DANIEL FRANCO LEAL

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE DE CORRENTE POR HISTERESE DIGITAL
COM LIMITAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO EM UM INVERSOR NPC
TIPO G PARA ACIONAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO

DANIEL FRANCO LEAL

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE DE CORRENTE POR HISTERESE DIGITAL COM LIMITAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO EM UM INVERSOR NPC TIPO G PARA ACIONAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e da Universidade Federal de São João Del Rei, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Stopa

Coorientador: Alex-Sander Amável Luiz

Leal, Daniel Franco

L435i Implementação de controle de corrente por histerese digital com limitação da frequência de comutação em um inversor NPC tipo G para acionamentos de média tensão / Daniel Franco Leal. – 2023.

89 f.: il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.

Orientador: Marcelo Martins Stopa..

Coorientador: Alex-Sander Amável Luiz..

Banca examinadora: Marcelo Martins Stopa, Alex-Sander Amável Luiz, Allan Fagner Cupertino, Thiago Morais Parreiras, Lenin Martins Ferreira Morais. Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Inversores elétricos – Teses.
 Correntes elétricas – Controle eletrônico – Teses.
 Histerese – Teses.
 Conversores de correntes elétricas – Teses.
 Modulação de duração de pulso – Teses.
 Stopa, Marcelo Martins. II. Luiz, Alex-Sander Amável. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 621.3815322

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6º 1592 / Cefet/MG

DANIEL FRANCO LEAL

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE DE CORRENTE POR HISTERESE DIGITAL COM LIMITAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO EM UM INVERSOR NPC TIPO G PARA ACIONAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e da Universidade Federal de São João Del Rei, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em 6 de outubro de 2023.

Comissão examinad	dora:
_	Prof. Dr. Marcelo Martins Stopa Orientador
	Prof. Dr. Alex-Sander Amável Luiz Coorientador
_	Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino Convidado 1
_	Prof. Dr. Thiago Morais Parreiras Convidado 2
_	Prof. Dr. Lenin Martins Ferreira Morais Convidado 3
	Belo Horizonte, MG

Belo Horizonte, MG

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e amigos que tanto me incentivaram nessa jornada. Agradeço aos meus orientadores, professor Stopa e professor Alex-Sander, por toda a dedicação e paciência que sempre tiveram comigo ao longo dos últimos anos. Ao CEFET-MG e ao PPGEL pela oportunidade, e ao grupo de pesquisa LEACOPI pelo acolhimento.

RESUMO

Nas grandes indústrias, como siderurgia e mineração, por exemplo, os inversores de frequência devem ser capazes de operar na faixa de média tensão e alta potência. Desse modo, os inversores multiníveis têm uma importância significativa em acionamentos nessa faixa de operação. Suas vantagens incluem um melhor espectro de frequência das tensões e correntes de saída, redução das perdas por comutação e redução do estresse sofrido pelos interruptores eletrônicos. Neste sentido, o conversor Neutral Point Clamped (NPC) cumpre bem esse papel. Essa topologia está consolidada no mercado, e é muito importante em acionamentos de alta potência. Ela possui algumas variações, como por exemplo o NPC Tipo G, que fornece cinco níveis de tensão de fase na saída do conversor. As técnicas de controle e comutação aplicadas a esses inversores são um fator determinante no comportamento da tensão sintetizada. Este trabalho propõe o desenvolvimento, implementação e avaliação experimental de uma estratégia de comutação que utiliza a histerese de corrente. O acionamento é realizado de forma digital, ou seja, os sinais medidos e utilizados no controle são amostrados. Assim, é comum utilizar-se da frequência de amostragem para limitar a frequência de comutação dos interruptores eletrônicos, já que a frequência máxima de atuação é metade da frequência de amostragem. Baixas taxas de amostragem, por outro lado, diminuem a eficácia do controle, além de causar problemas no comportamento da histerese de corrente operando em conversores multiníveis. Dessa forma, esta pesquisa propõe uma forma de utilizar a histerese de corrente com altas taxas de amostragem, utilizando-se um circuito limitador de frequência nos sinais de comando dos interruptores eletrônicos. Essa técnica dissocia a frequência de amostragem da frequência de atuação, melhorando o funcionamento do modulador e diminuindo a distorção harmônica total da tensão e da corrente do inversor. Essas características são comprovadas através de resultados coletados na implementação do acionamento através de simulação computacional e experimentação em laboratório.

Palavras-chave: Inversor multinível; Controle de corrente; Histerese; Neutral Point Clamped (NPC); Pulse Width Modulation (PWM).

ABSTRACT

In heavy industries such as steel and mining, for example, frequency inverters must be able to operate in the medium voltage and high power range. Thus, multilevel inverters have a significant importance in drives in this kind of operation. Its advantages include a better frequency spectrum of output voltages and currents, reduction of switching losses and the stress suffered by electronic switches. In this sense, the Neutral Point Clamped (NPC) converter fulfills this role well. This topology is consolidated in the market, and is very important in high power drives. It has some variations, such as the NPC Type G, which provides five levels of phase voltage at the output of the converter. The control and switching techniques applied to these inverters are a determining factor in the behavior of the synthesized voltage. This work proposes the development, implementation and experimental evaluation of a switching strategy that uses the current hysteresis. The drive is performed digitally, wich means that, the signals measured and employed in the control are sampled. Thus, it is common to use the sampling frequency to limit the switching frequency of electronic switches, since the maximum actuation frequency is half the sampling frequency. Low sampling rates, on the other hand, decrease control effectiveness, and cause problems in current hysteresis behavior operating in multilevel converters. In this sense, this research proposes a way to implement the current hysteresis with high sampling rates, using a frequency limiting circuit in the control signals of the electronic switches. This technique dissociates the sampling frequency from the actuation frequency, improving the operation of the modulator and reducing the total harmonic distortion of the inverter voltage and current. These characteristics are confirmed by results collected in the implementation of the drive through computer simulation and laboratory experimentation.

