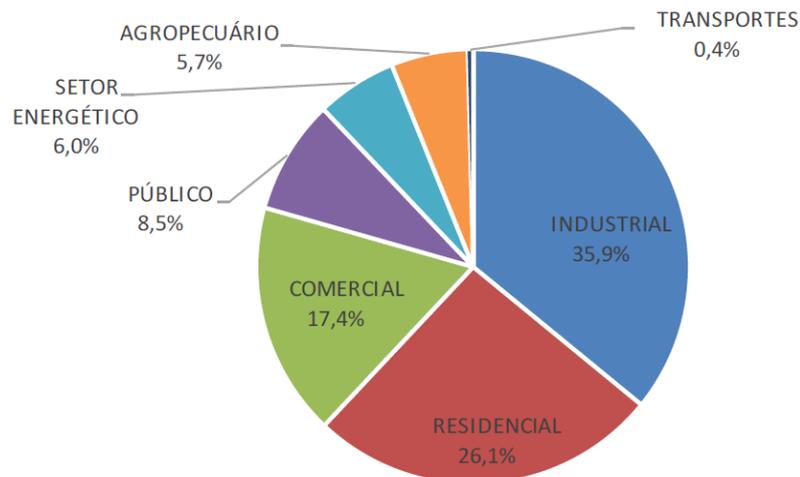
Os painéis solares (também chamados de módulos solares, módulos fotovoltaicos e painéis fotovoltaicos) funcionam através do efeito fotovoltaico, o qual é caracterizado pela reação certos materiais à luz, produzindo eletricidade (JANNUZZI, 2008).

Segundo PAINES; VIGNOCHI; POSSAMAI (2018. p. 18)

o funcionamento do sistema de energia solar fotovoltaica inicia-se pelo painel solar exposto a luz do sol que produz energia elétrica a partir da energia fotovoltaica. Os painéis solares são conectados uns aos outros. Sucessivamente, são conectados a um inversor solar, que tem a função de converte a energia solar dos seus painéis fotovoltaicos em energia elétrica [...].

A forma com que os painéis são conectados uns aos outros define os níveis de tensão e de corrente que todo o conjunto injetará na etapa seguinte do sistema fotovoltaico.

Figura 3 - Participação setorial no consumo de eletricidade.



Fonte: BEN 2020.

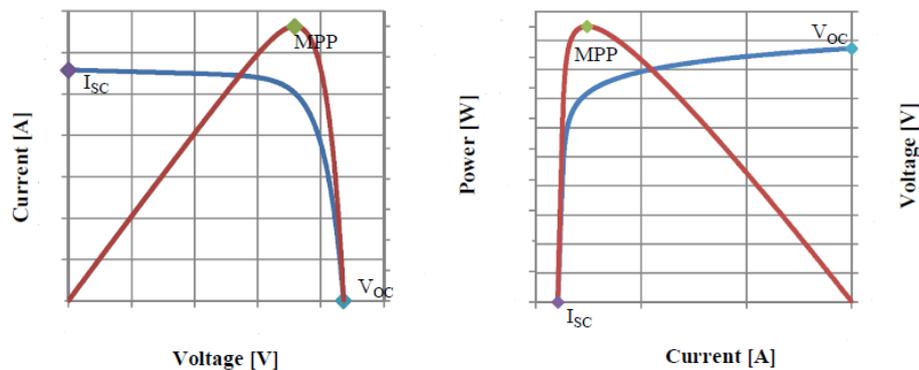
2.3 MPPT

Como a irradiação solar é um parâmetro variável, a geração do painel solar é não linear e depende também da temperatura do painel. Diante disso, cenários como sombreamento parcial, clima nublado, sujeira nos painéis alteram a máxima potência gerada pelo painel. Cada cenário faz com que o painel tenha um Ponto Máximo de Potência

(*Maximum Power Point - MPP*) diferente. É necessário que os inversores possuam técnicas de controle para rastrear o MPP (chamado de *Maximum Power Point Tracking - MPPT*) (MARANGONI, 2012). O MPPT rastreia a tensão e corrente que sai do painel solar e estabelece o ponto operacional que fornecerá a maior quantidade de energia gerada pelas mesmas à carga. Tal ponto deve ser operado de modo único, com valores de tensão e correntes especificados para se obter o máximo de potência do painel (BERIBER; TALHA, 2013). A figura 4 mostra a curva característica do painel solar.

A eficiência do método MPPT é um dos principais fatores que afeta a eficiência do sistema fotovoltaico, rastrear com eficiência o MPP garante que em todas as condições a potência máxima do painel será obtida (MORALES, 2010). Há vários métodos na literatura para o MPPT, como método de corrente de curto circuito; método de tensão de circuito aberto; sendo os mais comuns os métodos Condutância Incremental e Perturbe & Observe. Tais métodos são utilizados juntamente com os conversores de energia CC/CC (*Boost, Buck* ou *Buck-Boost*) separados para o MPPT (BERIBER; TALHA, 2013).

Figura 4 - Curva característica do painel solar.



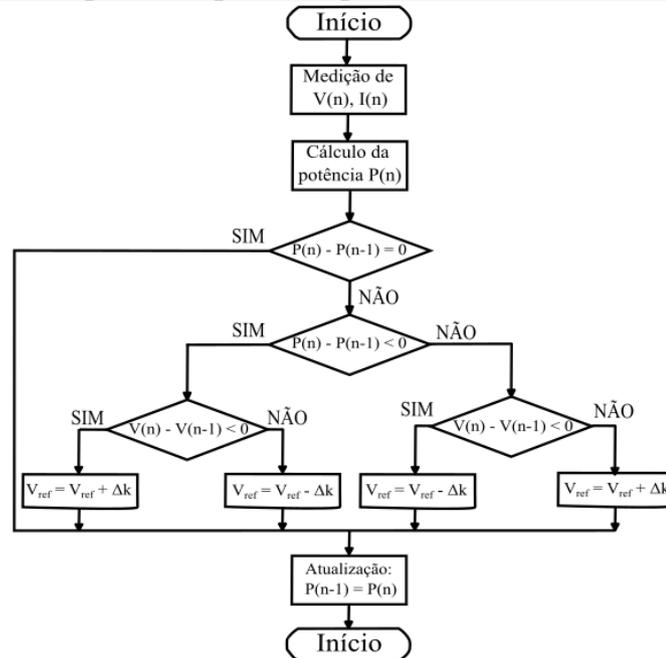
Fonte: Adaptado (MORALES, 2010).

2.3.1 Perturbe & Observe (P&O)

O P&O consiste na perturbação, observação e comparação iterativa da potência gerada pelos módulos fotovoltaicos. É bastante aplicado devido a sua simplicidade, fácil aprimoramento e baixo custo (YU; LIN, 2010). A potência dos painéis é calculada e uma perturbação (incremento ou decremento) na tensão ocorre. Se houve um incremento na tensão e a potência aumentar, a mesma perturbação é mantida. Caso a potência diminua, a próxima perturbação é feita com um decremento na tensão. Esse loop ocorre até que o MPP seja encontrado (MORALES, 2010).

O algoritmo que expõe esse método de rastreamento é mostrado na figura 5.

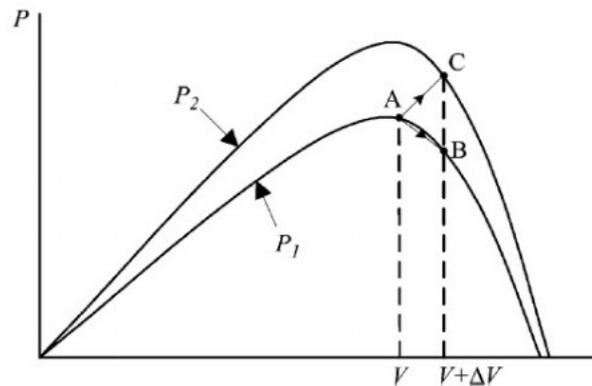
Figura 5 - Diagrama do algoritmo do método P&O.



Fonte: Adaptado (YU; LIN, 2010).

A desvantagem desse método é que o ponto rastreado sempre oscilará entre depois e antes do MPP, devido a sempre haver perturbação na tensão. Ou seja, o real MPP não será encontrado. O valor da perturbação (Δk) define a oscilação que haverá no MPP. Outra desvantagem do P&O é que a mudança brusca de irradiação pode causar erro no rastreamento como se mostra na figura 6. A curva P1 mostra um cenário com a irradiação normal (estado estacionário) sobre o painel, o ponto A é o ponto atual de operação da curva, com o incremento $+\Delta k$ do P&O o próximo ponto de operação será o ponto B, com isso a potência irá diminuir e o próximo incremento será o $-\Delta k$. Contudo, a irradiação muda bruscamente depois da coleta da potência do ponto A e se tornar a curva P2, o próximo ponto de operação vai ser o C ao invés do B. Isso resulta em a perturbação tender a $+\Delta V$, ficando longe do MPP, significando perda de eficiência e energia no sistema fotovoltaico (YU; LIN, 2010).

Figura 6 - Curvas P x V com cenários meteorológicos diferentes.



Fonte: (YU; LIN, 2010).

2.3.2 Condutância Incremental

Esse método é semelhante ao P&O, consistindo em determinar a direção da variação da tensão medindo e comparando a condutância incremental e a condutância instantânea dos módulos fotovoltaicos (YU; LIN, 2010). Pode se dizer também que é um método baseado na inclinação da curva P x V, em que a inclinação é:

- $\Delta V/\Delta P = 0$ no MPP;
- $\Delta V/\Delta P > 0$ à esquerda do MPP e
- $\Delta V/\Delta P < 0$ à direita do MPP.

Em que ΔV é a diferença da tensão atual com a tensão do loop anterior do algoritmo e ΔP é a diferença da potência atual com a potência do loop anterior do algoritmo.

