



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica  
Departamento de Engenharia Elétrica

Vinícius Freire Bezerra

## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Inversor trifásico multinível NPC com barramento CC pulsado**

Campina Grande - PB

Julho de 2019

Vinícius Freire Bezerra

## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Inversor trifásico multinível NPC com barramento CC pulsado**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Curso de Graduação de En-  
genharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Ba-  
charel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de energia.

Orientador: Montiê Alves Vitorino

Campina Grande - PB

Julho de 2019

Vinícius Freire Bezerra

## **Trabalho de Conclusão de Curso**

### **Inversor trifásico multinível NPC com barramento CC pulsado**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Curso de Graduação de En-  
genharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Ba-  
charel em Engenharia Elétrica.*

Trabalho aprovado em: Campina Grande - PB,     /     /

---

**Montiê Alves Vitorino, UFCG**  
Professor Orientador

---

**Nome do prof. avaliador, UFCG**  
Professor Avaliador

Campina Grande - PB

Julho de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais, que me apoiaram e deram total suporte na minha formação.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir alcançar esse objetivo.

Aos meus pais, Márcio e Sayonarah, que sempre me apoiaram em tudo em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao professor Montiê Vitorino pela orientação deste trabalho, em que seus conhecimentos transmitidos ao longo do curso foram indispensáveis para minha vida acadêmica.

Agradeço aos amigos e colegas que estiveram presentes nos mais diversos momentos da minha graduação: Breno, Caio, Camila, Leo, Marianne, Mário, Mateus, Samuel, Telmo, Thiago, Wesley, Yan, Zé Wesley e tantos outros. Aprendi bastante com todos.

Por fim, agradeço aos funcionários do DEE, em especial a Adail e Tchai, que sempre estiveram acessíveis e dispostos a acolher o corpo discente qualquer que fosse o problema.

“A vida é pra quem  
topa qualquer  
parada e não  
pra quem para  
em qualquer topada”

Anônimo

# Resumo

O capacitor eletrolítico, componente eletrônico altamente utilizado em diversas aplicações industriais, possui algumas limitações como: vida útil estimada em 5000 horas, falhas em seu processo de fabricação e problemas que afetam sua resistência série equivalente, que pode diminuir sua capacitância. Com isso, é interessante que inversores não utilizem capacitores, de modo a prolongar a sua vida útil, podendo ser conectados a sistemas fotovoltaicos, que possuem vida útil estimada de 25 anos. Desse modo, o presente trabalho faz um estudo de um inversor trifásico multinível com o barramento CC pulsado e diodo grampeado. O inversor também apresenta uma estratégia de modulação não convencional que diminui as perdas por chaveamento.

**Palavras-chave:** Inversor trifásico, Capacitor Eletrolítico, Barramento Pulsado, Estratégia de Modulação.

# Abstract

The electrolytic capacitor, an electronic component widely used in various industrial applications, has some limitations such as: estimated life in 5000 hours, failures in its manufacturing process and problems that affect its equivalent series resistance can reduce its capacitance. Thus, it is interesting that inverters do not use capacitors, in order to extend their useful life, and can be connected to photovoltaic systems, which have an estimated useful life of 25 years. Thus, the present work makes a study of a three-phase multilevel inverter with pulsating DC-link and clamped diode. The inverter also presents an unconventional modulation strategy that reduces losses by switching.

**Keywords:** Three Phase Inverter, Electrolytic Capacitor, Pulsating DC-Link, Modulation Strategy.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Simbologia do diodo. . . . .	3
Figura 2 – Curva $i-v$ característica. . . . .	4
Figura 3 – SCR . . . . .	4
Figura 4 – Tipos de transistores bipolares de junção. . . . .	5
Figura 5 – MOSFET . . . . .	5
Figura 6 – Características do MOSFET . . . . .	6
Figura 7 – IGBT . . . . .	6
Figura 8 – Modulação bipolar. . . . .	7
Figura 9 – Modulação unipolar. . . . .	8
Figura 10 – Modelo do transformador ideal . . . . .	9
Figura 11 – Esquemático do optoacoplador 6N137 . . . . .	10
Figura 12 – Simbologia de um capacitor. . . . .	11
Figura 13 – Capacitor Eletrolítico . . . . .	12
Figura 14 – Modelo do capacitor real . . . . .	13
Figura 15 – Medidor de ESR. . . . .	14
Figura 16 – Circuito <i>snubber</i> RC . . . . .	15
Figura 17 – Exemplo de <i>snubber</i> RCD num conversor <i>flyback</i> . . . . .	15
Figura 18 – Inversor meia ponte. . . . .	16
Figura 19 – Inversor ponte completa. . . . .	17
Figura 20 – Inversor trifásico. . . . .	17
Figura 21 – Pulsos que ligam as chaves. . . . .	18
Figura 22 – Tipos de inversores. . . . .	19
Figura 23 – Inversor proposto. . . . .	20
Figura 24 – Tipos de conversores CC/CC pulsantes. . . . .	21
Figura 25 – Estratégia de comutação para o inversor. . . . .	21
Figura 26 – Chaveamento do inversor trifásico. . . . .	22
Figura 27 – Circuitos <i>snubbers</i> . . . . .	24
Figura 28 – Gráfico da comparação da lógica do <i>snubber</i> . . . . .	25
Figura 29 – Circuito de acionamento dos <i>snubbers</i> . . . . .	25
Figura 30 – Tensões de fase do inversor. . . . .	26
Figura 31 – Tensões de linha do inversor. . . . .	26
Figura 32 – Correntes na carga. . . . .	27

# Lista de abreviaturas e siglas

AMPOP	Amplificador Operacional
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CC/CA	Corrente Contínua - Corrente Alternada
CC/CC	Corrente Contínua - Corrente Contínua
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
FMM	Força Magnetomotriz
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
HFT	<i>High Frequency Transformer</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LED	<i>Light Emissor Diode</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NPC	<i>Neutral Point Clamped</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SCR	<i>Sillicon Controlled Rectifier</i>
SPWM	<i>Scalar Pulse Width Modulation</i>
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
THD	<i>Total Harmonic Distorcion</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Tipos de semicondutores</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Modulação PWM</b>	<b>6</b>
2.2.1	Bipolar	7
2.2.2	Unipolar	8
<b>2.3</b>	<b>Isolação de circuitos</b>	<b>8</b>
2.3.1	Transformadores	8
2.3.2	Optoacopladores	9
<b>2.4</b>	<b>Capacitor eletrolítico</b>	<b>10</b>
<b>2.5</b>	<b>Circuito snubber</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Inversores</b>	<b>16</b>
2.6.1	Inversor Meia Ponte	16
2.6.2	Inversor Ponte Completa	16
2.6.3	Inversor trifásico	17
<b>2.7</b>	<b><i>Total Harmonic Distortion (THD)</i></b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>INVERSOR TRIFÁSICO MULTIÍVEL NPC SEM CAPACITOR NO BARRAMENTO CC</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Inversor proposto</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Conversor CC/CC pulsado</b>	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Inversor trifásico</b>	<b>21</b>
<b>3.4</b>	<b>Circuito snubber</b>	<b>24</b>
<b>3.5</b>	<b>Resultados e discussões</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>28</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>29</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os conversores CC/CA, conhecidos como inversores, têm a função de converter corrente/tensão contínua em corrente/tensão alternada. São utilizados em ocasiões em que se pretende obter tensão alternada quando se dispõe apenas de tensão contínua. Inversores são utilizados em diversas aplicações como: controle de velocidade de motores, fonte de alimentação ininterrupta (*no-break*), transmissão em alta tensão CC entre outros (Rashid et al. (1999), Hart (2016)).

Dentre as topologias encontradas na literatura sobre inversores há a configuração com barramento CC pulsado em alta frequência sem a utilização de um capacitor eletrolítico para aplicações trifásicas. A vantagem ao se utilizar essa configuração é que a não inserção do capacitor eletrolítico no barramento CC aumenta demasiadamente a confiabilidade do inversor, uma vez que esse tipo de capacitor apresenta baixa vida útil em comparação com outros componentes, impossibilitando aplicações como sistemas fotovoltaicos (PV) por exemplo, uma vez que as placas possuem vida útil em média de 25 anos (Vitorino et al. (2017), Alves (2018)). Outra vantagem de se utilizar a topologia com barramento pulsado é o fato de que a alta frequência de chaveamento faz-se necessário o uso de transformadores de alta frequência (HFT), cujo sua grande vantagem é a redução do peso e das dimensões, bem como a alta densidade de potência do sistema.

Para garantir ainda mais eficiência e qualidade de energia, um aspecto importante a ser observado nas tensões de saída dos inversores é a presença de harmônicos. Idealmente, a saída de um inversor deveria apresentar formato senoidal, no entanto, na prática observa-se que há presença de harmônicos devido ao chaveamento e que o sinal é não-senoidal. Em contrapartida, para aplicações de baixa e média potência, são aceitáveis sinais de tensão quadrado e para aplicações de alta potência faz-se necessário uma menor distorção e portanto um sinal mais fidedigno a uma senoide (Rashid et al. (1999)).