Key-words: Multilevel inverters; Current control; Hysteresis; Neutral Point Clamped (NPC); Pulse Width Modulation (PWM).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Conversor meia ponte de dois níveis trabalhando como inversor
monofásico e (b) seu circuito de comando com histerese de corrente20
Figura 2 – (a) Comportamento das formas de onda de tensão e corrente sintetizadas
na saída do inversor monofásico comandado por histerese de corrente e (b) o sinal de
erro da corrente aplicado no elemento de histerese21
Figura 3 – (a) Esquema de um inversor multinível meia-ponte e (b) forma de onda
típica da tensão de saída em degraus29
Figura 4 – Inversor de 3 níveis tipo NPC30
Figura 5 – (a) Sinais de comando dos interruptores eletrônicos do braço referente à
fase U, (b) formas de onde de saída de tensão entre os terminais de saída e o ponto
neutro e (c) tensão entre dois terminais de saída u-v do inversor NPC 3 níveis (tensão
de linha)31
Figura 6 – (a) Braço de um inversor a diodos de quatro níveis e (b) um de cinco níveis
e (c) um inversor de sete níveis com grampeamento a diodo32
Figura 7 – (a) Configuração do circuito de potência do inversor NPC Tipo G e (b) seu
módulo ponte H, formado por dois braços de um inversor NPC três níveis33
Figura 8 – Inversor de frequência de média tensão modelo MVW01 da WEG34
Figura 9 – Esquema do circuito de potência do inversor Toshiba modelo Dura-Bilt5
MV34
Figura 10 – Componentes d e q das correntes do motor referencial rotativo síncrono
como o fluxo do rotor37
Figura 11 - Sistema básico de orientação indireta de campo em máquina de indução
usando um modulador PWM regulado por corrente37
Figura 12 - Diagrama completo do acionamento da máquina de indução por inversor
NPC 5 níveis, comandado por histerese de corrente multifaixa e com controle vetoria
por orientação de campo38
Figura 13 – Bloco desacoplador de tensão39
Figura 14 – Controlador de velocidade40
Figura 15 – Resposta em frequência da rigidez dinâmica com malha de velocidade e
nosicão

Figura 16 - Comportamento do controle por histerese de corrente multifaixa em um
conversor de cinco níveis44
Figura 17 – Circuito de comando do controle por histerese de corrente multifaixa45
Figura 18 – Corrente e tensão de um conversor com modulação por histerese de
corrente multifaixa46
Figura 19 – (a) Comportamento da histerese multifaixa com uma frequência de
amostragem baixa, insuficiente para o funcionamento adequado e (b) com uma
frequência de amostragem mais alta, que proporciona melhor aproveitamento da
técnica48
Figura 20 - Circuito limitador de frequência49
Figura 21 – Comportamento do circuito limitador de frequência50
Figura 22 – Esquema do processamento do acionamento51
Figura 23 - Tensão da fase a, tensão de linha V _{ab} e corrente no motor durante o
período para estabelecimento do fluxo para (a) a situação onde a frequência de
amostragem é de 5 kHz e para (b) o segundo caso com frequência de amostragem c
20 <i>kHz</i> 54
Figura 24 – Velocidade do rotor e conjugado (estimado) para o acionamento do moto
com modulação por histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem
de 5 <i>kHz</i> 55
Figura 25 – Velocidade do rotor e conjugado (estimado) para o acionamento do motor
com modulação por histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem
de 20 kHz e circuito limitador de frequência55
Figura 26 – Detalhe da oscilação do conjugado durante a aceleração da máquina para
(a) o acionamento com taxa de amostragem de 5 kHz e (b) para o acionamento com
taxa de amostragem de 20 kHz 56
Figura 27 – Tensão da fase a, tensão de linha V _{ab} e corrente no motor para a operação
em rampa de velocidade, para acionamento com taxa de amostragem de 5 $kHz.57$
Figura 28 – Tensões da fase a, tensão de linha V _{ab} e corrente no motor para a
operação em rampa de velocidade, para acionamento com taxa de amostragem de
20 <i>kHz</i> 57
Figura 29 – Espectro harmônico dos sinais da tensão da fase a, tensão de linha Vab e
corrente no motor, em operação em regime permanente, para o acionamento por
histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem de 5 kHz 59

Figura 30 – Espectro harmônico dos sinais da tensão da fase a, tensão de linha V _{ab} e
corrente no motor, em operação em regime permanente, para o acionamento por
histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem de 20 kHz e com
circuito limitador de frequência60
Figura 31 – Tensão na fase a, tensão de linha V _{ab} e corrente no motor em operação
em regime permanente, com a frequência de amostragem de 5 kHz 60
Figura 32 - Tensão da fase a, tensão de linha V _{ab} e corrente no motor em operação
em regime permanente, com a frequência de amostragem de $20\ kHz.$ 61
Figura 33 – Atuação do circuito limitador de frequência para o (a) interruptor eletrônico
S ₁ e (b) S ₂ , em um dos braços da fase A do inversor61
Figura 34 – Sinais para geração dos comandos para modulação SVPD-PWM62
Figura 35 - Diagrama completo do acionamento da máquina de indução por inversor
NPC 5 níveis, comandado por modulador SVPD-PWM e com controle vetorial por
orientação de campo63
Figura 36 - Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor em operação
em regime permanente, com modulação SVPD-PWM64
Figura 37 - Espectro harmônico dos sinais da tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e
corrente no motor, em operação em regime permanente, para o acionamento com
modulação SVPD-PWM65
Figura 38 – Diagrama completo do $\mathit{hardware}$ do acionamento da máquina de 2 cv . 68
Figura 39 – Foto da montagem do inversor NPC Tipo G69
Figura 40 – Circuito de entrada e barramento c.c70
Figura 41 – Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor de 2 ${\it CV}$ em
regime permanente a vazio71
Figura 42 – Espectro de frequência da tensão da fase a, tensão de linha Vab e da
corrente no motor de 2 CV em regime permanente a vazio72
Figura 43 – Tensão da fase a, tensão de linha V _{ab} e corrente na carga no acionamento
do motor de 2 CV em regime permanente a vazio com baixa taxa de amostragem
(5 <i>kHz</i>)73
Figura 44 – Tensão da fase a, tensão de linha Vab e corrente no motor de 2 CV em
regime permanente com conjugado estimado de 2,6 Nm74