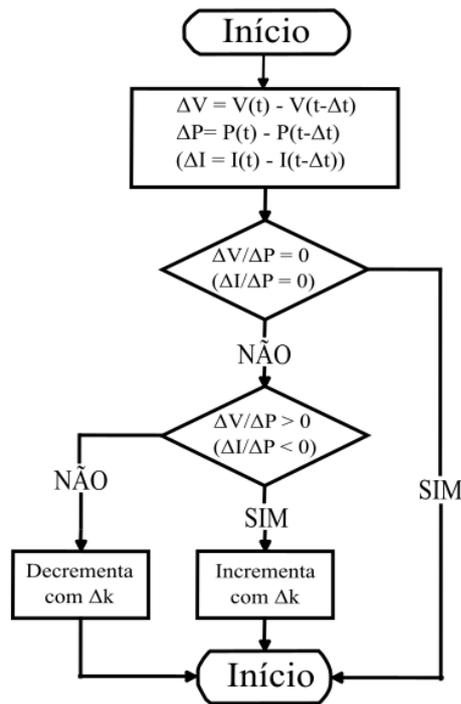
Pode-se também encontrar o ponto em função da corrente:

- $\Delta I/\Delta P = 0$ no MPP;
- $\Delta I/\Delta P < 0$ à esquerda do MPP e
- $\Delta I/\Delta P > 0$ à direita do MPP.

Em que ΔI é a diferença da corrente atual com a corrente do *loop* anterior do algoritmo (MORALES, 2010).

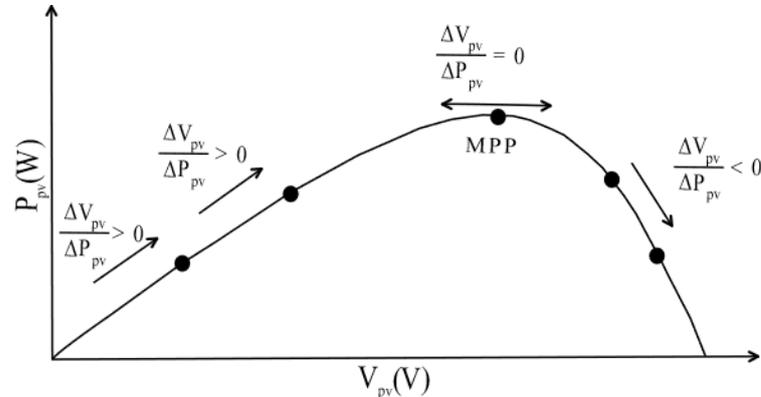
Um algoritmo de tal método é mostrado na figura 7. A figura 8 ilustra bem as etapas do método.

Figura 7 - Algoritmo do Condutância Incremental.



Fonte: Adaptado (MORALES, 2010).

Figura 8 - Rastreamento do MPP na curva P x V com o método Condutância Incremental.



Fonte: Adaptado (YOUSSEF *et al.*, 2010).

Assim como o P&O, o rastreamento na Condutância Incremental pode ser rápido a depender do valor do incremento da tensão. No entanto, esta possui as mesmas desvantagens do P&O, o ponto de operação oscila em torno do MPP – o tamanho da oscilação depende do valor do incremento, ou seja, é inversamente proporcional à velocidade de rastreamento – e mudanças bruscas de irradiação pode fazer o algoritmo errar no rastreamento (YU; LIN, 2010) (MORALES, 2010).

Algumas propostas de solução para essas desvantagens são encontradas na literatura, como a de (LEE; BAE; CHO, 2007), o qual propôs um algoritmo de condutância incremental que ajusta automaticamente o tamanho do incremento em relação ao MPP. Quando o ponto de

operação está longe do MPP o incremento da tensão é aumentado – se aproximando rapidamente do MPP –, diminuindo o valor deste quando se aproxima do MPP. Tal algoritmo diminuir a oscilação em torno do MPP. (BOUAKKAZ *et al.*, 2020) propôs um algoritmo em que o passo do *duty cycle* do conversor CC/CC *Boost* é ajustado para cada instante de tempo usando o *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dependendo da variação da potência e da corrente do sistema fotovoltaico. Esse método fornece uma saída estável e um excelente desempenho no estado estacionário para uma mudança repentina de temperatura e irradiação (BOUAKKAZ *et al.*, 2020). Já (FANG; LIAN, 2017) propõe um algoritmo P&O modificado com várias partículas (chamado de MP&O) as quais encontram os MPP's provocados pelo sombreamento e mudanças climatológicas e conseguem evitar o erro no rastreamento encontrando o real MPPT.

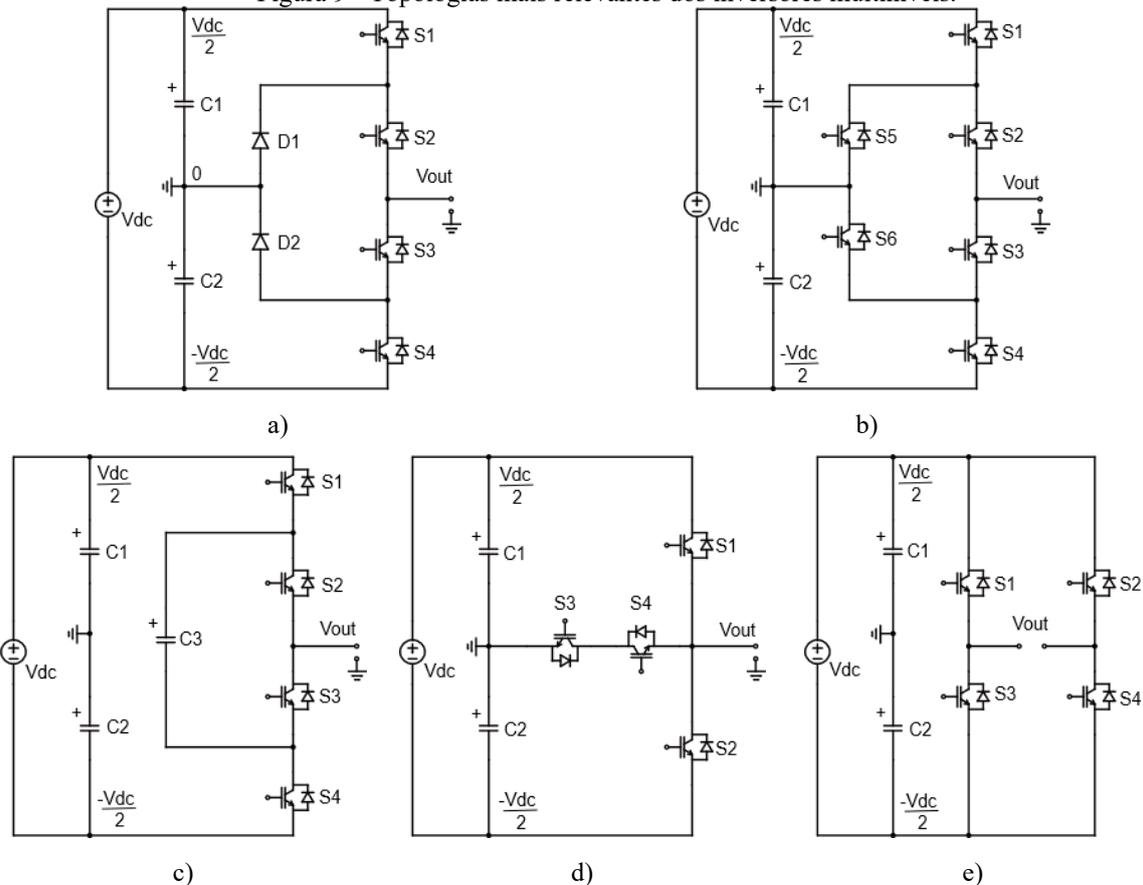
2.4 INVERSORES

Nos últimos anos, os inversores multiníveis têm se destacado como uma alternativa atraente para as aplicações de alta e média potência, devido às vantagens que possui comparado com os inversores convencionais de dois níveis. Vantagens como a redução do estresse de tensão nos dispositivos de chaveamento, qualidade elevada de tensão e corrente de saída e baixo índice de Distorção Harmônica Total são elementos que contribuem para o melhor custo-benefício dos inversores multiníveis (KIM; LEE; LEE, 2015). Além do baixo índice de Distorção Harmônica Total – alcançado pela alternância entre vários níveis de tensão – possuem as vantagens particulares de operação em altas tensões de barramento CC, devido às conexões em série dos dispositivos de chaveamento (MCGRATH; HOLMES, 2002).

Os inversores multiníveis incluem uma matriz de semicondutores de potência – geralmente *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) – e capacitores de fonte de tensão, cuja saída gera tensões com forma de onda escalonada. O chaveamento dos semicondutores de potência permite a adição das tensões do capacitor, atingindo alta tensão na saída, enquanto os semicondutores de potência devem suportar tensões reduzidas. Um inversor de dois níveis gera uma tensão de saída com dois valores (níveis) em relação ao terminal negativo do capacitor, enquanto o inversor de três níveis gera três tensões, e assim por diante (RODRÍGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Na literatura é possível encontrar várias topologias de inversores multiníveis. Entre as principais pode-se destacar: a topologia *Neutral Point Clamped* (NPC), a *Active Neutral Point Clamped* (ANPC), a *Flying Capacitor* (FC), a *NPC- Type T* e a *H-Bridge* (HB) (ver figura 9).

Figura 9 - Topologias mais relevantes dos inversores multiníveis.



a) NPC; b) ANPC; c) FC; d) NPC Type T; e) HB. Fonte: Autor (2021)

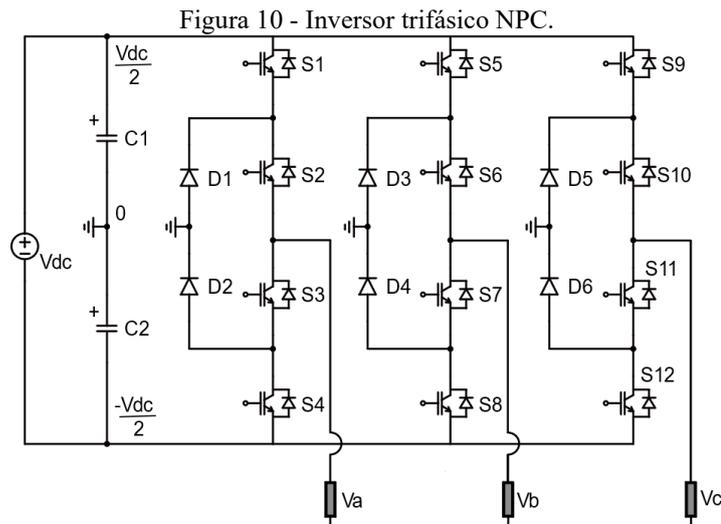
Diante da familiaridade adquirida através de projetos anteriores com a topologia NPC, essa topologia foi escolhida na aplicação deste projeto. Diante disso, iremos nos aprofundar apenas nessa topologia e utilizá-lo-emos em todo o decorrer deste trabalho.