Nos últimos anos, cada vez mais a Eletrônica de Potência veio evoluindo para mitigar as adversidades que ocorrem durante o processamento da energia elétrica garantindo, assim, alta eficiência e qualidade para suas aplicações. Dentre os principais avanços pode-se citar a evolução nos dispositivos semicondutores (diodos, GTOs, MOSFETs), em que uma das principais características a serem observadas é a maior frequência de chaveamento em sua operação. Outro aspecto que pode ser observado é a utilização de técnicas de *soft switching*, para diminuir as perdas por chaveamento, o que impacta positivamente no rendimento do conversor, bem como técnicas de modulação para o acionamento das chaves, que podem variar desde as mais simples a técnicas de acionamento bem mais complexas (Hart (2016)).

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo na grande área da eletrônica de potência aprendidos no ambiente acadêmico, mais precisamente acerca de um inversor trifásico multinível NPC de alta frequência com acoplamento CC sem capacitor eletrolítico.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), localizado na UFCG. Abaixo estão listados os objetivos específicos do trabalho:

- Estudar sobre a topologia de inversor escolhida;
- Validar os conceitos sobre eletrônica de potência;
- Implementar via simulação no PSIM o projeto do inversor;
- Verificar os resultados e analisar os pontos positivos e negativos frente outras topologias.

## 1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 4 capítulos e estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução do tema e justificativa da escolha do mesmo;
- Capítulo 2: Fundamentação teórica que servirá de embasamento para o entendimento do trabalho;
- Capítulo 3: Desenvolvimento sobre a topologia do inversor escolhido, bem como a apresentação de gráficos com os resultados simulados;
- Capítulo 4: Conclusão geral sobre o trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento deste trabalho, faz-se necessário o conhecimento sobre Eletrônica de Potência, mais precisamente em inversores, seu princípio de funcionamento e algumas topologias básicas. Ter algum conhecimento sobre o software de simulação PSIM também é importante.

### 2.1 Tipos de semicondutores

Toda a conversão e controle de fluxo de energia que é utilizado hoje em dia para quaisquer aplicações envolvendo eletrônica de potência se dá graças aos semicondutores. Os semicondutores, nesse aspecto, funcionam como chaves que, ora estão em estado de condução, ora em estado de bloqueio.

Para que esse chaveamento seja realizado, deve-se controlar o estado da chave. Atualmente existem 3 tipos de formas de classificação das chaves conforme o nível de controlabilidade, descritos abaixo:

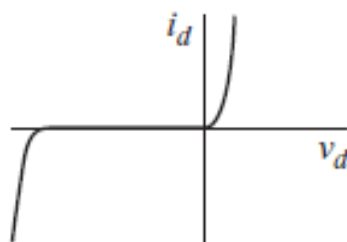
- Diodos

Os diodos apresentam a característica de serem não controlados, ou seja, o seu disparo e bloqueio são determinados pelo comportamento do circuito a que está ligado, dessa forma diz-se que o diodo está diretamente polarizado quando a tensão do ânodo é positiva em relação ao cátodo e o mesmo entra em modo de condução; de forma contrária, o diodo está reversamente polarizado e funciona como um circuito aberto. A Figura 1 ilustra o diodo e seus dois terminais enquanto a Figura 2 apresenta a curva  $i-v$ . Percebe-se que quando a tensão sobre o diodo diretamente polarizado supera sua queda de tensão, entra em modo de condução, funcionando como curto circuito.

Figura 1 – Simbologia do diodo.



Fonte: Própria do autor.

Figura 2 – Curva  $i$ - $v$  característica.

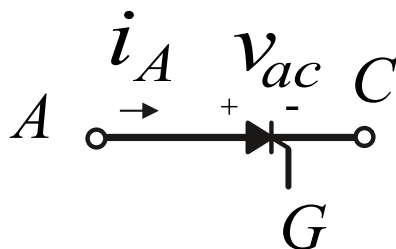
Fonte: Hart (2016).

Dentre alguns tipos de diodos utilizados destacam-se: diodo Schottky: que apresentam queda de tensão no sentido direto praticamente nula (alguns microvolts); e diodos de alta frequência, ou diodos de recuperação rápida: utilizados em circuitos de alta frequência.

- Tiristores

Os tiristores apresentam a característica de serem semi-controlados, ou seja, existe o controle sobre o seu disparo porém não sobre o seu bloqueio. Um tiristor é um componente que contém três terminais: ânodo, cátodo e um gatilho. Diferentemente do diodo, o tiristor, ou SCR (*Silicon Controlled Rectifier* - Retificador Controlado de Silício), conduz quando uma corrente passa através do terminal do gatilho quando o terminal do ânodo está com um potencial mais elevado que o cátodo. Uma vez no modo de condução, seu bloqueio se dá quando a corrente sobre o SCR se manter acima da corrente de retenção, que é aproximadamente zero. A figura 3 mostra o tiristor e seus terminais.

Figura 3 – SCR



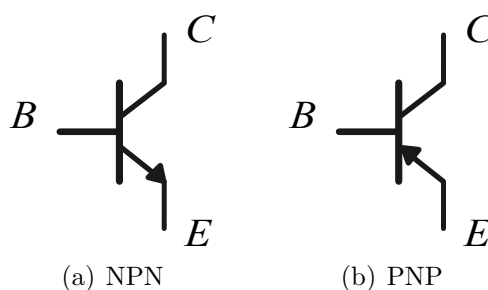
Fonte: Própria do autor.

- Chaves controladas

As chaves controladas apresentam a característica de se ter domínio sobre seu gatilho e bloqueio. Como exemplo dessas chaves podem ser citadas: TBJs, MOSFETs, GTOs e IGBTs. Todas elas podem ser ligadas/desligadas a partir de um sinal de controle.

O Transistor Bipolar de Junção (TBJ), possui três terminais: coletor, base e emisor. Seu disparo pode ser feito fornecendo uma corrente na base  $I_b$  para que o o mesmo entre em saturação. Quando a corrente de base  $I_b$  for zero, o transistor funcionará como uma chave aberta. Dois tipos de TBJ são mostrados nas Figuras 5(a) e 5(b).

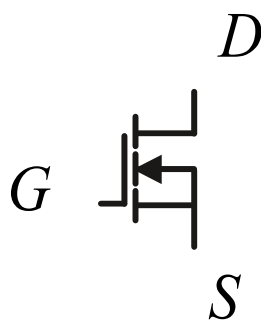
Figura 4 – Tipos de transistores bipolares de junção.



Fonte: Própria do autor.

O Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo metal - óxido - semiconductor (MOSFET), ilustrado na Figura 5, é, de longe, o tipo mais comum de transistores de campo em circuitos tanto analógicos como digitais. Esse transistor possui três terminais: dreno, gate e source.

Figura 5 – MOSFET

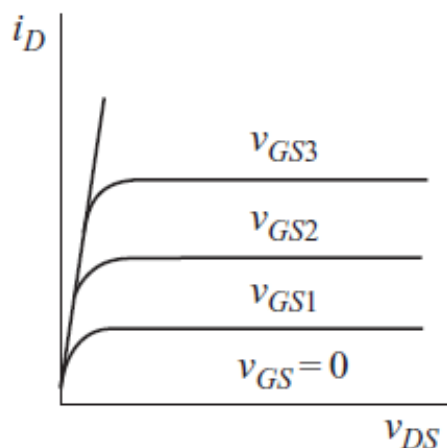


Fonte: Própria do autor.

Seu disparo é realizado quando uma tensão *gate-source* é imposta sobre o dispositivo. No estágio em que a chave está ligada, a variação de tensão  $V_{ds}$  é linearmente proporcional a variação em  $I_d$ , como mostra a Figura 6.



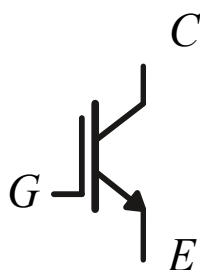
Figura 6 – Características do MOSFET



Fonte: Hart (2016).

O *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) é uma conexão integrada de um MOSFET e um TBJ. Esse dispositivo reúne a facilidade de disparo do MOSFET e as baixas perdas de condução do TBJ. O uso de IGBTs já substituiu o uso de TBJs em várias aplicações. Seu símbolo é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – IGBT



Fonte: Própria do autor.

## 2.2 Modulação PWM

A modulação por largura de pulso ou *Pulse Width Modulation* (PWM), é uma técnica altamente utilizada hoje em dia para realizar controle de velocidade de motores, controle de luminosidade, controle de servo motores bem como utilização em fontes chaveadas. A técnica de PWM é utilizada para realizar o acionamento das chaves descritas na seção anterior.

Nessa técnica utiliza-se um sinal portadora em alta frequência (sinal triangular) e um sinal modulante. É realizado a comparação dos dois sinais por meio de um amplificador

operacional (AMPOP) e o sinal de saída é proporcional a que sinal está maior em relação ao outro. Dessa forma pode ser definido o conceito de ciclo de trabalho ou *duty cycle*.