Figura 45 – Espectro de frequência da tensão da fase a, da tensão de linha Vab e da
corrente no motor de 2 CV em regime permanente e conjugado estimado de 2,6 Nm.
74
Figura 46 – (a) Componentes de corrente em eixo direto I_d e eixo quadradura I_q de
referência e medidas e (b) correntes das fases a, b e c de referência e medidas, para
o acionamento em regime permanente e com carga estimada de 2,6 Nm 76
Figura 47 – Tensão no barramento c.c. da Fase C77
Figura 48 – Velocidade do rotor durante acionamento da máquina com reversão77
Figura 49 – Foto dos motores utilizados no acionamento85
Figura 50 – Transformador utilizado na montagem do acionamento86
Figura 51 – Parte superior da bancada com osciloscópio, fonte simétrica e varivolt.86
Figura 52 – Diagrama do condicionador de sinais dos sensores de corrente87
Figura 53 – Diagrama do condicionador de sinais do encoder de posição do motor.
88
Figura 54 – Diagrama do condicionador de sinais do DSP. Representação do circuito
para um sinal89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da máquina de indução trifásica de 6.000 hp53
Tabela 2 – Distorção harmônica total (THD) para as tensões da fase a e de linha V_{ab}
e corrente no motor para os acionamentos com frequência de amostragem de 5 e
20 kHz, com operação em regime permanente e plena carga
Tabela 3 – THDs das tensões de fase, de linha e corrente na carga para os dois tipos
de modutadores64
Tabela 4 – Dados da máquina de indução trifásica de 2 cv
Tabela 5 – Dados da máquina utilizada como emulador de cargas mecânicas67
Tabela 6 - THDs das tensões de fase, de linha e corrente na carga para os
acionamentos a vazio e com carga75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

c.a. Corrente alternada

THD Total Harmonic Distortion

NPC Neutral Point Clamped

CSI Current Source Inverter

VSI Voltage Source Inverter

PWM Pulse Width Modulation

c.c. Corrente Contínua

D-STATCOM Distribution Static Synchronous Compensator

CESP Current Error Space Vector

PD Phase Disposition

POD Phase Opposition Disposition

APOD Alternate Phase Opposition Disposition

PSC Phase Shift Carrier

CO Carrier Over lopped

DSP Digital Signal Processor

PI Proporcional Integral

FPGA Field Programable Gate Array

SVPD-PWM Space Vector Phase Disposition Pulse Width Modulation

GTO Gate Turn Off

IGBT Insulated-gate Bipolar Transistor

LISTA DE SÍMBOLOS

*i*_s Corrente de estator

V_{DC} Fonte de tensão contínua

 f_c Frequência de comutação

*e*_s Força contraeletromotriz

 r_s Resistência de estator

 L_s' Indutância transitória do estator

 $p \frac{d}{dt}$

 λ_s Enlace de fluxo de estator

 λ_r Enlace de fluxo de rotor

 L_m Indutância mútua

L_s Indutância própria de estator

 L_r Indutância própria de rotor

T_e Conjugado eletromagnético

 ω Velocidade angular

A/D Analógico/Digital

 T_L Conjugado da carga

j Unidade imaginária

Momento de inércia

P Número de pólos

Subscrito

d Eixo direto

q Eixo em quadratura

Sobrescrito

* Valor de referência

e eixos com referencial rotativo

Valor estimado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Controle de corrente	18
1.1.1 Histerese de corrente	20
1.2 Estudos recentes	23
1.3 Objetivos	26
1.4 Contribuições	26
1.5 Estrutura do texto	27
2 CONVERSOR MULTINÍVEL E A TÉCNICA DE CONTROLE DO ACION 28	AMENTO
2.1 Topologia NPC	29
2.1.1 NPC Tipo G	32
2.2 Controle vetorial por orientação de campo do rotor	35
2.2.1 Controlador e sintonia	40
2.3 Conclusão	42
3 CONTROLE POR HISTERESE DE CORRENTE MULTIFAIXA	43
3.1 Histerese multifaixa digital	47
3.2 Circuito limitador de frequência	49
3.3 Conclusão	51
4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS	52
4.1 Resultados de simulação para um acionamento de 6.000 hp	52
4.1.1 Parâmetros do acionamento	52
4.1.2 Resultados de simulação	53
4.1.3 Comparação entre histerese multifaixa e SVPD-PWM	62
4.2 Resultados experimentais para um acionamento de 2 cv	65
4.2.1 Parâmetros do acionamento	65
4.2.2 Descrição da bancada de testes	66

4.2.3 Resultados experimentais	71
4.2.3.1 Operação a vazio	71
4.2.3.2 Operação com carga	73
4.2.3.3 Operação transitória	77
4.3 Conclusão	77
5 CONCLUSÕES	79
5.1 Propostas para trabalhos futuros	80
REFERÊNCIAS	81
APENDICE A – FOTOS ADICIONAIS DA MONTAGEM	85
APENDICE B – DIAGRAMAS DOS CONDICIONADORES DE SINAIS	87