2.4.1 Inversor NPC

O inversor multinível NPC foi desenvolvido por (NABAE; TAKAHASHI; AKAGI, 1981) com propósito inicial de criar um inversor com melhor desempenho, eficiência e menor distorção harmônica em comparação ao inversor tradicional de dois níveis, usados principalmente em acionamento de motores. Ele usa um único barramento CC que é subdividido em vários níveis de tensão por uma série de capacitores. Uma matriz de comutadores e diodos semicondutores permite que cada saída da perna da fase seja comutada para qualquer um desses níveis de tensão (MCGRATH; HOLMES, 2002).

2.4.1.1 Parte Construtiva do NPC

O circuito básico trifásico do inversor NPC é mostrado na figura 10. Obtendo-se três níveis na tensão de saída, o inversor trifásico é constituído por doze chaves, dois capacitores, seis diodos e a uma fonte V_{dc} . As chaves são responsáveis pelo chaveamento da fonte V_{dc} às cargas V_a , V_b , V_c e os diodos são responsáveis pelo grampeamento da tensão quando necessário no circuito. Os dois capacitores em série recebem a tensão total da fonte V_{dc} (cada capacitores recebe $V_{dc}/2$ V) e são responsáveis por manter a tensão nas chaves.



Fonte: Adaptado (RODRÍGUEZ; LAI; PENG, 2002).

2.4.1.2 Princípio de funcionamento

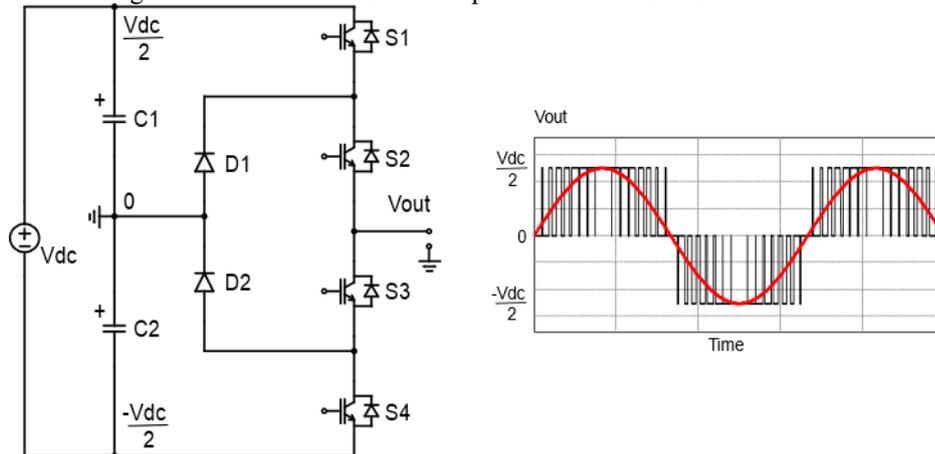
Na figura 11 é mostrado o circuito monofásico NPC com a forma de onda completa. A tensão do barramento é dada por três níveis de tensão $-V_{dc}/2$, 0, e $V_{dc}/2$ que são os mesmos níveis da tensão de saída do inversor. O ponto entre os capacitores $C1$ e $C2$ é o ponto neutro do circuito. Para o nível de tensão na saída ser $V_{dc}/2$ as chaves $S1$ e $S2$ têm que estar ligadas e desligadas para ser $-V_{dc}/2$. Para ser 0 são as chaves $S3$ e $S4$ precisam estar ativas (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Estados das chaves.

Est	S1	S2	S3	S4	V_{out} (V)
0	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
1	0	1	1	0	0
2	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

Fonte: Autor (2021).

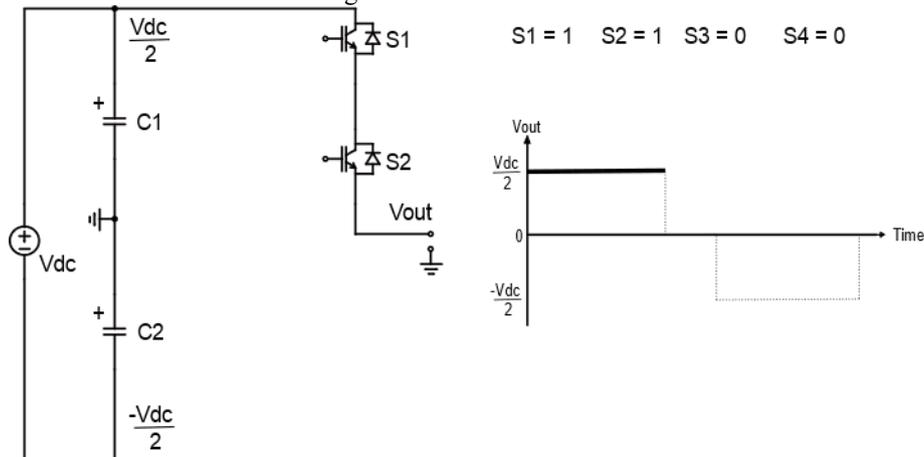
Figura 11 - Inversor NPC e a completa forma de onda na saída Vout.



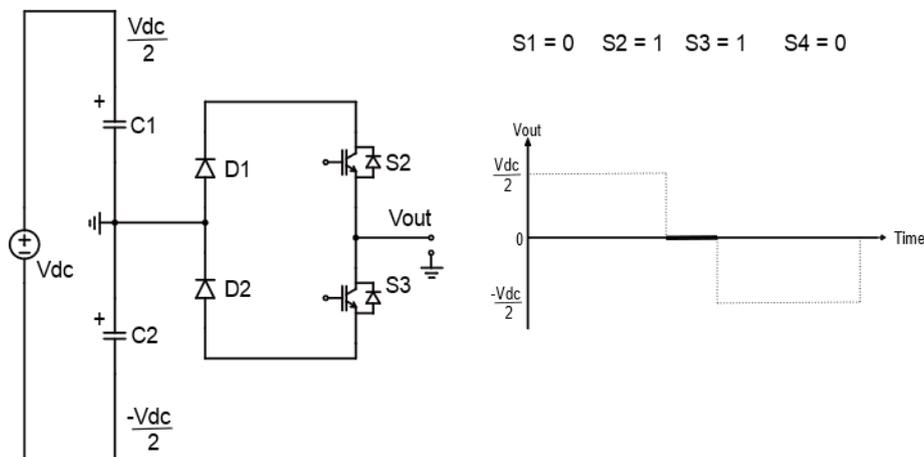
Fonte: Adaptado (RODRIGUEZ *et al.*, 2010).

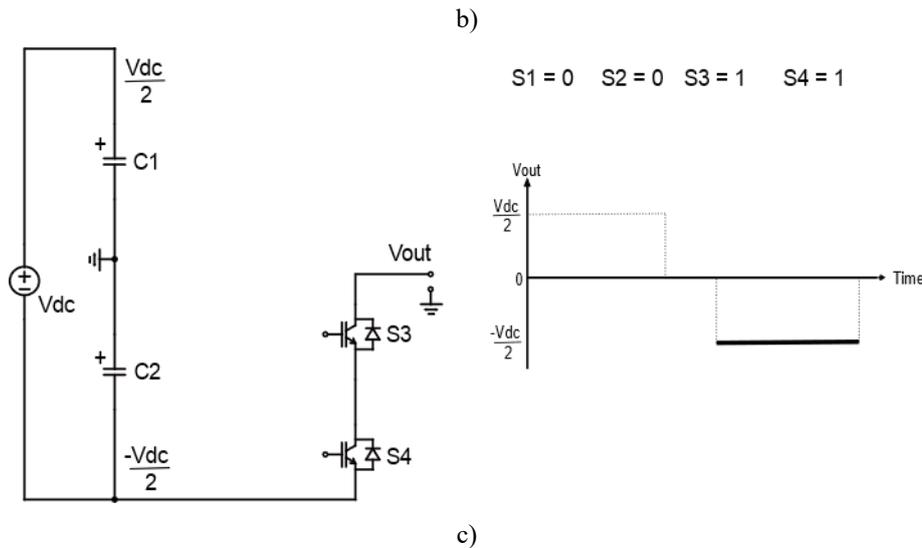
Quando S_1 e S_2 estão ligadas, o diodo D_1 se polariza reversamente, bloqueando assim a tensão nele. Quando as chaves S_3 e S_4 estão ligadas, o mesmo ocorre com o diodo D_2 (RODRÍGUEZ; LAI; PENG, 2002). A figura 12 detalha bem os estados de chaveamento do inversor com suas respectivas formas de onda na saída.

Figura 12 - Estados de chaveamento.



a)





a) Est. 0; b) Est. 1; c) Est. 2. Fonte: Autor (2021).

2.4.1.3 Método de modulação

Para controlar as chaves dos inversores multiníveis, são utilizados métodos de modulação. Tais métodos são classificados de acordo com a frequência de chaveamento das chaves. Topologias de inversores que exigem alta frequência de chaveamento em um período da frequência fundamental exigem métodos que trabalham com alta frequência de comutação. Um método de que se destaca é o sinusoidal clássico baseado em portadora – *classic carrier-based sinusoidal PWM* – que utiliza a técnica de mudança de fase para diminuir harmônicos na tensão de saída (RODRÍGUEZ; LAI; PENG, 2002).

A modulação por portadora para inversores multiníveis NPC foi apresentada por (CARRARA *et al.*, 1992), no qual o número de portadoras triangulares é igual a $N - 1$, em que N é o número de níveis do inversor. As portadoras triangulares possuem mesma frequência e mesma amplitude e são dispostas de modo que ocupem toda a banda contígua da faixa $+V_{dc}$ até $-V_{dc}$. Uma tensão de referência senoidal é comparada com as portadoras para efetuar o chaveamento do NPC.