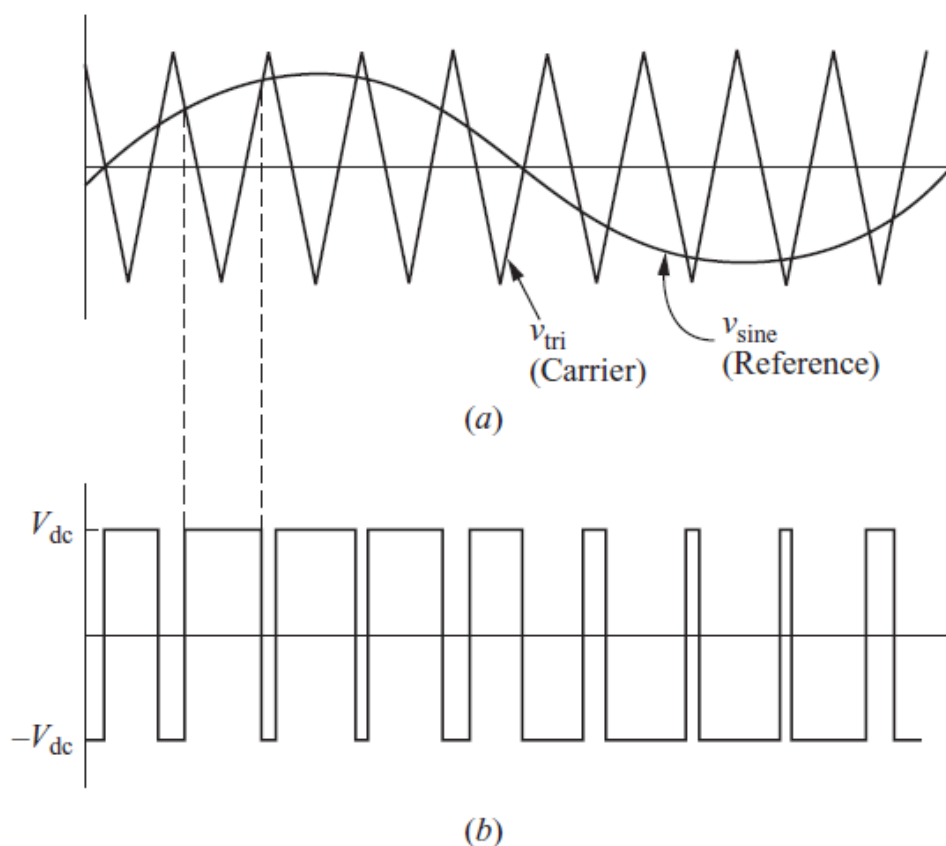
No entanto, para realizar o acionamento das chaves de um inversor, algumas formas de modulação são detalhadas nas subseções abaixo.

### 2.2.1 Bipolar

O PWM com chaveamento Bipolar é mostrado na Figura 8. Nesse esquema o sinal do seno é comparado com a forma de onda triangular e a saída são pulsos que variam entre  $+V_{dc}$  e  $0$ , o que justifica o nome bipolar. A Figura 8 mostra a comparação que é realizada e a saída dessa modulação.

Figura 8 – Modulação bipolar.

(a) Sinal seno de referência e sinal portadora; (b) Sinal de saída.



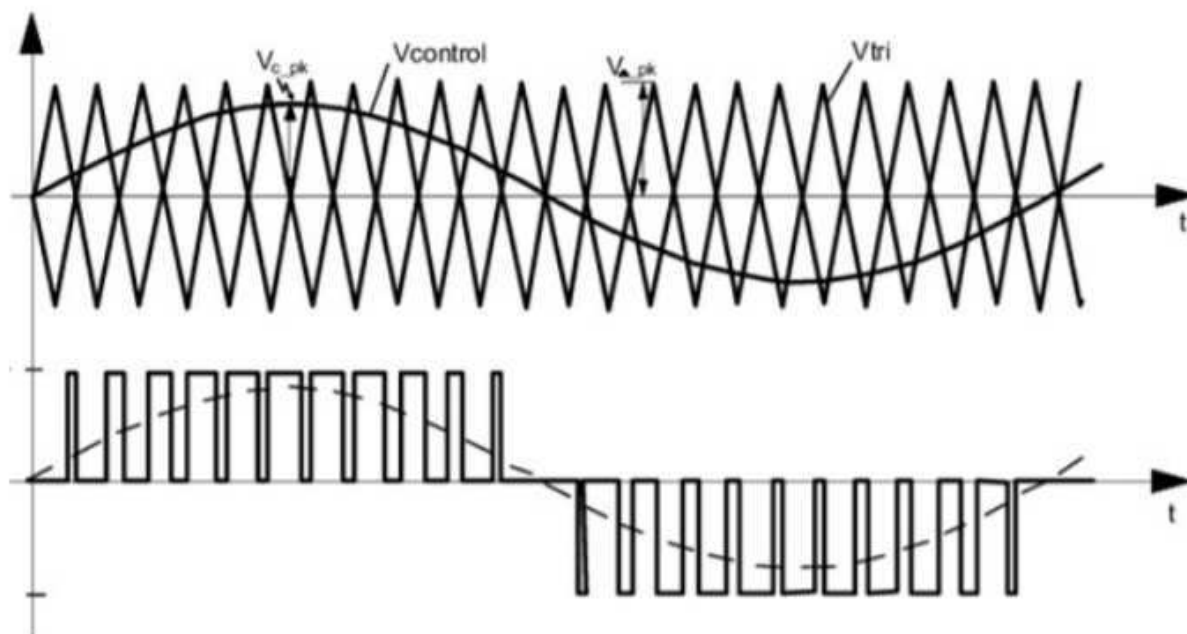
Fonte: Hart (2016).

O acionamento de um inversor por essa modulação se dá conectando o sinal de saída nas chaves opostas diagonalmente e então o sinal invertido nas outras duas chaves opostas diagonalmente.

## 2.2.2 Unipolar

O PWM com chaveamento Unipolar é mostrado na figura 9.

Figura 9 – Modulação unipolar.



Fonte: BASCOPE (2011).

Nesse esquema o sinal triangular é comparado com  $+V_s$  e  $-V_s$ , gerando três valores de saída:  $+V_{cc}$ , 0 e  $-V_{cc}$ , justificando o nome unipolar.

## 2.3 Isolação de circuitos

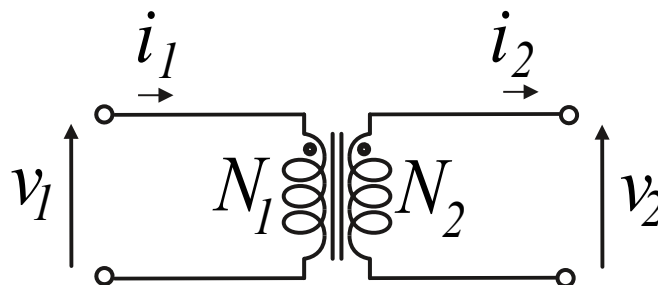
### 2.3.1 Transformadores

Um transformador é um componente que consiste geralmente de dois enrolamentos (podendo ser mais) acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se o enrolamento dito primário foi conectado a uma fonte de tensão alternada, um fluxo alternado será produzido e sua amplitude dependerá da tensão do primário, frequência e número de espiras. Esse fluxo estabelece um enlace com enrolamento secundário, induzindo uma tensão cujo valor depende do número de espiras do secundário. Seguindo essa lógica, pode-se obter qualquer relação de transformação de tensão apenas ajustando-se as relações entre o número de espiras.

A Figura 10 mostra o modelo do transformador ideal. Nesse modelo considera-se que as resistências dos enrolamentos são desprezíveis, todo o fluxo está confinado ao núcleo enlaçando ambos os enrolamentos, não há perdas no núcleo e a permeabilidade do

núcleo é tão alta que apenas uma força magnetomotriz (FMM) de excitação insignificante é requerida para criar o fluxo (Umans (2014)).

Figura 10 – Modelo do transformador ideal



Fonte: Própria do autor.

Para o modelo ideal, pela equação 2.1, as tensões são transformadas pela razão direta das espiras de seus enrolamentos.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1)$$

Levando em consideração que não há perdas e a potência de entrada do transformador é igual a potência de saída, é possível obter a relação entre as impedâncias do primário e secundário:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.2)$$

### 2.3.2 Optoacopladores

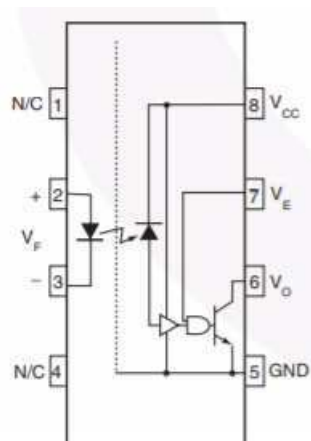
Em aplicações de eletrônica de potência, geralmente é fornecido isolamento entre o inversor e os circuitos de potência. Os circuitos de acionamento (*drive*) funcionam com baixos níveis de potência, pois seu trabalho é apenas acionar o dispositivo. Por outro lado, os circuitos de energia operam em altos níveis de potência. Se o dispositivo for danificado, os circuitos de disparo são expostos a altos níveis de energia e, portanto, ficam danificados. Para evitar isso, é fornecido isolamento entre o inversor e os circuitos de energia.

Para isso, comumente são utilizados optoacopladores para realizar esse acionamento e isolamento. Optoacopladores são circuitos encapsulados que possuem um LED nos terminais de entrada que realiza a transmissão de sinal para um fototransistor no outro terminal, garantindo total isolamento de ambas as partes do circuito. Um exemplo comum desse componente é o 6N137 mostrado na Figura 11.