1 INTRODUÇÃO

À medida que a automação industrial atinge um novo patamar em seu desenvolvimento, a tecnologia de acionamento de motores c.a. deve acompanhar essa evolução, uma vez que esse setor exige um controle flexível, permitindo o ajuste preciso de velocidade, aceleração e conjugado (NOVOTNY e LIPO, 1996). Em aplicações de alta potência, os acionamentos c.a. devem fornecer formas de onda de tensão e de corrente o mais senoidal possível em sua saída, o que pode ser obtido adicionando-se grandes filtros LC ou por meio de técnicas de comutação, além do aumento do número de níveis da tensão sintetizada. O uso de métodos adequados de comutação pode proporcionar economia de espaço e de recursos financeiros com esses filtros (RASHID, 2014). Nesse contexto, os conversores eletrônicos de potência necessitam de estratégias de modulação capazes de otimizar parâmetros como a frequência de comutação, a distorção harmônica, as perdas e a velocidade de resposta (LIPO, HOLMES e HOLMES, 2003). Além disso, o controle do acionamento de motores elétricos deve atender o comportamento da carga, fornecendo o conjugado mecânico demandado por ela em velocidades que podem variar ao longo do tempo, além de causar a menor perturbação possível ao sistema de fornecimento de energia elétrica. O contínuo avanço na tecnologia dos dispositivos semicondutores de potência tem permitido o desenvolvimento de drives c.a. que atendam essas necessidades, porém, como consequência, há um aumento na complexidade dos circuitos de comando dos interruptores eletrônicos.

As várias estratégias de modulação tendem a utilizar frequências de comutação elevadas. Porém, em aplicações de média tensão e alta potência, existem restrições para comutar em altas frequências, devido, principalmente, às perdas e à própria limitação nas características dos dispositivos empregados. Assim, como estratégia para minimizar esses efeitos, adota-se um aumento do número de níveis de tensão na operação dos inversores, cujo objetivo é dividir os esforços de cada interruptor eletrônico, além de diminuir a distorção harmônica total (THD) na forma de onda de tensão de saída do conversor (RASHID, 2014). Assim sendo, esse trabalho utilizará a topologia apresentada por (HILL e HARBOURT, 1999), o conversor NPC tipo G de 5 níveis, que além de multinível, possibilita a utilização de várias técnicas de comutação.

Naturalmente, diferentes estratégias de controle de comutação levam a diferentes resultados em termos de desempenho do conversor. O controle por faixa de histerese de corrente proposto neste trabalho atua na lógica de comutação fazendo com que a corrente na carga se aproxime de uma corrente de referência previamente estabelecida. A largura da faixa de histerese influencia diretamente na frequência de comutação e, consequentemente, na qualidade das ondas de tensão sintetizadas e na eficiência do inversor. Apesar de essa ser uma técnica simples, sua aplicação em inversores com topologias multinível aumenta consideravelmente a complexidade da implementação do comando dos interruptores eletrônicos (GAWANDE e RAMTEKE, 2014).

Mesmo com todo o estudo desenvolvido durante décadas, ainda há espaço para contribuição, como é proposto neste trabalho, através da aplicação do controle por histerese aplicado a um conversor multinível, na expectativa de melhorar a qualidade da tensão e corrente de saída sintetizadas no conversor, em conjunto com uma topologia que permite lidar com o acionamento em alta potência.

1.1 Controle de corrente

Acionamentos de alto desempenho utilizam estratégias de controle que fornecem sinais de comando para sintetizar as correntes das máquinas c.a., ou seja, são inversores regulados por corrente. A razão para a escolha da corrente como variável de controle é que alguns fatores dinâmicos como, efeitos de resistência, indutância e força contra eletromotriz são eliminados. Inversores do tipo fonte de corrente (CSIs) e fonte de tensão (VSIs) com modulação por largura de pulso (PWM) podem operar em modo de controle de corrente. O CSI pode ser mais prontamente colocado em operação com o controle de corrente, porém, o VSI apresenta maior largura de faixa e eliminação de harmônicos na forma de onda da corrente (NOVOTNY e LIPO, 1996) além de possuírem um custo consideravelmente menor em sua produção.

Os VSIs têm sido amplamente pesquisados, em especial as topologias multiníveis, na tentativa de operar com altas faixas de potência e baixa distorção harmônica. Dentre os muitos tipos de inversores multinível, o *Neutral-Point-Clamped* (NPC) com comando PWM é bem conhecido por tornar o conversor bem eficiente,

tanto em meia-ponte quanto em ponte-completa, além de permitir o emprego de várias técnicas de modulação.

O desempenho dos conversores depende muito da estratégia de controle de corrente aplicada. Em comparação com conversores PWM convencionais, o conversor PWM controlado por corrente tem as seguintes vantagens (KAZMIERKOWSKI e MALESANI, 1998):

- controle da forma de onda da corrente instantânea e alta precisão;
- rejeição de sobrecarga;
- excelente dinâmica;
- proteção contra sobrecorrente e curto circuito;
- compensação de efeitos causados por mudança de parâmetros da carga (resistência e reatância);
- compensação de queda de tensão dos semicondutores e do tempo morto do conversor:
- compensação de alterações na tensão do barramento c.c.
- rejeição de perturbação.

A precisão de um controle de corrente pode ser avaliada de acordo com alguns requisitos básicos:

- ausência de erros de fase e amplitude em uma larga faixa de frequência de saída;
 - rápida resposta dinâmica do sistema;
 - baixo conteúdo harmônico;
 - boa utilização do barramento c.c.