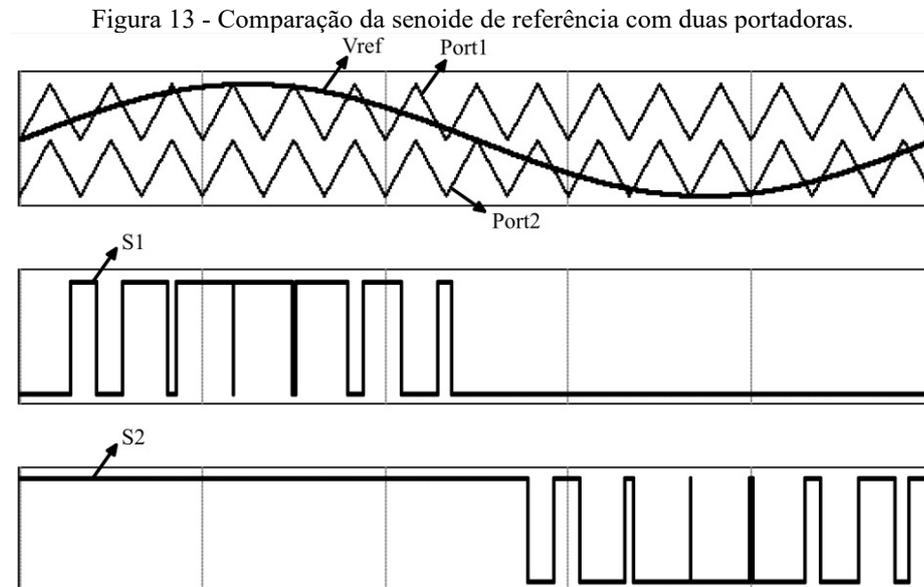
A modulação baseada em portadora é uma técnica comum, simples e de fácil implementação, diante disso tal método foi escolhido para este trabalho. Neste trabalho é utilizado um inversor de três nível NPC. Utiliza-se uma senoide de referência (V_{ref}) o qual é comparada com duas triangulares de portadora (Port 1 e Port 2), como mostra a figura 13.

A lógica da comparação é a seguinte:

- Se $V_{ref} > \text{Port 1}$, a chave S1 é ligada (tensão de saída: $V_{dc}/2$ V);
- Se $V_{ref} > \text{Port 2}$, a chave S2 é ligada (tensão de saída: $-V_{dc}/2$ V);

- Se $Port\ 2 < V_{ref} < Port\ 1$, S2 é ligada e S1 desligada (tensão de saída: 0 V) (RODRÍGUEZ *et al.*, 2010.).

A chave S1 é complementar de S3, ou seja, quando a chave S1 estiver ligado a chave S3 estará desligado e vice versa. O mesmo ocorre nas chaves S2 e S4 (ver figura 11).



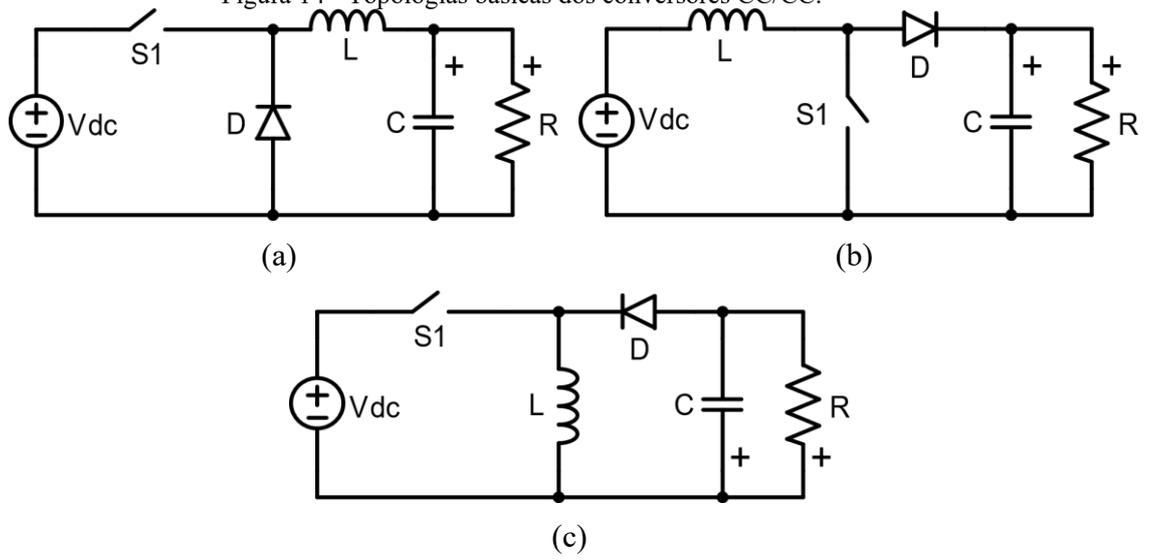
Fonte: Autor (2021).

2.5 CONVERSORES CC/CC

Os conversores CC/CC são usados em aplicações em que a tensão necessária de saída é menor ou maior que a tensão de entrada. Essa conversão é atingida controlando o tempo em que o interruptor principal do conversor conduz e não conduz. A relação entre o tempo em que a chave está ligada e desligada é chamada de *duty cycle* (ENRIQUE *et al.*, 2007). As três topologias básicas dos conversores CC/CC encontram-se na figura 14 os quais são:

- Conversor *Buck*: também conhecido como conversor abaixador, em que a tensão de saída é menor que a tensão de entrada.
- Conversor *Boost*: também chamado de conversor elevador, em que a tensão de saída é maior que a tensão de entrada.
- Conversor *Buck-Boost* – em que a tensão de saída pode ser maior ou menor que a entrada.

Figura 14 - Topologias básicas dos conversores CC/CC.



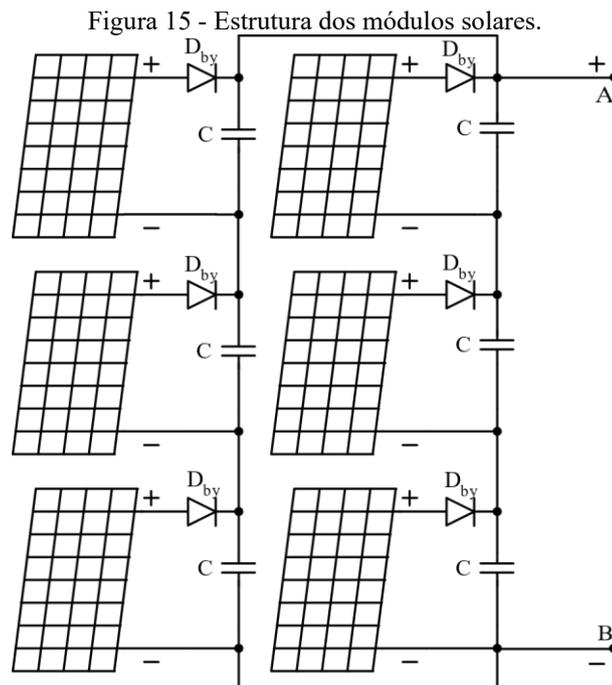
(a) *Buck*; (b) *Boost*; (c) *Buck-Boost*. Fonte: Adaptado (ENRIQUE *et al.*, 2007).

3 METODOLOGIA

Do ponto de vista de sua natureza, esta pesquisa teve caráter prático já que simulamos e analisamos o comportamento de um produto. No que tange a forma de abordagem, se caracteriza como uma pesquisa quantitativa, pois recorre a linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, relações entre variáveis, entre outras aplicações (FONSECA, 2002), sendo que dados numéricos sobre o comportamento do sistema fotovoltaico serão obtidos. E por último, caráter bibliográfico e experimental, de modo que recorremos a uma síntese da literatura sobre o tema abordado, sendo submetido ao sistema tratamentos diferentes, verificando as variáveis e checando se as diferenças observadas nas respostas foram estatisticamente significantes (FONSECA, 2002).

A princípio foram utilizadas as plataformas *IEEE Xplore Digital® Library* e Portal de Periódicos da CAPES para sintetizar e estudar a transferência de potência dos sistemas fotovoltaicos, além de artigos e outros documentos disponíveis publicamente na internet. Com isso também foi especificado os tipos de conversores mais comuns aplicados à injeção de potência na rede.

A estrutura definida para os painéis solares é mostrada na figura 15. É composta por seis painéis solares, dois conjuntos desses estão em paralelo nos quais cada conjunto é formado por três painéis em série. Na tabela 2 estão descritos os parâmetros do módulo solar utilizado.



Fonte: Autor (2021)

Os diodos de *bypass* (D_{by}) é utilizado em paralelo com cada módulo a fim de evitar que o mesmo se torne uma carga ao invés de um gerador, situação em que o módulo consome a energia gerada pelos outros quando esse gera menos potência em relação aos demais, circunstância frequente com um sombreamento parcial, por exemplo. Os capacitores presentes em todos os módulos dão mais estabilidade na tensão gerada por cada.

Tabela 2 - Parâmetros do painel solar.

Especificação	Valor
Potência de pico	60 Watts
Número de células	36
Tensão de circuito aberto	21,1 Volts
Corrente de curto circuito	3,8 Ampéres
Tensão no ponto máximo de potência	17,1 Volts
Corrente no ponto máximo de potência	3,5 Ampéres
Temperatura de referência	25 °C
Resistência em série	0,008 Omh
Resistência de derivação	1000 Omhs
Intensidade de luz padrão	1000 Watts/metro ²

Fonte: Autor (2021).

A técnica e o conversor definido para o rastreo do MPP foram, respectivamente, o P&O e o *Boost*, este por se adequar às mais variáveis aplicações dos sistemas fotovoltaicos (SOUSA, 2016), além disso pode-se injetar uma tensão maior na saída do conversor já que a tensão gerada pelo módulo na entrada na maioria dos casos é baixa, e aquele por ser uma técnica de simples manipulação e fácil implementação.