Esse optoacoplador possui algumas aplicações como

Os pinos apresentam a seguinte distribuição:

Figura 11 – Esquemático do optoacoplador 6N137



Fonte: Datasheet 6N137.

Entrada	<i>Enable</i>	Saída
1	1	0
0	1	1
1	0	1
0	0	1
1	NC	0
0	NC	1

Tabela 1

Pinos 1 e 4 não são conectados;

Pinos 2 e 3 receberão o sinal de entrada enquanto que o pino 6 retornará o sinal de saída;

Pino 8 receberá a alimentação  $V_{cc}$ ;

Pino 5 será o *ground*;

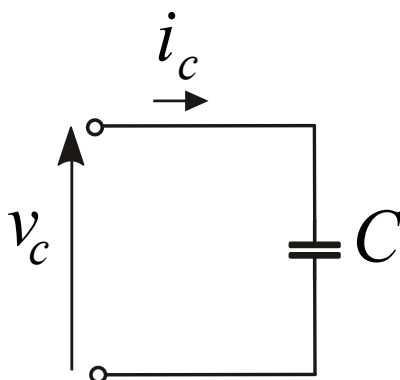
Pino 7 será o sinal de *enable*, que determinará a lógica da saída a partir da entrada, que pode ser evidenciado na Tabela 1 acima retirada do *datasheet* do optoacoplador 6N137:

Para garantir seu correto funcionamento um capacitor de  $0.1 \mu\text{F}$  deve ser conectado entre os pinos 8 e 5.

## 2.4 Capacitor eletrolítico

O capacitor, mostrado na Figura 12, é um componente eletrônico que tem a função de armazenar energia em forma de campo elétrico, sendo assim sendo definido como componente reativo.

Figura 12 – Simbologia de um capacitor.



Fonte: Própria do autor.

Segundo Nilsson e Riedel (2008), pela simbologia do capacitor, percebe-se que os condutores estão separados por um material dielétrico. Então, embora uma tensão elétrica não consiga movimentar uma carga pelo dielétrico, ela pode deslocar a carga através dele. Esse efeito recebe o nome de corrente de deslocamento. Num capacitor, a corrente é proporcional à taxa de variação temporal da tensão no capacitor, expresso pela equação abaixo:

$$i_c(t) = C \frac{dv}{dt} \quad (2.3)$$

Pela equação acima duas observações são concluídas: a tensão nos terminais de um capacitor não pode variar bruscamente; se a tensão nos seus terminais for constante, a corrente que circula através dele é nula.

A partir da equação (2.3) pode-se obter a equação que expressa o comportamento matemática da tensão no capacitor.

$$v_c(t) = v_c(t_1) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_c(\xi) d\xi \quad (2.4)$$

No que tange as aplicações em eletrônica de potência, elementos reativos como indutor e capacitor possuem algumas características particulares, como:

$$v(t + T) = v(t) \quad (2.5)$$

$$i(t + T) = i(t) \quad (2.6)$$

Ou seja, as formas de onda de tensão e corrente se repetem com um período de tempo  $T$ . Com isso, substituindo  $t$  por  $t_1 + T$  e reconhecendo que  $v_c(t_1 + T) = v_c(t_1)$ ,

então:

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} i_C d\xi = 0 \quad (2.7)$$

Com isso, no regime permanente, a corrente média de um capacitor deve ser zero.

Atualmente existem vários tipos de capacitores, geralmente classificados em relação ao seu material dielétrico, em que seu uso varia conforme a sua aplicação. Dentre os mais utilizados, destaca-se o capacitor eletrolítico, mostrado na figura 13.

Figura 13 – Capacitor Eletrolítico



Fonte: <https://www.te1.com.br/2010/10/o-que-e-esr-de-um-capacitor/>.

O dielétrico desse capacitor apresenta espessura bastante reduzida comparado a outros tipos, além de que internamente é composto por folhas de alumínio separadas por uma camada de óxido de alumínio, enroladas em um eletrólito líquido. Diferentemente de um capacitor cerâmico, o eletrolítico possui polaridade, geralmente indicada, em que caso ele seja polarizado incorretamente pode chegar a explodir, liberando gases. Esse tipo de capacitor é encontrado em fontes de tensões e é até usado como filtro de ruídos.

Além dos tipos de capacitores existem também parâmetros que precisam ser levados em consideração ao se utilizar um, são eles enumerados abaixo:

**Capacitância nominal (Cn)** é a capacitância para qual o capacitor foi projetado. Imprecisões podem ocorrer em relação ao valor de projeto.

**Tolerância** é a faixa de variação para o qual a capacitância nominal pode se encontrar. Pode ser expressa em porcentagem ou numa faixa de capacitância da nominal.

**Tensão nominal (vn)** é a tensão máxima que pode ser imposta sobre um capacitor sem que haja danos.

**Tensão de operação (Vop)** é a tensão que o capacitor opera sem que haja redução da sua vida útil.

**Tensão de pico (vp)** é a máxima tensão que pode ser imposta sobre um capacitor por curtos períodos de tempo, até 5 vezes por minuto, durante 1 hora.

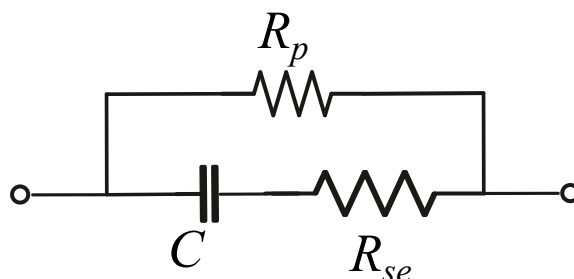
**Resistância paralela ( $R_p$ )** é a resistência existente no modelo simplificado de um capacitor real. Sua existência pode ser comprovada pelo fato de que, uma vez carregado o capacitor, sua carga não é conservada indefinidamente, sendo escoada pelo dielétrico.

**Resistância Série Equivalente (ESR)** é a resistência formada pela resistência das placas, do contato dos terminais com as placas e da resistência dos terminais do capacitor. A Figura 14 ilustra o modelo simplificado de um capacitor real.

**Corrente de fuga** é o fluxo de corrente que percorre o dielétrico. É desejado que esse valor seja o mais baixo possível.

**Características de temperatura** : todo capacitor funciona numa determinada temperatura de operação que geralmente é determinada pelo fabricante. A mudança de temperatura num capacitor influencia diretamente na sua capacitância, em que um aumento na temperatura causa um aumento na capacitância.

Figura 14 – Modelo do capacitor real



Fonte: Própria do autor.

Dentre os parâmetros apresentados, a ESR é um fator de importante observação visto que é comumente a causa de falha em circuitos eletrônicos que empregam capacitores. A ESR varia de acordo com o tipo de capacitor, a frequência e a temperatura do componente, além de mudar conforme o envelhecimento do componente, pois a solução eletrolítica evapora ao longo do tempo, aumentando a resistência interna.

Essa resistência pode afetar circuitos de radiofrequência ou de baixa potência, em que eficiência e tempo de vida útil podem ser comprometidos. Os capacitores mais afetados pela ESR são os eletrolíticos de alumínio, podendo chegar a vários ohms de resistência. A ESR tende a aumentar com o tempo de uso, o que pode gerar sérios problemas pois pode fazer com que um circuito perca sua funcionalidade ou até que o componente se danifique em algum momento.

Entre os circuitos que utilizam capacitores, os que trabalham com altas frequências e/ou altas correntes são muito afetados com a ESR. Dentre os problemas pode-se citar:



- Aumento de temperatura no componente causado pelo calor dissipado, afetando sua operação, vida útil e causando danos no capacitor;
- Aumento de queda de tensão no capacitor, reduzindo a quantidade de energia no circuito.

A medição da ESR de um capacitor pode ser feito utilizando um instrumento chamado ESR Meter (medidor de ESR), que realiza essa medição de forma precisa e com baixo custo. A Figura 15 mostra um medidor de ESR.

Figura 15 – Medidor de ESR.



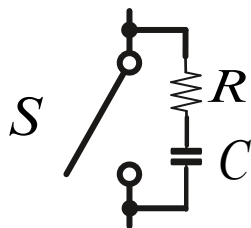
Fonte: <http://www.bosontreinamentos.com.br/electronica/curso-de-eletronica/o-que-e-esr-resistencia-em-serie-equivalente-de-um-capacitor/>.

A medição da ESR é algo a ser levado em consideração caso o projeto seja de alta precisão. Alguns fabricantes já trazem essa especificação para determinadas frequências.

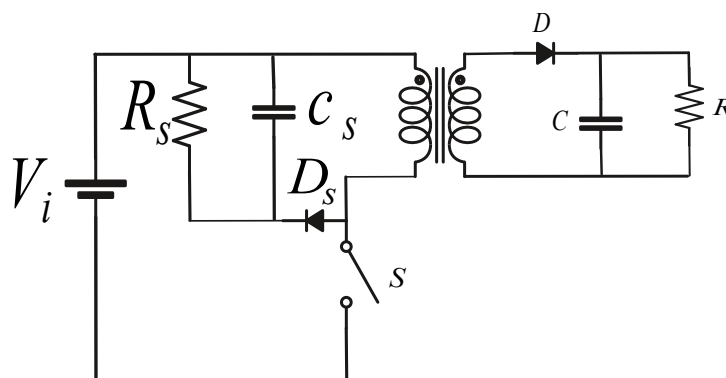
## 2.5 Circuito snubber

Em circuitos de potência, *spikes* (estresses) de tensão podem ser gerados, principalmente durante um chaveamento. As chaves, MOSFETs por exemplo, frequentemente são expostas a stresses de tensão na sua comutação. Para que esse *spike* seja reduzido é necessário um dispositivo de supressão desse pico de tensão. A esse circuito de proteção dá-se o nome circuito *snubber*.