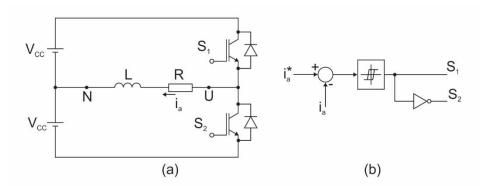
As técnicas de controle de corrente para VSIs podem ser categorizadas como lineares e não-lineares. Os controladores de corrente lineares são caracterizados por possuírem uma frequência de comutação fixa, porém, com algumas limitações de desempenho. Um controlador não-linear pode ser baseado em estratégias de histerese, que por sua vez possui a desvantagem de apresentar uma frequência de comutação variável (NOVOTNY e LIPO, 1996), mas oferecem uma rápida resposta a eventos transitórios (BODE e HOLMES, 2000); (JENA, CHITTI BABU e SAMANTARAY AND M. MOHAPATRA, 2011). Outra vantagem do regulador por histerese de corrente é que ele utiliza diretamente as referências de corrente para sintetizar a tensão de saída do conversor, dispensando o uso de desacopladores de tensão, necessários no caso dos controladores de corrente lineares. Esse

desacoplador de tensão transforma as referências de corrente em referências de tensão, e depende ainda mais de uma estimativa precisa dos parâmetros da máquina para que não ocorram erros no controle por orientação de campo.

1.1.1 Histerese de corrente

Dentre os métodos de controle de corrente não-lineares, o controle por histerese é o tipo mais simples de ser implementado. A Figura 1(a) mostra um conversor de dois níveis meia ponte trabalhando como um inversor monofásico com uma carga RL conectada nos terminais de saída U-N. Os interruptores eletrônicos S_1 e S_2 aplicam as tensões V_{DC} e $-V_{DC}$ na carga, respectivamente, e não devem ser acionados simultaneamente para evitar um curto circuito no barramento c.c. O controlador da Figura 1(b) simplesmente aplica o sinal de erro da corrente em um elemento de histerese, e sua saída fornece o sinal lógico para o acionamento dos interruptores eletrônicos.

Figura 1 – (a) Conversor meia ponte de dois níveis trabalhando como inversor monofásico e (b) seu circuito de comando com histerese de corrente.

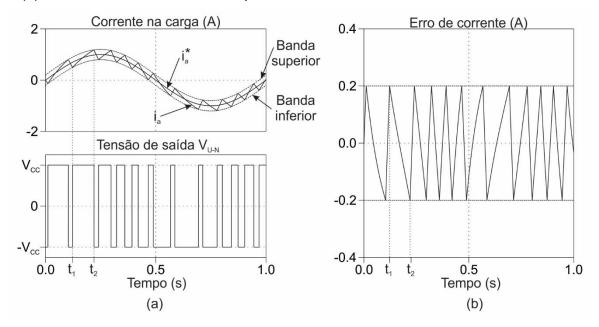


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 2(a) mostra o comportamento das formas de onda de tensão e corrente sintetizadas na saída do inversor monofásico de dois níveis da Figura 1(a) comandado por histerese de corrente. Para uma dada referência de corrente i_a^* , são definidas as faixas de histerese superior e inferior. No momento t_1 , a corrente na carga i_a está diminuindo, se afastando de i_a^* , quando atinge a faixa de histerese inferior. Nesse momento, o interruptor S_1 é acionado e o interruptor S_2 é desligado, sendo

aplicada uma tensão V_{cc} na carga RL. Esse comando provoca a mudança no sentido de i_a , que vai novamente em direção a i_a^* . Em t_2 a corrente na carga i_a , que estava novamente se afastando de i_a^* , atinge a faixa de histerese superior, e o circuito de comando ativa o inturruptor S_2 e desliga o interruptor S_1 , fazendo com que seja aplicada uma tensão $-V_{cc}$ na carga RL, corrigindo a trajetória de i_a em direção a i_a^* . Esse ciclo, então, se repete constantemente, com o objetivo de que i_a se aproxime sempre de i_a^* .

Figura 2 – (a) Comportamento das formas de onda de tensão e corrente sintetizadas na saída do inversor monofásico comandado por histerese de corrente e (b) o sinal de erro da corrente aplicado no elemento de histerese.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A grande desvantagem do controle por histerese de corrente é a frequência de comutação variável, podendo causar o aparecimento de componentes de baixa frequência no espectro harmônico da corrente. Além disso, altas frequências de comutação podem exceder o limite dos dispositivos semicondutores, principalmente aqueles destinados a operar em altas faixas de potência.

Na Figura 2(b), a trajetória completa de subida e descida do erro de corrente entre as faixas de histerese representa uma oscilação de frequência f_c , que é a frequência de comutação do inversor. NOVOTNY e LIPO, (1996), apresentam uma forma de estimar a f_c máxima em um inversor de dois níveis trifásico comandado por histerese de corrente acionando um motor de indução. Em geral, a equação vetorial

da máquina de indução que relaciona a tensão de estator $\vec{v_s}$, a corrente de estator $\vec{l_s}$ e força contraeletromotriz $\vec{e_s}$ é dada por

$$\overrightarrow{v_s} = r_s i_s + L_s' p \overrightarrow{i_s} + \overrightarrow{e_s} \tag{1}$$

onde r_s e L_s' são a resistência de estator e a indutância transitória do estator, respectivamente e p é o operador de derivada. A frequência de comutação é maior quando o maior valor de tensão é aplicado no estator (maior inclinação da corrente), ou seja, quando $\overrightarrow{e_s}$ é pequeno. Desconsideranto r_s , a Equação 1 se torna

$$\overrightarrow{v_s} = L_s' p \overrightarrow{l_s} \tag{2}$$

A estimativa de f_c máxima é feita dividindo-se a velocidade da trajetória da corrente pela distância percorrida em um período completo de um ciclo. Para uma força contraeletromotriz igual a zero, a velocidade em amperes por segundo é aproximadamente

$$velocidade = \frac{di_s}{dt} \approx \frac{2}{3} \frac{V_{DC}}{L_s'}$$
 , (3)

onde L_s' é a indutância transitória do estator da máquina.