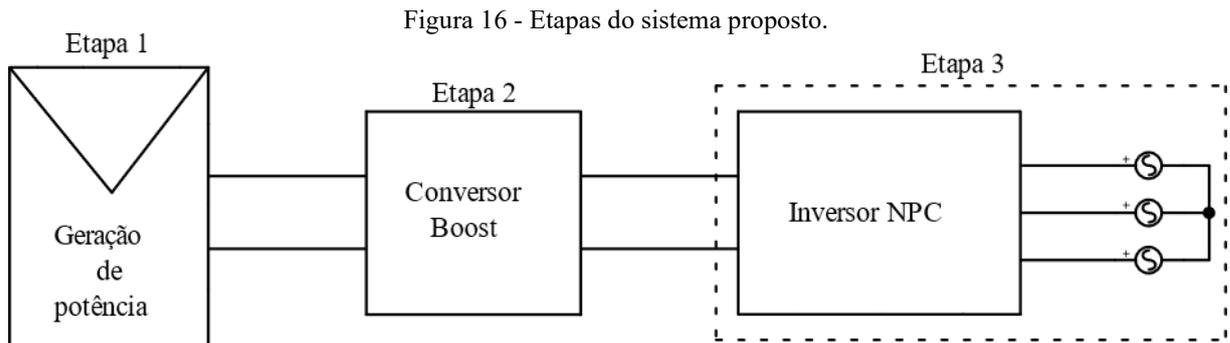
Como já adiantado anteriormente, diante da familiaridade adquirida através de projetos anteriores com a topologia NPC, essa topologia foi escolhida para ser utilizada para a conexão do sistema à rede, juntamente com a modulação PWM por portadoras.

O software PSim foi utilizado para simular um sistema fotovoltaico, utilizando os elementos de simulação do Psim, como fontes contínuas, módulos de controles, painéis solares, resistores, indutores, IGBT, MOSFETs, além de sensores de tensão, de corrente e outros dispositivos eletrônicos disponíveis no simulador para realizar aquisição de dados de análise de desempenho do sistema.

4 SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto é composto por três etapas, conforme a figura 16:

- Etapa 1: Ocorre a geração de potência;
- Etapa 2: Ocorre o rastreamento do MPP;
- Etapa 3: Ocorre a aplicação da potência gerada.



Fonte: Autor (2021).

4.1 ETAPA 01 – GERAÇÃO DE POTÊNCIA

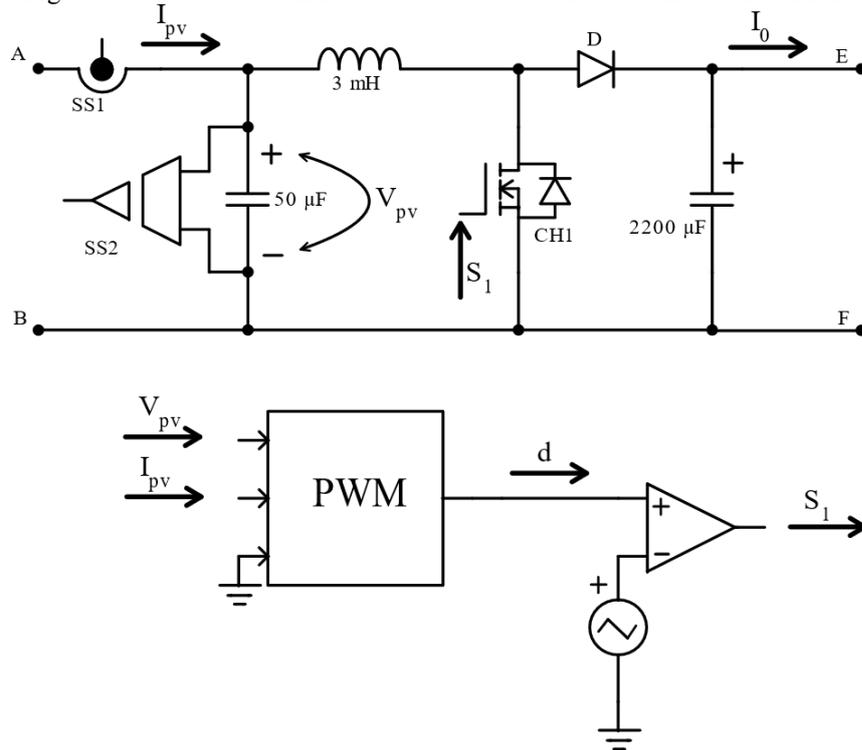
Essa etapa acontece com a geração de potência através dos painéis solares dispostos da maneira conforme mostrado na figura 15. Na simulação, estes recebiam uma irradiância ideal de 1000 Watts/metro² (W/m²) e irradiação de sombreamento variado conforme será visto no tópico 5 desse trabalho e operavam a uma temperatura de 25 °C. O valor do capacitor C presente em cada painel é de 50 nF. As especificações do módulo solar utilizado neste trabalho encontram-se explicito na Tabela 2.

4.2 ETAPA 02 – RASTREIO DO MPP

O rastreamento do MPP é feito através do conversor *Boost*, conforme mostra a figura 17. Os painéis solares são conectados ao conversor *Boost* através dos pontos A e B. O sensor SS1 é responsável por medir a corrente injetada pelos painéis no conversor (I_{pv}), medição que é enviada para o Bloco de Linguagem em C (PWM). O mesmo ocorre com o sensor SS2, no qual é encarregado por medir a tensão gerada pelos painéis (V_{pv}).

O bloco PWM é imputado de gerar o sinal de *duty cycle* (d), com base na corrente e tensão compartilhadas pelos sensores 1 e 2. Esse sinal é calculado seguindo a rotina de cálculo do P&O exposta na figura 5.

Figura 17 - Rastreamento do MPP através do conversor *Boost* com a técnica P&O.



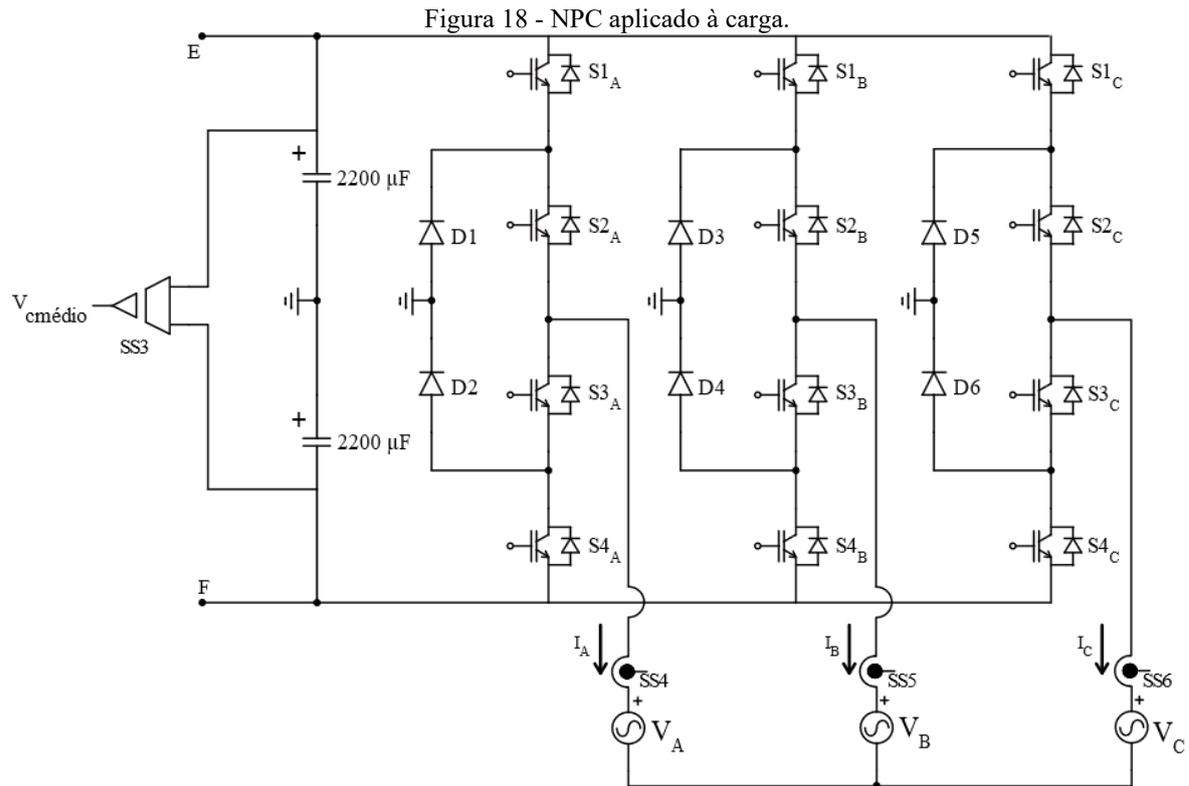
Fonte: Autor (2021).

Uma vez gerado o sinal d , esse é comparado com um sinal triangular de amplitude unitário, *duty cycle* de valor 1 e frequência de 10.000 *hertz* (Hz). O resultado dessa comparação é o valor binário S_1 , no qual é o responsável pela comutação da chave CH1 do *Boost*. A rotina de comparação é a seguinte:

- Se $d \geq \text{triangular}$, $S_1 = 1$ (ligado);
- Se $d < \text{triangular}$, $S_1 = 0$ (desligado).

4.3 ETAPA 03 – APLICAÇÃO

Nessa etapa, é feita a conversão da potência contínua gerada pelos painéis solares em potência alternada através do inversor NPC e subsequentemente a aplicação dessa à carga, ou seja, à rede elétrica. O conversor da etapa anterior é conecta ao NPC nos pontos E e F, conforme mostra a figura 18.



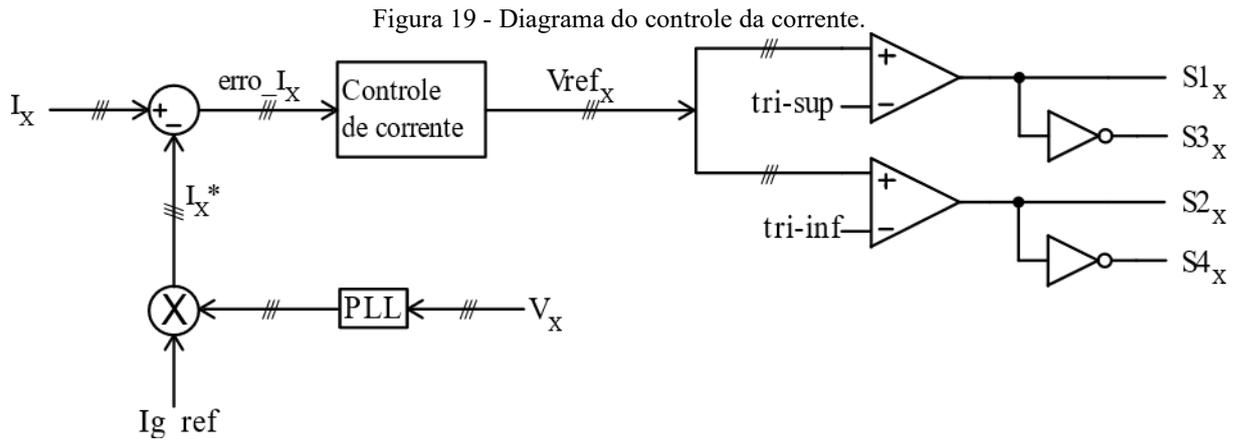
Fonte: Autor (2021).