Um *snubber* pode ser classificado em passivo ou ativo. Os passivos se restringem ao uso de resistores, capacitores, indutores e diodos e servem para controlar a tensão ou corrente. Algumas topologias desses circuitos muito comuns são o resistor-capacitor (RC) e resistor-capacitor-diodo (RCD) mostrados nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Circuito *snubber* RC

Fonte: Própria do autor.

Figura 17 – Exemplo de *snubber* RCD num conversor *flyback*.

Fonte: Própria do autor.

Os *snubbers* RC são mais utilizados em baixa e média potência. Em aplicações de alta potência, esses snubbers exibem perdas de energia excessivas, tornando-os inadequados para tais aplicações. Em comparação, os *snubbers* RCD são adequados para aplicações de média/alta corrente. Eles são comumente usados para proteger vários dispositivos de comutação, incluindo módulos IGBT. Em aplicações de alta corrente, os amortecedores RC são usados principalmente para amortecimento secundário.

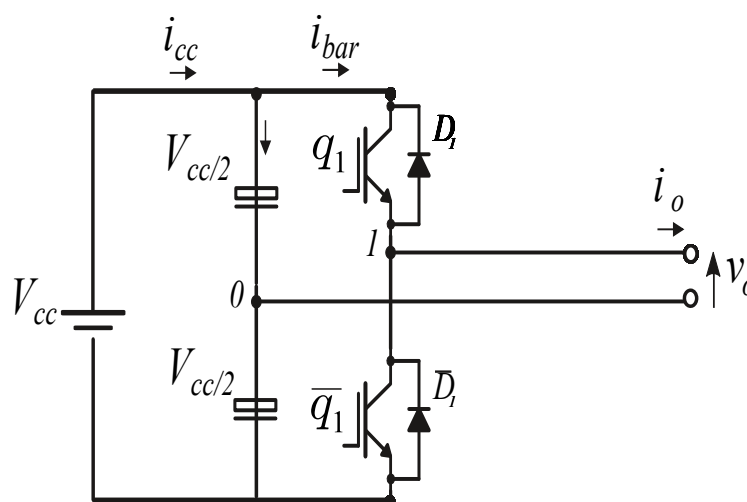
Com relação aos capacitores *snubbers*, os mesmos estão sujeitos a altos valores de  $\frac{dV}{dt}$  e valores extremamente altos de pico. Esses circuitos exigem capacitores que possam suportar picos de corrente com valores altos de pico e rms. As características dos capacitores de filme de polipropileno os tornam adequados para aplicações de amortecimento.

## 2.6 Inversores

### 2.6.1 Inversor Meia Ponte

A Figura 18 ilustra a configuração de um inversor meia ponte.

Figura 18 – Inversor meia ponte.



Fonte: Própria do autor.

Na entrada desse inversor, dois capacitores são ligados no barramento CC de modo que cada um possua tensão de  $\frac{V_{cc}}{2}$ . Quando  $q_1$  está conduzindo, a tensão na carga é de  $-\frac{V_{cc}}{2}$ . Quando  $\bar{q}_1$  está conduzindo, a tensão na carga é de  $+\frac{V_{cc}}{2}$ .

A tensão sobre as chaves abertas é duas vezes a tensão na chaves, ou seja,  $V_{cc}$ .

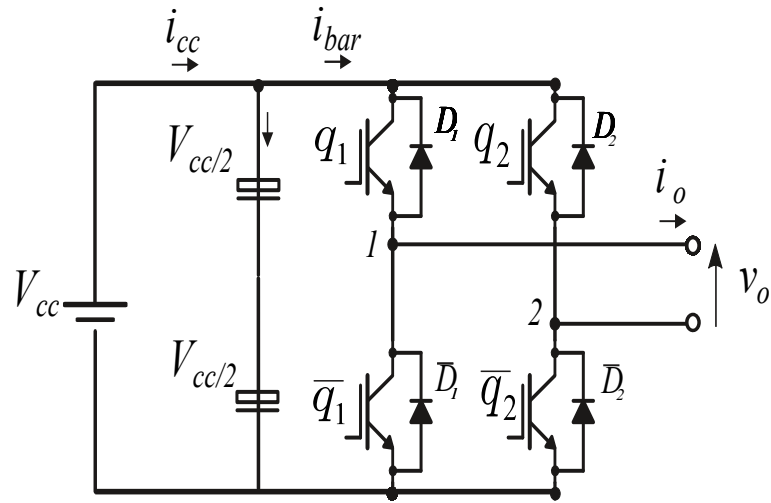
### 2.6.2 Inversor Ponte Completa

A Figura 19 ilustra a configuração de um inversor ponte completa.

Esse inversor é formado por dois braços de chaves. Esse arranjo é preferível para aplicações com maior potência.

Para uma mesma entrada CC, a máxima tensão de saída desse inversor é duas vezes a obtida pelo meia ponte. Isso implica que para uma mesma potência, a corrente de saída e as corrente nas chaves são metade daquelas para o inversor meia ponte.

Figura 19 – Inversor ponte completa.

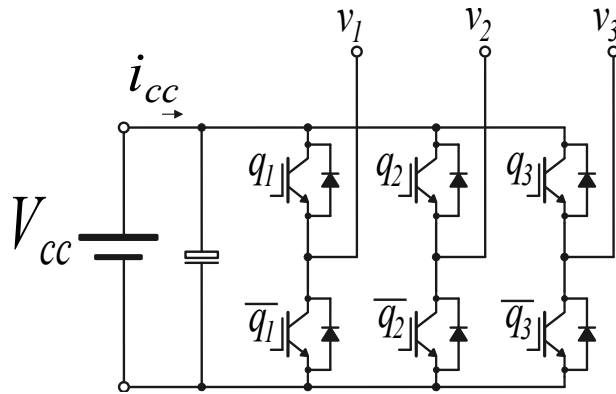


Fonte: Própria do autor.

### 2.6.3 Inversor trifásico

O inversor da Figura 20 produz uma saída alternada trifásica a partir de uma entrada CC.

Figura 20 – Inversor trifásico.



Fonte: Própria do autor.

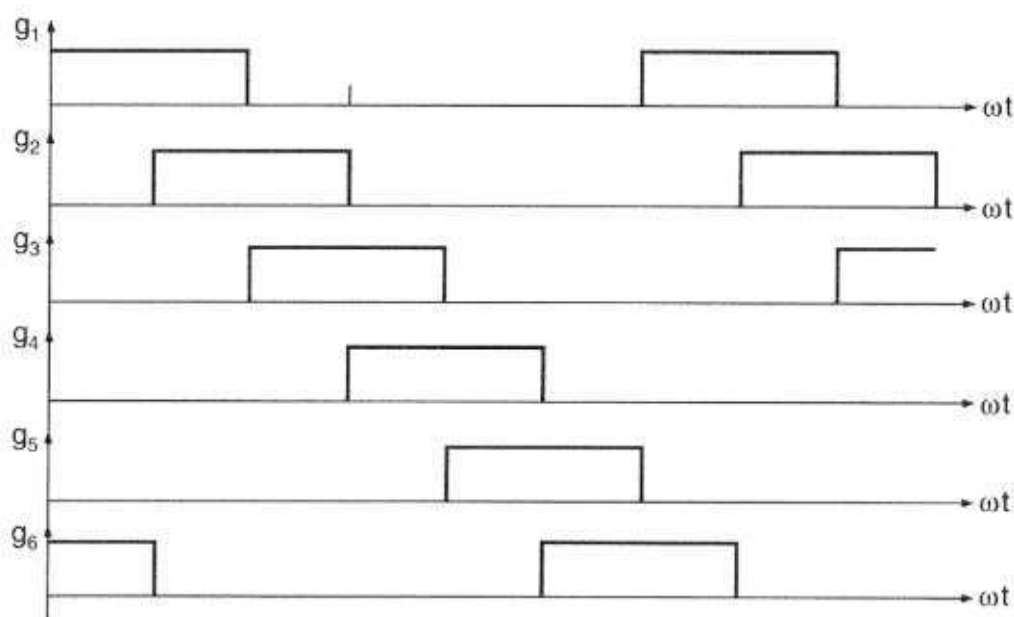
Inversores trifásicos são comumente utilizados para acionamento de motores CA e para alimentar cargas trifásicas. Sua saída gera sinais alternados defasados de 120°.

O esquema de chaveamento utilizado é formado por 3 braços e seis chaves ao total, em que em cada braço as chaves são complementares, ou seja, defasadas de 180°, como mostrado na Figura 21.

Percebe-se pela figura que somente duas chaves conduzem por vez, durante um período de chaveamento, para gerar uma saída entre +V<sub>cc</sub> e 0.

tor

Figura 21 – Pulsos que ligam as chaves.



Fonte: Rashid et al. (1999).