Como o inversor é trifásico e a comutação de cada fase influencia nas outras, a distância em amperes percorrida em um ciclo completo do erro de corrente é

$$distancia = \Delta i_s \approx 6h$$
 (4)

onde h é a largura da faixa de histerese.

A frequência de comutação máxima do inversor é dada, então, como

$$f_c = \frac{velocidade}{distância} = \frac{V_{DC}}{9hL_S'}$$
 (5)

A seção seguinte apresenta alguns dos estudos recentes envolvendo a técnica da histerese de corrente aplicada em diversas áreas.

1.2 Estudos recentes

Algumas características interessantes dos reguladores por histerese de corrente, como a resposta dinâmica, rápida resposta de corrente e a baixa dependência dos parâmetros da carga, têm renovado o interesse pelo uso dessa técnica em várias áreas como geração distribuída, compensadores estáticos de potência e acionamento de motores.

SINGH e BEHERA (2018) fazem um estudo de controladores por histerese de corrente em inversores conectados à rede, com aplicação na área de geração distribuída, revisando os conceitos das histereses de faixa simples, faixa dupla e faixa variável. Através de resultados de simulações e experimentais, o artigo mostra que o melhor nível de THD é obtido utilizando-se a técnica de faixa dupla de histerese, que, nesse caso, produz uma forma de onda de tensão na saída do inversor com três níveis. Neste caso, a mesma técnica não pode ser usada em conversores com mais de três níveis. Além disso, o trabalho lista o resultado da análise das técnicas com a frequência máxima de comutação, porém não evidencia a estratégia utilizada para garantir esse limite.

RAJASEKHAR e RAMADEVI (2018) apresentam um D-STATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*) que utiliza a técnica de modulação por histerese de corrente multifaixa, aplicada a um conversor multinível em cascata. Neste caso, o conversor aproveita as características da modulação por histerese para mostrar as vantagens em relação às técnicas tradicionais. Neste trabalho é utilizado um método para a estimativa da faixa de frequência de comutação para uma dada faixa de histerese, sendo possível indicar as frequências mínima, máxima e média. Porém, nenhuma ação é tomada com o propósito de limitar efetivamente a frequência de comutação.

SRIKAR, et al., (2018), fazem uma comparação entre duas técnicas de modulação por histerese de corrente. A primeira técnica é baseada no fasor espacial do erro de corrente (*Current Error Space Phasor* - CESP), na qual a cada período de amostragem o inversor comuta a saída de tensão de modo a manter o sinal de corrente, em referencial $\alpha\beta$, dentro de um padrão particular. Para calcular esse padrão

do erro de corrente, as tensões fundamentais de estator precisam ser estimadas para, então, a partir disso, determinar os três vetores de tensão mais próximos. A segunda estratégia utiliza o valor médio das tensões do inversor para gerar faixas de histerese variáveis de modo que o erro de corrente oscile, e desse modo a frequência de comutação é quase constante. Ambas as técnicas são aplicadas com sucesso a um inversor de dois níveis para acionamento de um motor de indução, porém, não se pode concluir que as mesmas técnicas possam ser diretamente aplicadas em inversores multinível. Parte dessa lacuna é preenchida no trabalho de RAJU, et al., (2019), que aplica a mesma técnica CESP a um conversor ponte-H em cascata de três níveis utilizado como um STATCOM. Porém, neste caso, o trabalho apresenta implementação apenas através de simulação, sem levar em conta possíveis efeitos na discretização do sistema e possíveis especificidades na implementação via hardware.

O trabalho apresentado por PATIL, et al., (2018), tem uma proposta bem alinhada com este. Os autores fazem uma comparação entre técnicas de PWM lineares e a histerese de corrente, aplicadas a conversores multinível. As técnicas analisadas são a *phase disposition* (PD), *phase opposition disposition* (POD), alternate phase opposition disposition (APOD), phase shift carrier (PSC), carrier overlapped (CO) e histerese de corrente. Apesar da proposta interessante, a comparação entre as técnicas de modulação é feita apenas levando em consideração características teóricas, e fica devendo dados quantitativos e resultados experimentais que confirmem as afirmações.

Além do uso em acionamento de motores, a técnica de modulação por histerese de corrente também tem sido aplicada em compensadores estáticos, como é o caso do trabalho de LINCA, et al., (2018). Neste trabalho é apresentada uma técnica de modulação por controle de histerese de corrente com frequência de comutação constante. Para isso, o sinal de erro de corrente da histerese clássica é sobre-modulado com o sinal de uma portadora triangular, antes de ser aplicado aos elementos de histerese. A frequência de comutação, nesse caso, se torna constante e igual à frequência da portadora. Porém, como relatado pelos próprios autores, para garantir a operação apropriada, a frequência de comutação (portadora) deve ser alta, dificultando sua aplicação em sistemas de alta potência e com portadoras sintetizadas digitalmente por Processadores de Sinais Digitais (DSPs).

Também existem propostas de melhorar técnicas já existentes, como no caso do artigo de STOJIć, et al., (2019) que propõe uma modificação no controlador por histerese de corrente baseado em eixo com referencial síncrono. Aqui ele obtém um controle de corrente robusto, associado a um erro nulo em operação em regime permanente. Porém, o artigo não contempla a discussão da característica própria da modulação por histerese de corrente que é a frequência de comutação variável, que neste caso, pode chegar a valores altos e inaceitáveis.