O sensor3 é responsável pela medição da tensão entre os capacitores do barramento ($V_{cmédio}$); os sensores SS4, SS5 e SS6 são responsáveis pela medição das correntes, respectivamente, I_A , I_B e I_C injetada na rede. Todos os dados medidos serão utilizados para o controle do chaveamento do inversor. Cada uma das tensões V_a , V_b , V_c possui 35 volts de amplitude, todas na mesma frequência de 60 Hz e defasadas 120° uma das outras.

4.3.1 Controle

Na figura 19 é mostrado o diagrama de controle da corrente para a comutação das chaves do inversor NPC, onde, $X = \{A,B,C\}$.

A variável I_X é a corrente instantânea medida na rede. A I_{g_ref} é a corrente de referência em que escolhemos a amplitude da corrente a ser injetada na rede com base na capacidade de geração dos painéis fotovoltaicos. A corrente de referência é sincronizada com a tensão da rede por meio da PLL.



Fonte: Autor (2021).

O erro de corrente (erro_{I_x}), que é a diferença entre a corrente instantânea e a corrente de referência ($I_x - I_x^*$), é aplicado ao controle de corrente de dupla sequência, gerando as tensões de referência que serão utilizadas na modulação do inversor NPC juntamente com as triangulares tri-sup e tri-inf.

Tabela 3 - Valores das triangulares tri-sup e tri-inf.

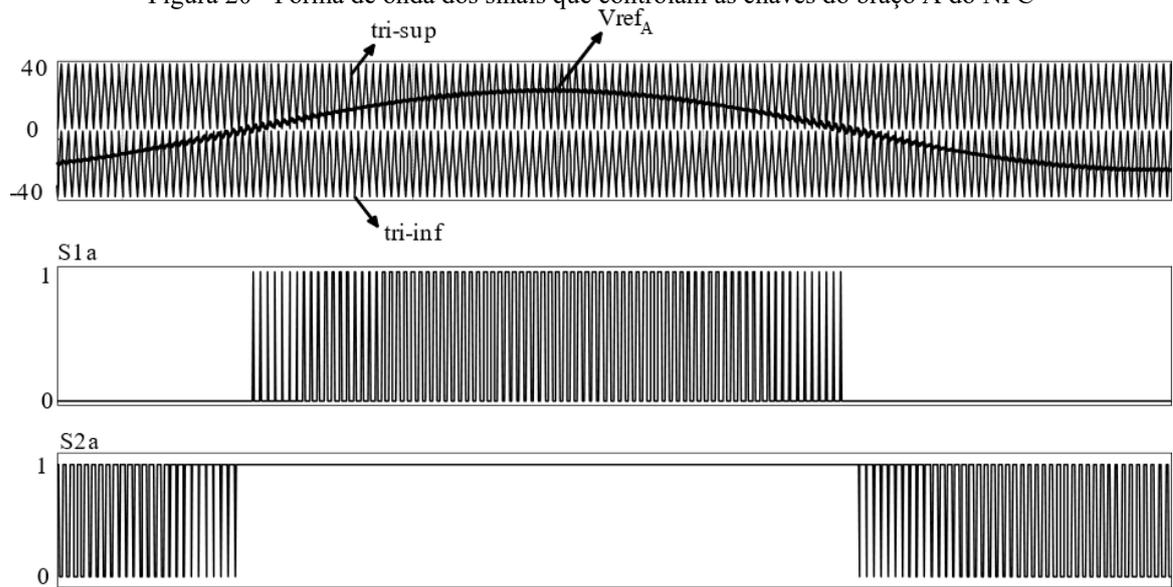
Dados	tri-sup	tri-inf
Pico-a-pico	40 volts	40 volts
Frequência	10 kHz	10 kHz
<i>Duty cycle</i>	0,5	0,5
<i>Offset</i>	0	-40 volts

Fonte: Autor (2021).

A figura 20 mostra as formas de onda da tensão de referência A (V_{ref_A}), da triangular superior e inferior (tri-sup e tri-inf, respectivamente) e das chaves S1a e S2a (o sinal das chaves S3a e S4a é o oposto, respectivamente). A comparação e a forma de onda é o mesmo para o braço B e C do inversor.

Os dados das triangulares está disposto na tabela 3, assim como na figura 21 encontra-se o sistema proposto por completo.

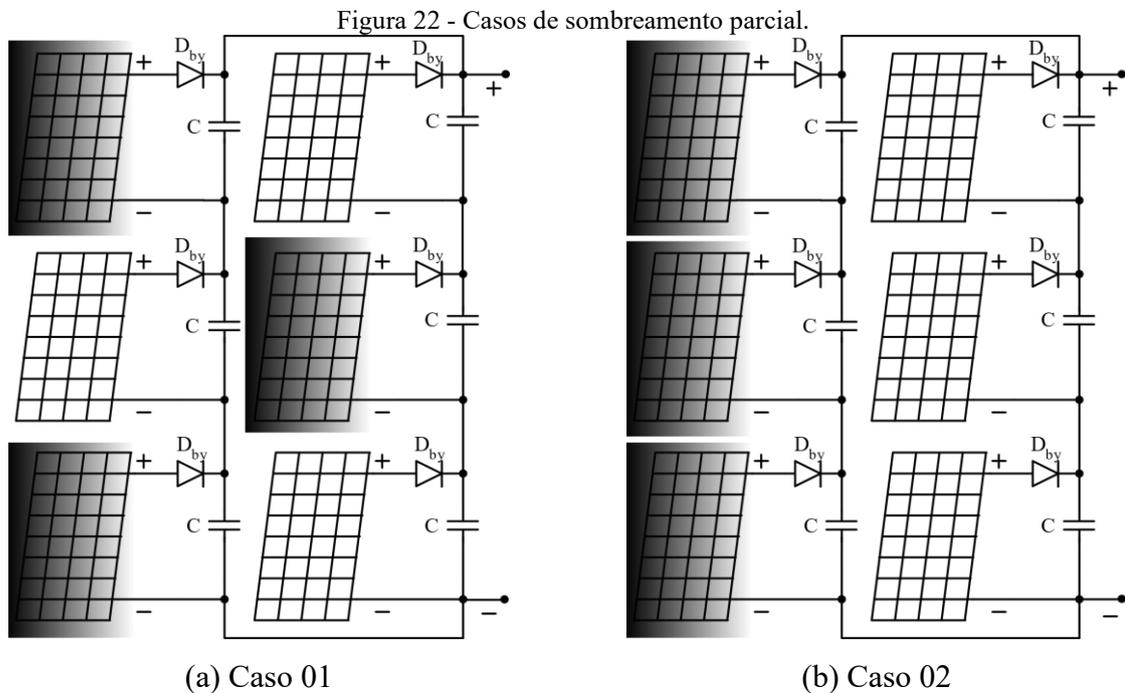
Figura 20 - Forma de onda dos sinais que controlam as chaves do braço A do NPC



Fonte: Autor (2021).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Dois casos foram utilizados para a obtenção de resultados, conforme a figura 22.



Fonte: Autor (2021).

Em ambos os casos é sombreado parcialmente três módulos solares dentre os seis disponíveis. Considerando a configuração proposta em nosso sistema, o Caso 01 irá apresentar sombreamento em dois painéis do primeiro conjunto série dos painéis e um painel do segundo conjunto série dos painéis (ver figura 22(a)). Já o Caso 02 apresenta um sombreamento em todos os painéis de um dos conjuntos em série (ver figura 22(b)). Os resultados foram obtidos com a irradiância do sombreamento de 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 W/m², em que 1000 W/m² não há sombreamento, sendo esse o caso dos demais módulos.

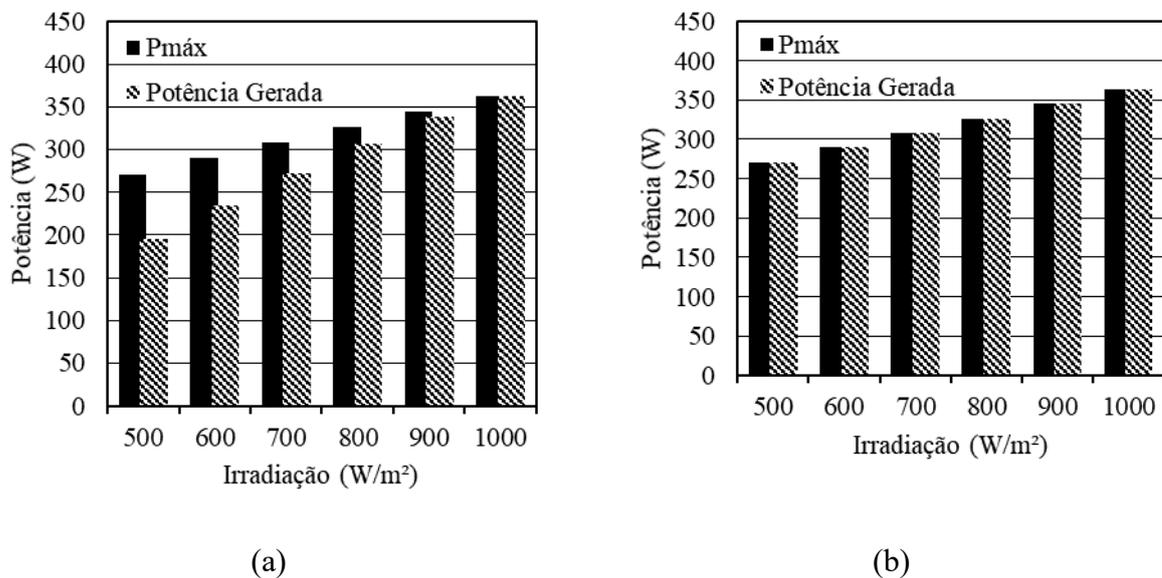
Os resultados obtidos foram avaliados com base em quatro aspectos: desempenho dos painéis fotovoltaicos em condições de sombreamento; qualidade de energia; perdas no inversor e potência injetada.