## 2.7 Total Harmonic Distortion (THD)

O objetivo geral de um circuito inversor é que sua saída seja a mais fidedigna possível a uma senoide. No entanto, harmônicos podem estar presente no sinal de saída, provocando uma distorção no sinal, que pode gerar mau funcionamento na carga em que o inversor estiver conectado. Para realizar o controle sobre esses harmônicos, um parâmetro é avaliado, THD: razão entre o valor rms de todos os termos não fundamentais de frequência para o valor rms da frequência fundamental. A THD pode ser calculada da seguinte forma:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} V_{n,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} V_{n,rms}^2}}{V_{1,rms}} \quad (2.8)$$

A THD é aplicada geralmente a situações em que a componente CC é zero. Nesses casos o cálculo se dá conforme a equação 2.9:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} V_n^2}}{V_1} \quad (2.9)$$

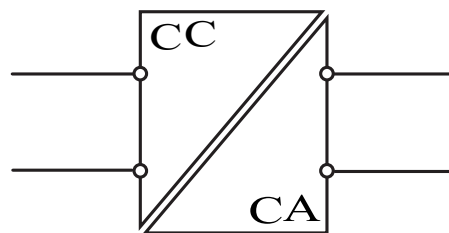
A definição da THD é baseada na série de Fourier e é utilizado como parâmetro de controle de qualidade de inversores.

### 3 Inversor trifásico multiível NPC sem capacitor no barramento CC

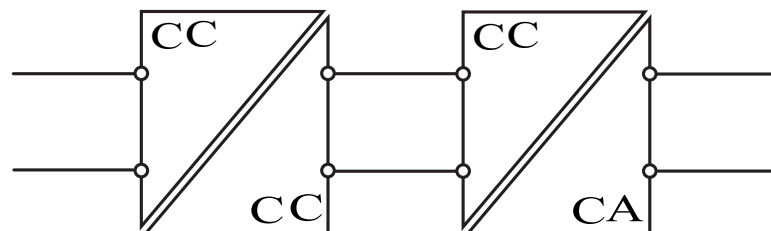
#### 3.1 Inversor proposto

Os inversores podem ser de um ou dois estágios. Os inversores de um estágio são robustos e possuem alta eficiência devido ao número reduzido de componentes utilizados. Entretanto, no caso de um inversor sem transformador, a tensão CC na entrada deve ter um valor mínimo relativamente elevado de modo a produzir a tensão CA desejada. A inclusão de um transformador de alta frequência cria um isolamento galvânico entre os lados de corrente contínua e alternada. A Figura 22 ilustra a representação desses dois tipos de inversores.

Figura 22 – Tipos de inversores.



(a) Inversor de um estágio

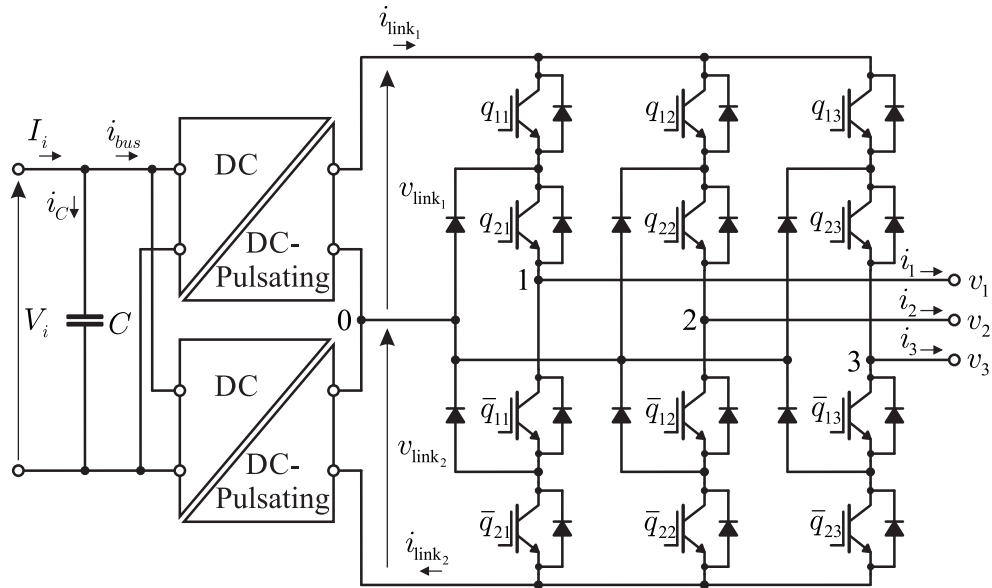


(b) Inversor de dois estágios

Fonte: Própria do autor.

Para o inversor proposto nesse trabalho, foi utilizado um de dois estágios, multi-  
nível e com diodo grampeado. Esse circuito pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Inversor proposto.



Fonte: Dutra et al. (2018).

### 3.2 Conversor CC/CC pulsado

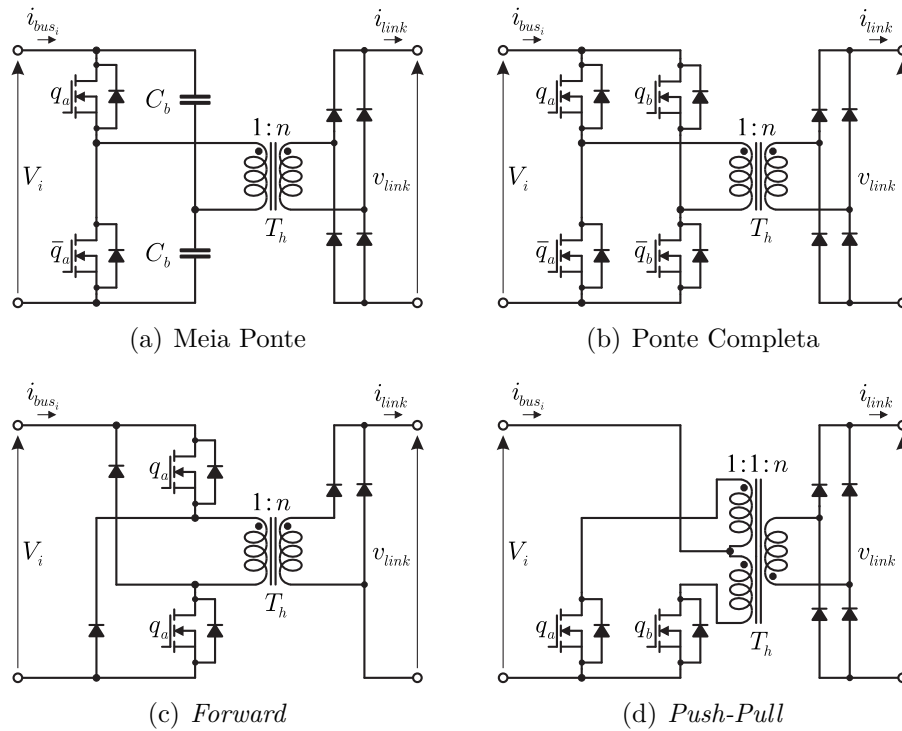
Para o primeiro estágio de conversão, o estágio CC/CC, é necessário a utilização de uma topologia que cumpra alguns requisitos:

- Saída de tensão pulsada;
- Isolação e estágio de elevação de tensão, que será provida pelo transformador;
- Redução de volume de componentes magnéticos, para que a densidade de potência seja alcançada;
- Número reduzido de componentes, a fim de buscar redução dos custos;
- Perdas por chaveamento, estresses de tensão e corrente reduzidos.

A Figura 24 ilustra alguns conversores CC/CC que podem ser utilizados nesse estágio.

Para que as tensões pulsantes sejam geradas, utiliza-se algum tipo de conversor mostrado na figura acima, em que os transformadores devem ter uma pequena indutância de dispersão para que os picos de tensão que ocorrem durante o chaveamento no inversor sejam atenuados. Nesse inversor, foi utilizado a topologia ponte completa, ilustrado na Figura 25(b) .

Figura 24 – Tipos de conversores CC/CC pulsantes.



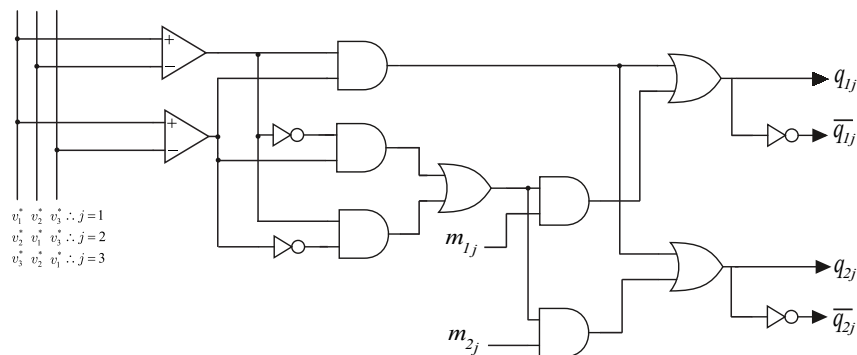
Fonte: Alves (2018)

### 3.3 Inversor trifásico

Para o circuito do inversor trifásico, foi utilizado a topologia apresentada anteriormente na figura 20, no entanto sem a utilização de um capacitor eletrolítico no barramento CC e em relação à tensão de entrada  $V_i$ , seu comportamento é determinado pela saída do conversor CC/CC descrito na seção anterior.