No trabalho de YALLA, et al., (2020), o controle por histerese de corrente é aplicado a um conversor c.a.-c.c. com alto fator de potência. O conversor é multinível, e sua construção utiliza a topologia de grampeamento em múltiplos pontos. Neste artigo, a histerese de corrente multifaixa é comparada com um novo método proposto, que utiliza apenas uma faixa de histerese e se baseia em tempo para seleção dos níveis de tensão do conversor. A associação da topologia com o método de histerese proposto apresenta algumas vantagens sobre a técnica multifaixa, porém, parte do acionamento é implementado de forma analógica, o que deixa uma margem para discussão, já que sistemas modernos tendem a ser implementados de forma digital. Também não há no artigo uma discussão sobre a questão da frequência de comutação variável, própria dos controladores por histerese de corrente.

LAKSHMI e MATHEW (2022) apresentam um método de histerese de corrente com frequência de comutação constante. Nesta técnica, não é necessária uma faixa de histerese. A ação de controle da histerese é determinada por um comparador ou pelo tempo de inclinação da corrente. Neste caso, a técnica é aplicada a um inversor de dois níveis trifásico conectado à rede, e não pode ser aplicada diretamente a conversores multinível.

Por fim, o estudo recente de SURU, et al., (2023) apresenta uma proposta muito semelhante à deste trabalho, sugerindo, justamente, limitar a frequência de comutação do modulador controlado por histerese de corrente, utilizado no acionamento de um motor controlado por orientação de campo do rotor, e aplicado a um inversor de dois níveis. Neste caso, o método consiste em ajustar a faixa de histerese a cada período de amostragem, regulando a frequência de comutação, através de um controlador do tipo proporcinal-integral (PI). A principal diferença é que, a limitação da frequência de comutação, neste caso, depende da dinâmica do controle PI. Outra questão a ser analisada é se a mesma técnica poderia ser aplicada a um conversor multinível.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a operação e o desempenho da técnica de controle de corrente por histerese em um conversor NPC de cinco níveis tipo G, com limitação da frequência de comutação. Para isso, é feito um estudo baseado em simulação e experimentação em laboratório, com o desenvolvimento de um protótipo.

O estudo baseado em simulação tem como objetivo uma análise prévia dos métodos, utilizando parâmetros que não foram possíveis de serem implementados em laboratório, neste trabalho.

O estudo baseado em experimentação objetiva validar os resultados obtidos por simulação e avaliar as especificidades da implementação do acionamento em uma situação real, mesmo que em escala reduzida.

Um dos desafios desse trabalho é fazer com que a técnica de histerese de corrente trabalhe com frequência de comutação limitada.

1.4 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento, implementação e avaliação experimental de uma estratégia de limitação da frequência de comutação de um controlador de histerese digital para um conversor de cinco níveis Tipo G, além do estudo dos efeitos da discretização do controle de corrente na sua implementação digital através do uso de um dispositivo DSP combinado com um FPGA, aplicado a acionamentos de média tensão e alta potência. Este estudo mostra que a eficácia do método de histerese de corrente multifaixa depende da frequência de amostragem, e propõe a dissociação entre a frequência de amostragem e frequência de atuação do conversor.

Outra contribuição importante é o estudo dos efeitos da discretização do acionamento, uma vez que a proposta é de implementação digital do controle, como é feito nos conversores comerciais atuais.

Neste sentido, o trabalho intitulado "A New Limited Switching Frequency Digital Hysteresis Current Control Strategy for a Five-Level Medium Voltage Induction Motor Drive" foi apresentado no XXIV Congresso Brasileiro de Automática, em outubro de

2022, em Fortaleza, Ceará. O artigo mostra o controle por histerese de corrente multifaixa digital com um circuito limitador de frequência aplicado no acionamento de uma máquina de indução e compara os resultados com a técnica convencional que limita a frequência de comutação através da taxa de amostragem.

Outro desdobramento deste estudo é o artigo intitulado "A Comparative Study of SVPD-PWM and Multiband hysteresis Through Digital Implementation for a Type-G Converter", a ser apresentado na 70ª annual conference of Petroleum and Chemical Industry Committe (PCIC), em New Orleans, EUA. O trabalho faz uma comparação da metodologia proposta com uma técnica de modulação já consolidada e usada comercialmente que é a SVPD-PWM.

1.5 Estrutura do texto

O texto está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

Capítulo 1: introdução do tema proposto, mostrando a relevância e os objetivos pretendidos com este estudo.

Capítulo 2: apresenta a teoria básica da topologia do conversor multinível utilizado, além da técnica de controle para a geração das correntes de referência que são utilizadas pela modulação por histerese de corrente.

Capítulo 3: Apresenta a técnica de modulação por histerese de corrente multifaixa, apontando a dificuldade de sua implementação digital e propondo uma solução para superar este problema.

Capítulo 4: detalha a implementação do acionamento através de simulação e implementação de protótipo em laboratório. Os resultados são apresentados e discutidos.

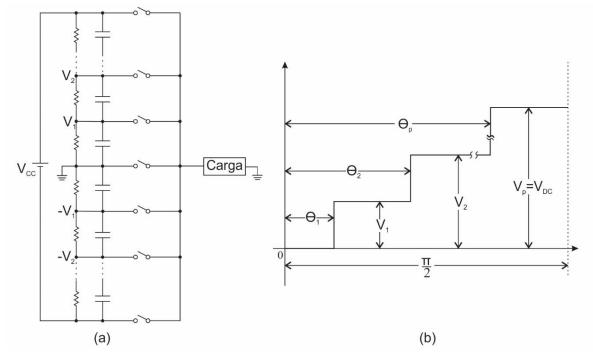
Capítulo 5: apresenta o fechamento do texto, com a conclusão do trabalho e sugestões para estudos futuros.