5.1 DESEMPENHO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM CONDIÇÃO DE SOMBREAMENTO

O desempenho dos painéis foi avaliado com a análise da potência rastreada pelo MPPT (Potência gerada) e a Potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$) que poderia ser gerada para situação atual da obtenção dos dados. O $P_{m\acute{a}x}$ é o somatório das potências individuais de cada módulo solar. Na figura 23 encontra-se o comparativo de tais potências para ambos os casos analisados.

O eixo que apresenta a irradiação apresenta apenas os valores de sombreamento aos painéis indicados em cada caso. Os outros painéis que não apresenta sombreamento foram alimentados com uma irradiação de 1000 W/m^2 . Esta informação se enquadra em todas as figuras desse capítulo.

Figura 23 - Comparativo da potência gerada e a potência máxima.



(a) Caso 01; (b) Caso 02. Fonte: Autor (2021).

No Caso 01 fica bastante explícito que quanto maior o sombreamento menor é a potência rastreada pelo método de rastreo P&O. Este tem dificuldade em rastrear com precisão quando o sombreamento aumenta nos dois braços de módulos solares ocasionando uma perda de potência considerável, sendo em torno de 27% com a irradiação de 500 W/m^2 .

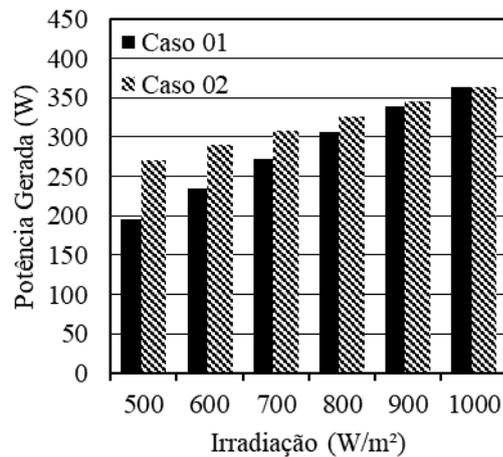
No Caso 02 o rastreamento é bastante efetivo, pois o sombreamento é apenas em um braço do conjunto de módulos, ficando um desses braços totalmente irradiado.

Essa diferença se dá pelo fato de que os painéis sombreados limitam a potência gerada nos painéis que estão em série. No Caso 01, o primeiro conjunto que possui dois painéis sombreados acaba limitando a potência gerada pelo painel que não está sombreado pelo fato de os painéis estarem em série, fazendo a corrente que circula nesse ramo do circuito, que é a

mesma, ser limitada pelo sombreamento. Já no Caso 02, um braço está totalmente sombreado e o outro não está, neste não havendo uma limitação de corrente em ambos os braços.

Para melhor percepção no comparativo dos dois casos, a figura 24 mostra a potência gerada em ambos os casos.

Figura 24 - Potência Gerada no caso 01 e 02.



Fonte: Autor (2021).

5.2 QUALIDADE DE ENERGIA

A qualidade de energia é avaliada com a base na distorção harmônica que há na corrente. A taxa de distorção harmônica (THD) é o fator mais utilizado para definir a quantidade de harmônicos em sinais alternados. A THD define o quanto que o sinal difere de uma onda senoidal pura. A presença de uma distorção harmônica alta tem influência em vários pontos no estudo de inversores. Primeiramente que a qualidade da energia diminui consideravelmente, além do mais tem influência no fator de potência, por isso a importância do cálculo da distorção harmônica (SILVA; ANDRADE, 2021). A THD é definida como:

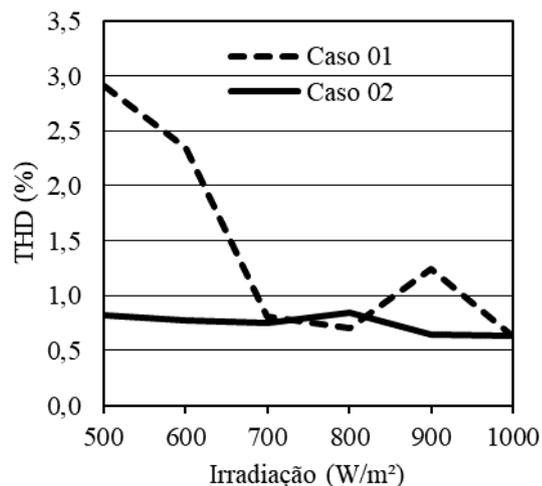
$$THD\% = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (1)$$

- Em que a THD é dada em porcentagem;
- V_1 é a tensão na frequência fundamental da senoide;
- V_n é a tensão no enésimo harmônico;
- \sum é o somatório de todos os harmônicos.

Na figura 25 é mostrado a distorção harmônica nos casos 01 e 02 com diferentes níveis de sombreamento.

No caso da distorção harmônica, pode-se perceber que o Caso 02 apresenta um resultado mais regular, pois temos um padrão de irradiação nos dois conjuntos série da configuração do sistema fotovoltaico.

Figura 25 - THD no caso 01 e 02.



Fonte: Autor (2021).

Em relação ao Caso 01, para um mesmo conjunto série do sistema fotovoltaico temos painéis sombreados e outros não sombreado. Essa diferença reflete no desempenho da qualidade de energia por meio do THD.

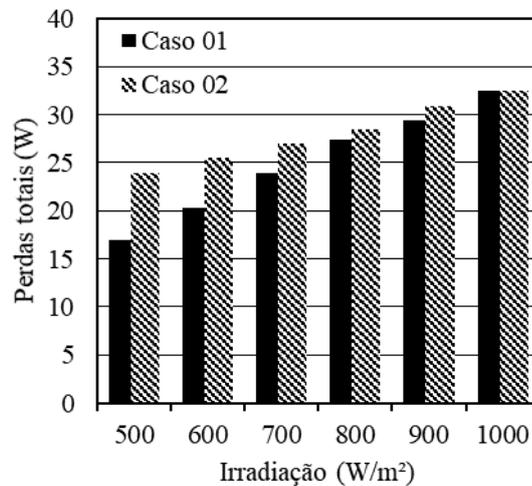
A norma internacional IEEE 1547 determina que a distorção harmônica não deve ultrapassar 5% em sistemas fotovoltaicos com potência menor que 10 kWp (apud NUNES, 2017). Em ambos os casos deste sistema fotovoltaico proposto a taxa de distorção ficou abaixo da determinada pela referida norma. Pode-se deduzir que o sombreamento em painéis de vários braços em um conjunto maior que o proposto neste trabalho pode ultrapassar facilmente o que determina a norma.

5.3 PERDAS NO INVERSOR

Perdas por condução e por chaveamento ocorrem nos interruptores do inversor, gerando ainda mais diminuição na potência injetada na rede. Entende-se por perdas totais o

somatório das perdas por condução e por chaveamento. Na figura 26 é mostrado as perdas totais nos dois casos de análise.

Figura 26 - Perdas totais.



Fonte: Autor (2021).

Em ambos os casos, as perdas totais diminuem com o aumento do sombreamento. Isto se dá principalmente pelo fato de que a corrente que passa pelos interruptores diminui com o aumento do sombreamento, diminuindo também a perda por condução no interruptor do inversor.

Além disso, em geral, as perdas totais no Caso 02 são maiores que no Caso 01, principalmente com o aumento do sombreamento. Um suposto motivo para esse fenômeno é a potência gerada no Caso 02 ser maior que no Caso 01 com sombreamento parcial – conforme visto no tópico 5.1 – consequentemente as perdas por condução também serão maiores.

5.4 POTÊNCIA INJETADA

Nesse tópico é possível fazer um comparativo da potência gerada e a potência injetada na rede. Na tabela 4 e na figura 27 encontra-se respectivamente os dados exatos obtidos e o comparativo graficamente destas potências.

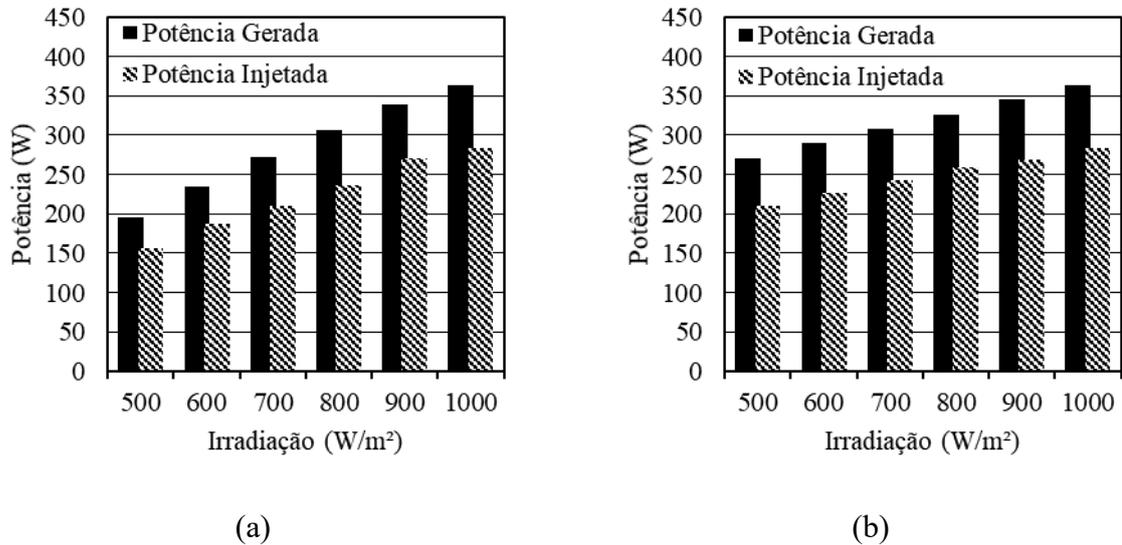
Tabela 4 - Potência Gerada x Potência Injetada.