A estratégia usada para realizar a comutação das chaves é mostrada na figura 25.

Figura 25 – Estratégia de comutação para o inversor.



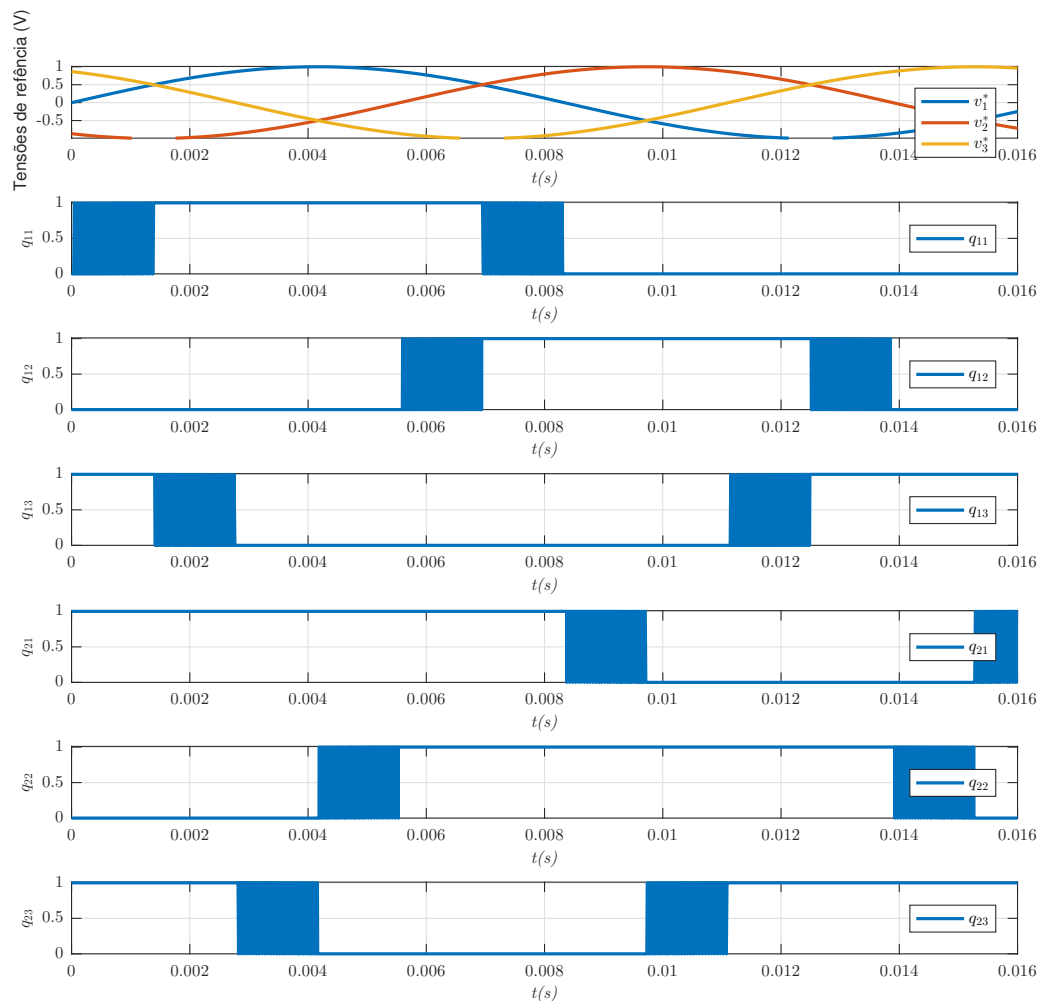
Fonte: Própria do autor.

Em que  $m_{1j}$  e  $m_{2j}$  são os índices de modulação.



A estratégia de modulação mostrada na figura 25 é uma modulação por largura de pulso escalar, ou, *Scalar Pulse Width Modulation* (SPWM). Nessa lógica de chaveamento, apenas um braço do inversor chaveia por período de chaveamento, enquanto que as demais chaves permanecem grampadas em nível lógico 0 ou 1, como pode ser observado na figura 26.

Figura 26 – Chaveamento do inversor trifásico.



Fonte: Própria do autor.

A lógica do chaveamento se dá da seguinte forma: as três senoides de referência são divididas em seis setores (baseado em qual sinal está no meio) e cada setor é dividido em dois: **A** quando o sinal do meio apresenta valor maior que zero e **B** quando o sinal do meio apresenta valor menor que zero.

A lógica de modulação então consiste em grampear em nível lógico 1 o braço cujo o sinal de referência está maior; grampear em nível lógico 0 o braço cujo o sinal de referência

Setor		q <sub>11</sub>	q <sub>21</sub>	q <sub>12</sub>	q <sub>22</sub>	q <sub>13</sub>	q <sub>23</sub>
<b>I</b>	A	1	1	0	0	$m$	1
	B	1	1	0	0	0	$m$
<b>II</b>	B	1	1	0	$m$	0	0
	A	1	1	$m$	1	0	0
<b>III</b>	A	$m$	1	1	1	0	0
	B	0	$m$	1	1	0	0
<b>IV</b>	B	0	0	1	1	0	$m$
	A	0	0	1	1	$m$	1
<b>V</b>	A	0	0	$m$	1	1	1
	B	0	0	0	$m$	1	1
<b>VI</b>	B	0	$m$	0	0	1	1
	A	$m$	1	0	0	1	1

Tabela 2

está menor e, chavear o braço em que o sinal de referência estiver no meio do seguinte modo:

Se a senóide que está no meio possui valor maior que zero, ou seja, porção **A**, o primeiro par de chaves é chaveado e o segundo par é grampeado em 1;

Caso contrário, o segundo par de chaves é chaveado e o primeiro é grampeado em zero.

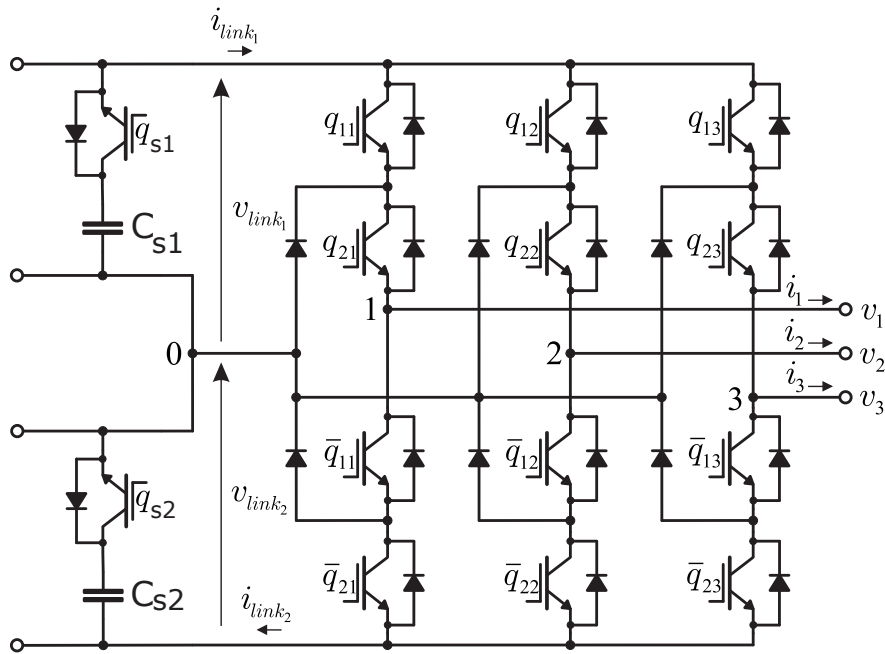
A Tabela 2 ilustra os possíveis estados dos sinais das chaves do inversor, em que  $m$  significa o índice de modulação proveniente da comparação da tensão de referência com as portadoras  $v_{tri1}$  e  $v_{tri2}$ .

### 3.4 Circuito snubber

Devido à indutância de dispersão no secundário de cada transformador de alta frequência, picos de tensão ocorrem na mudança de estados das chaves. Desta forma, é necessário utilizar circuitos *snubber* no secundário de cada transformador para evitar que estes picos influenciem na operação do circuito.

A Figura 27 ilustra esse circuito.

Figura 27 – Circuitos *snubbers*.



Fonte: Dutra et al. (2018).

O acionamento das chaves *snubber* devem ocorrer num tempo minimamente inferior ao acionamento de alguma chave do inversor e devem ser desligadas quase que instataneamente após o chaveamento nas chaves do inversor acontecerem.

A lógica por trás do acionamento dos *snubbers* se dá do seguinte modo:

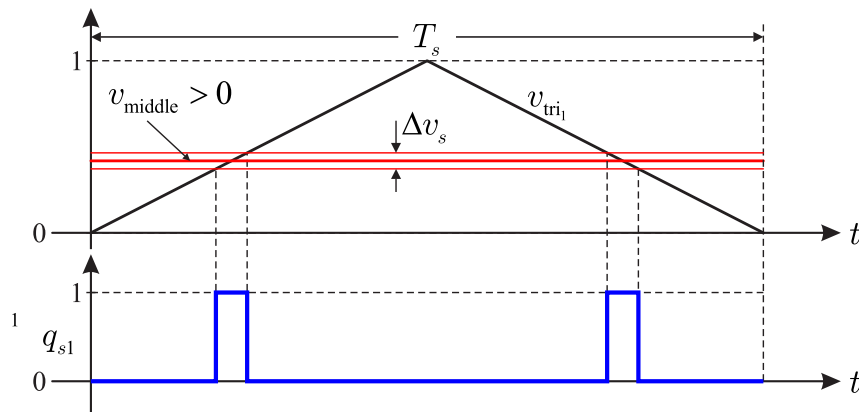
Primeiro calcula-se qual sinal de referência se encontra no meio;

Em seguida calcula-se  $v_m \pm \Delta v_s$ , em que  $v_s$  é uma constante de valor pequeno.

Dessa forma, um pequeno *delay* é gerado momentos antes e depois de um chaveamento ocorreres no inversor. Como é mostrado na Figura 28, a onda triangular é comparada com o sinal de referência do meio acrescido/decrecido de uma constante, de modo a ser ligado/desligado a fim de evitar *spikes* de tensão.

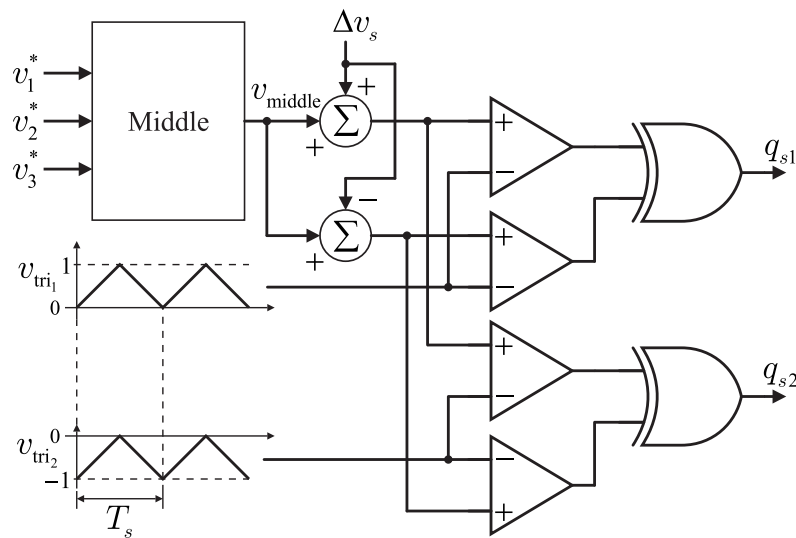
O circuito que realiza essa comparação é mostrado na figura ??.

Figura 28 – Gráfico da comparação da lógica do *snubber*.



Fonte: Dutra et al. (2018).

Figura 29 – Circuito de acionamento dos *snubbers*.



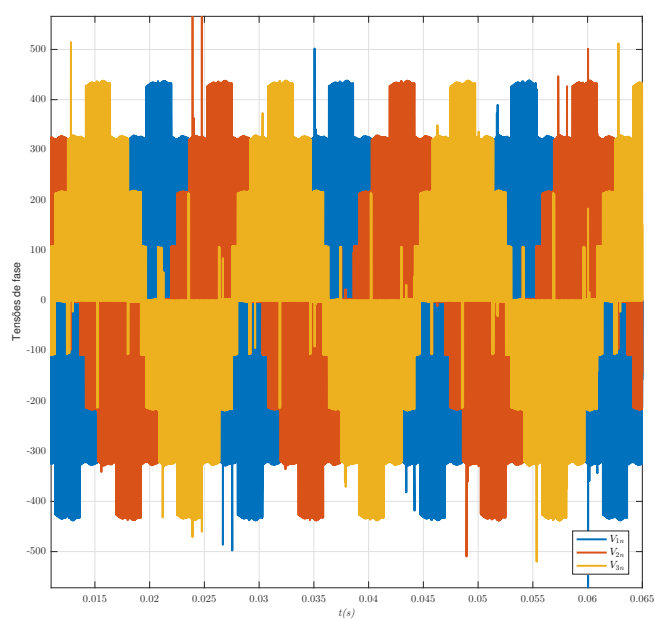
Fonte: Dutra et al. (2018).

### 3.5 Resultados e discussões

Os resultados obtidos foram simulados do *software* PSIM e os dados foram coletados e tratados no MATLAB. A Figura 30 ilustra o comportamento das tensões de fase da saída do inversor, para uma carga de  $50 \Omega$  e  $78 \text{ mH}$ .

Para as tensões de fase foi atingido um total de 9 níveis e uma tensão de pico de aproximadamente  $425 \text{ V}$ .

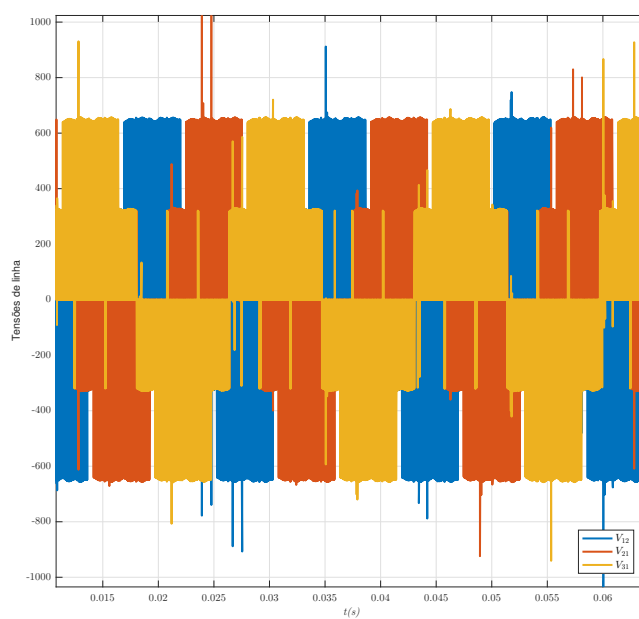
Figura 30 – Tensões de fase do inversor.



Fonte: Própria do autor.

De modo análogo, a Figura 31 ilustra o comportamento das tensões de linha.

Figura 31 – Tensões de linha do inversor.



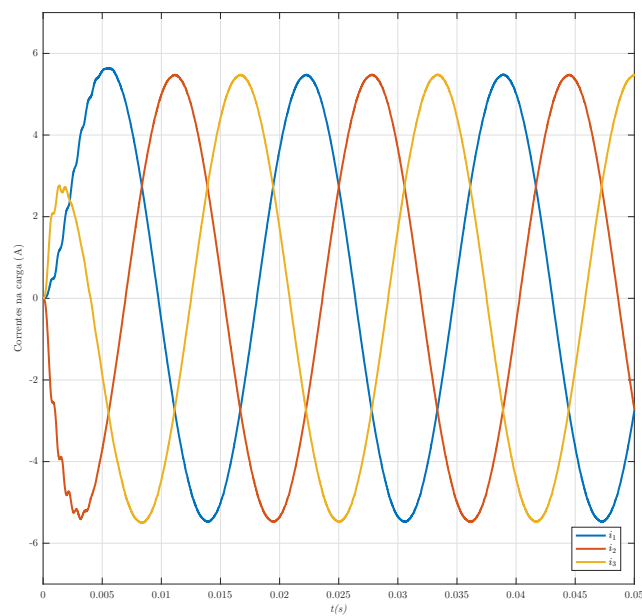
Fonte: Própria do autor.

Para as tensões de linha foi atingido um total de 5 níveis e uma tensão de pico de

aproximadamente 640 V.

A corrente na carga é mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Correntes na carga.



Fonte: Própria do autor.

Para as correntes na carga, foram observadas formas de onda satisfatórias.

## 4 Conclusão

Este trabalho expôs um estudo sobre uma topologia de inversor trifásico multi-nível NPC sem capacitor eletrolítico, utilizando conceitos de eletrônica de potência. Foi realizado uma simulação utilizando o software PSIM e o objetivo do trabalho foi realizado com sucesso.

O inversor apresentou resultados satisfatórios, além de que não foi utilizado capacitor eletrolítico no seu barramento CC, o que gera mais confiabilidade ao sistema, sendo possível, por exemplo, sua aplicação ligada a sistemas fotovoltaicos, que possuem alta vida útil, de 25 anos.

Um método não convencional de modulação de chaveamento foi abordado e pelos resultados mostrados, percebe-se que sua funcionalidade é garantida. Estudos acerca dessa modulação ainda precisam ser realizados pois esse método possui uma grande vantagem que é a sua eficiência ao somente chavear um braço por vez.

# Bibliografia

ALVES, L. F. S. Inversor trifásico sem barramento cc aplicado ao bombeamento fotovoltaico. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 21.

DUTRA, A. d. E. et al. High-frequency pulsating dc-link three-phase multilevel npc inverter without electrolytic capacitor. In: IEEE. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.], 2018. p. 1348–1355. Citado 3 vezes nas páginas 20, 24 e 25.

HART, D. W. *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. Citado na página 1.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. Circuitos elétricos, 8a. edição. *LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora SA (Bibliografia Complementar)*, 2008. Citado na página 11.

RASHID, M. H. et al. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. [S.l.]: Makron, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 18.

UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado na página 9.

VITORINO, M. A. et al. High-frequency pulsating dc-link three-phase inverter without electrolytic capacitor. In: IEEE. *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.], 2017. p. 3456–3461. Citado na página 1.