Caso 01			Caso 02		
Irradiação (W/m²)	Potência Gerada (W)	Potência Injetada (W)	Irradiação (W/m²)	Potência Gerada (W)	Potência Injetada (W)
500	195,94	155,86	500	270,78	210,04
600	234,24	188,15	600	289,38	226,67
700	271,41	210,71	700	307,94	242,8

800	306,8	236,69	800	326,4	259,03
900	338,9	271,16	900	344,76	268,23
1000	363,08	284,19	1000	363,08	284,19

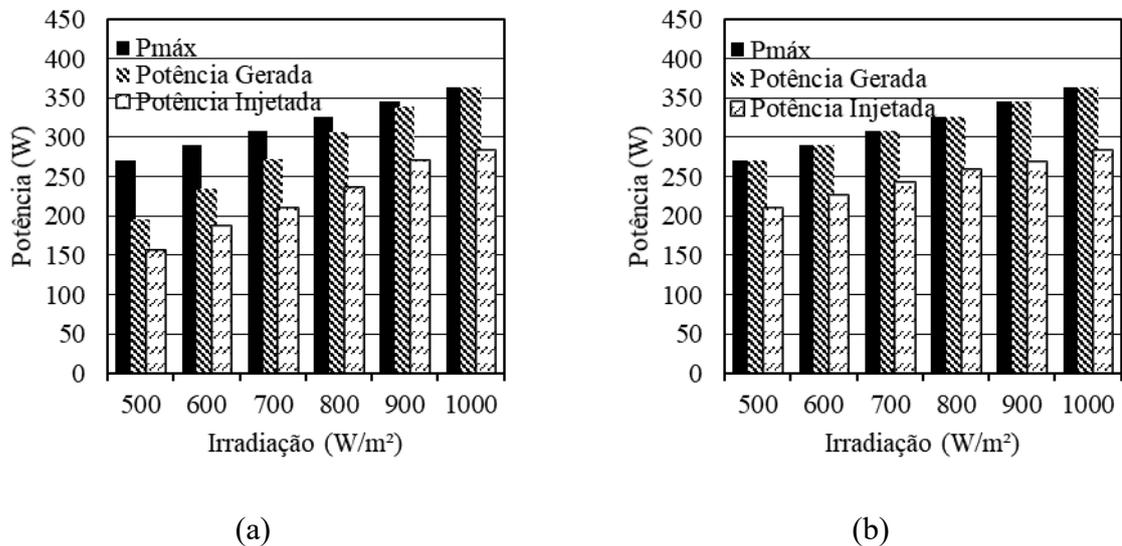
Fonte: Autor (2021).

Figura 27 - Potência Gerada x Potência Injetada no Caso 01 e 02.



(a) Caso 01; (b) Caso 02. Fonte: Autor (2021).

Figura 28 - Comparativo da potência máxima, potência gerada e a potência injetada no Caso 01 e 02.



(a) Caso 01; (b) Caso 02. Fonte: Autor (2021).

A potência injetada sempre é menor que a gerada, devido as perdas ocorridas ao longo da etapa de geração à etapa de aplicação. Além das perdas por condução e chaveamento, há outras formas de perdas não calculadas nesse trabalho, como por exemplo perdas no

conversor *Boost*. Isto também se reflete na potência injetada, podendo ser equacionada como: Potência Injetada = Potência Gerada - Perdas Totais - Demais formas de perdas. A figura 28 mostra as potências máxima, gerada e injetada, em que o comparativo é mais perceptivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi visto nesse trabalho, a proposta de conectar um sistema fotovoltaico à rede através de um inversor multinível NPC foi apresentado, e os parâmetros de análises foram desempenho dos painéis fotovoltaicos em condições de sombreamento; qualidade de energia; perdas no inversor e potência injetada.

Em condições de sombreamento, o Caso 01 teve um pior desempenho em comparação ao Caso 02, devido à limitação de corrente que há, conseqüentemente dificultando o rastreamento do MPP e diminuindo a potência gerada em comparação à potência máxima possível de gerar. O desempenho do Caso 02 foi satisfatório pois o sombreamento ocorre somente em um braço dos painéis, por consequência há uma alta eficiência no rastreamento do MPP, como resultado a potência gerada se assemelhou à potência máxima possível.

O Caso 02 teve uma melhor qualidade de energia por ter menor e mais regular índice de distorção harmônico. Entretanto, o Caso 01 teve um melhor desempenho quando o quesito foi perdas no inversor – isto é, teve um índice menor em perdas totais, fato resultante da corrente ser menor no Caso 01 ocasionando um menor índice de perdas por condução.

No quesito potência injetada, o Caso 02 teve uma melhor performance do que o Caso 01, apesar de ambos os casos terem o mesmo número de painéis solares sombreados. De maneira geral, o sombreamento individual em módulos solares de vários braços de um sistema fotovoltaicos é mais prejudicial à geração que o sombreamento de um braço completo, levando em consideração o mesmo número de módulos sombreados em ambos os casos.

Como proposta para trabalhos futuros, menciona-se o seguinte:

- Implementação do controle do barramento de capacitores;
- Simulação em condições reais para aplicação;
- Análise do sistema com outros conversores CC/CC e/ou Inversores multiníveis.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa n 687/2015**: Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2021.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016. (Cadernos temáticos ANEEL). Disponível em <https://www.aneel.gov.br/livros/-/asset_publisher/NBC33JHYPjrv/content/cadernos-tematicos-aneel-micro-e-minigeracao-distribuida-2-edicao/656835>. Acesso em: 14 fev. 2021.

BEN (2020). **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano-base 2019. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Brasília – DF e Ministério de Minas e Energia – MME, Brasília - DF. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 29 fev. de 2021.

BERIBER, Dalila; TALHA, Abdelaziz. MPPT techniques for PV systems. **International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**. p. 1437–1442, 2013.

BOUAKKAZ, M. S. et al. Fuzzy Logic based Adaptive Step Hill Climbing MPPT Algorithm for PV Energy Generation Systems. **2020 International Conference on Computing and Information Technology, ICCIT 2020**, p. 248–252, 2020.

CÂMARA, Carlos Fernando. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Redes Elétrica**. Monografia (especialista em Formas Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais. p. 68. 2011.

CARRARA, G; GARDELLA, S.; MARCHESONI, M.; SALUTARI, R.; SCIUTTO, G. **A new multilevel PWM method**: A theoretical analysis. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 7, pp. 497–505, 1992.

ENRIQUE, J. M. *et al.* Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. **Solar Energy**, 2007. v. 81, n. 1, p. 31–38.

FANG, G. J.; LIAN, K. L. **A maximum power point tracking method based on multiple perturb-and-observe method for overcoming solar partial shaded problems**. National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan, 2017. p. 68–73.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Ceará: UECE, 2002, p. 20-39. Disponível em <<http://www.ia.ufrj.br/ppgea/conteudo/conteudo-2012-1/ISF/Sandra/apostilaMetodologia.pdf>>. Acesso em 04 de ago. 2021.

JANNUZZI, Gilberto de Martino. VARELLA, Fabiana K. de O. M. GOMES, Rodolfo Dourado Maia. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: Panorama da atual legislação**. International Energy Initiative. 2009.

KIM, Seok-Min; LEE, June-Seok; LEE, Kyo-Beum. **Fault-Tolerant Strategy using Neutral-Shift Method for Cascaded Multilevel Inverters Based on Level-Shifted PWM**. 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia June 1-5, 2015 / 63 Convention Center, Seoul, Korea.

LEE, J. H.; BAE, H. S.; CHO, B. H. Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size. **EPE-PEMC 2006: 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings**, 2007. n. 1, p. 603–607.

LUZ SOLAR, disponível em <<https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em 17 de fev. de 2021.

MARANGONI, Filipe. **Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede**. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, Paraná. p. 103. 2012.

MORALES, David Sanz. **Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications**. Dissertação (Mestre em Ciência da Tecnologia) – Faculty of Electronics, Communications and Automation, Otaniemi, Finlândia. p. 82. 2010.

MCGRATH, Brendan Peter; HOLMES, Donald Grahame. **Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 49, n. 4, p. 858–867, 2002.

NABAE, Akira; TAKAHASHI, Isao; AKAGI, Hirofumi. **A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter**. Industry Applications, IEEE Transactions on, v. IA-17, n. 5, p. 518–523, 1981.

NUNES, Evandro Ailson de Freitas. **Análise de impactos na rede de distribuição de energia elétrica decorrentes da inserção de sistemas de geração fotovoltaicas**. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Rio Grande do Norte. Natal, Rio Grande do Norte. p. 38. 2017.

PAINES, Patrícia de Andrade; VIGNOCHI, Luciano; POSSAMAI, Osmar. Simulação de sistema fotovoltaico para o setor comercial. **Revista Exacta – Engenharia de Produção**. São Paulo, v.16, n.3, p. 17-30, 2018.

RODRÍGUEZ, José; BERNET, Steffen; STEIMER, Peter K.; LIZAMA, Ignacio E. **A survey on Neutral-Point-Clamped Inverters**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, [S. l.], v. 57, n. 7, p. 2219–2230, 2010.

RODRÍGUEZ, José; LAI, Jih Sheng; PENG, Fang Zheng. **Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, [S. l.], v. 49, n. 4, p. 724–738, 2002.

SOUSA, Karla Keitianne Ferreira de. **Controle da Tensão do Barramento CC pelo Inversor Monofásico Ponte Completa em um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. Trabalho de conclusão de curso (Engenheira Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Paraíba. p. 31. 2016.

SOUZA, Amaury de; ARISTONE, Flavio. Estudo da Eficiência Energética de Células Fotovoltaicas em Função da Radiação Solar no Centro-Oeste Brasileiro. **Interespaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**. v.2, nº.7. p. 115-128, 2016.

SILVA, Kennedy Ricardo da; ANDRADE, Abinadabe Silva. Análise de desempenho dos inversores de três níveis NPC e Ponte H. *In*: HOLZMANN, Henrique Ajuz (org.). **Projeto, Análise e Otimização na Área das Engenharias**. Ponta Grossa – PR: Atena, 2021. p. 8-19.

YOUSSEF, E. B. et al. New P&O MPPT algorithm for FPGA implementation. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. Golden, p. 2868-2873. 2010.

YU, Ting-Chung; LIN, Yu-Cheng. **A Study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems**. Longhwa University of Science and Technology, Taiwan, 2010.

Documento Digitalizado Restrito

Trabalho de Conclusão de Curso Final

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso Final
Assinado por: Kennedy Ricardo
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Restrito
Hipótese Legal: Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Kennedy Ricardo da Silva, ALUNO (201712030021) DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL - CAJAZEIRAS**, em 16/10/2021 08:53:01.

Este documento foi armazenado no SUAP em 16/10/2021. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 348745
Código de Autenticação: 1b55176f3a