2 CONVERSOR MULTINÍVEL E A TÉCNICA DE CONTROLE DO ACIONAMENTO

Inversores que trabalham na faixa de média tensão possuem um problema comum para operar em altas frequências de comutação que são as limitações dos dispositivos semicondutores de alta potência. A frequência de comutação se refere ao número de vezes que o interruptor eletrônico comuta em um segundo. Toda vez que um interruptor liga ou desliga é gerada uma perda, e desse modo, quanto maior é a frequência de comutação, maior serão as perdas. Essas perdas estão diretamente ligadas à tensão de barramento e à corrente através do interruptor, desse modo, em um conversor de alta potência as perdas associadas à comutação podem elevar muito a temperatura de um interruptor levando-o ao colapso. Além disso, estes dispositivos muitas vezes são incapazes de operar com altas taxas de variação de tensão (dv/dt) e bloquear altos níveis de tensão. Uma maneira de contornar essas limitações é utilizar inversores com topologia multinível, que dividem o esforço desses semicondutores ao bloquear a tensão e permitem trabalhar com sistemas de alta potência, além de melhorar a THD das formas de onda sintetizadas sem necessariamente aumentar a frequência de comutação (LEAL, LUIZ e STOPA, 2022).

A Figura 3 mostra um conceito simples de um inversor multinível meia-ponte. O barramento c.c. é composto por uma fonte de tensão V_{CC} e divisores que produzem vários níveis de tensão intermediários. Cada interruptor é acionado em um ângulo θ diferente, variando a tensão na carga entre os vários níveis disponíveis no barramento c.c., produzindo uma forma de onda de saída em degraus que possibilita a diminuição de componentes harmônicas de baixa frequência (BHAGWAT e STEFANOVIC, 1983).

Figura 3 – (a) Esquema de um inversor multinível meia-ponte e (b) forma de onda típica da tensão de saída em degraus.



Fonte: (BHAGWAT e STEFANOVIC, 1983).

Apesar de melhorar a qualidade da forma de onda de tensão na saída do inversor, a topologia apresentada na Figura 3 ainda exige que os interruptores bloqueiem a tensão total do barramento. Desse modo, para aplicações de alta potência seria necessário, por exemplo, o uso de tiristores do tipo GTO (gate turn off), que conseguem operar com faixas de média tensão de bloqueio, porém, com velocidade de comutação limitada se comparados com os IGBTs (insulated-gate bipolar transistor). Assim, existem várias topologias de conversores multiníveis que utilizam diferentes estratégias para lidar com as altas tensões de bloqueio. Uma delas é a topologia neutral-point-clamped (NPC), bastante consolidada e utilizada amplamente comercialmente, e que está descrita na seção seguinte.

2.1 Topologia NPC

Uma topologia de inversor muito importante em aplicações de alta potência é o NPC (NABAE, TAKAHASHI e AKAGI, 1981). A Figura 4 mostra o circuito do inversor de 3 níveis NPC. O 0 indica o ponto neutro em relação ao barramento c.c., os interruptores eletrônicos S_{11} , S_{14} , S_{21} , S_{24} , S_{31} e S_{34} são os principais para a operação

do PWM. S_{12} , S_{13} , S_{22} , S_{23} , S_{32} e S_{33} são os interruptores auxiliares que grampeiam os terminais de saída no potencial do ponto neutro juntamente com os diodos D_{11} - D_{32} .

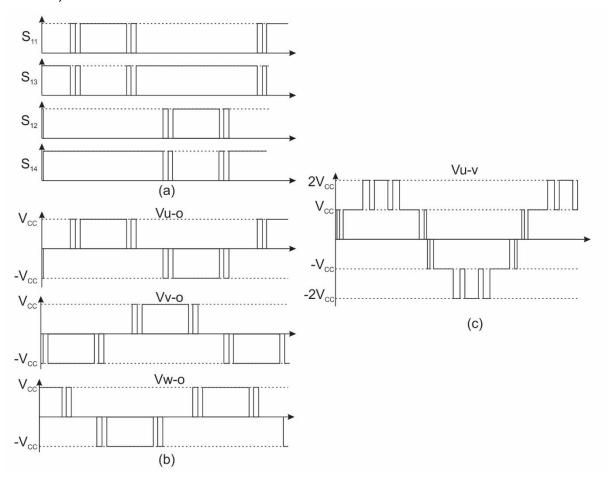
Figura 4 – Inversor de 3 níveis tipo NPC.

Fonte: (NABAE, TAKAHASHI e AKAGI, 1981).

Os interruptores eletrônicos auxiliares S_{12} e S_{13} são complementares de S_{14} e S_{11} , respectivamente. A Figura 5(a) mostra o detalhe dos sinais de comando do braço da fase U do inversor NPC de 3 níveis. Quando há o comando para desligar os interruptores principais vindo do modulador PWM, a tensão no terminal de saída é grampeada no potencial do ponto neutro, como é mostrado na Figura 5(b). A Figura 5(c) mostra a forma de onda de tensão entre os terminais de saída u-v do inversor (tensão de linha), que nesse caso fornecem 5 níveis de tensão.

Além de apresentar um melhor conteúdo harmônico nas formas de onda de saída em comparação a um inversor convencional de dois níveis, no NPC cada interruptor eletrônico bloqueia apenas metade da tensão do barramento. Isso permite que o inversor possa lidar com tensões e potências maiores. Em compensação, o conversor NPC necessita do dobro do número de interruptores, além dos diodos adicionais. Outro problema, que não ocorre em inversores de dois níveis, é a necessidade de garantir o balanceamento das tensões dos dois capacitores em série que fazem parte do barramento c.c. Uma solução é conectar cada capacitor em sua própria fonte c.c. isolada (HOLMES e LIPO, 2003). Outro método é balancear a tensão nos capacitores através de controle por realimentação como proposto em (SHUKLA, GHOSH e JOSHI, 2008) e (HATTI, HASEGAWA e AKAGI, 2009).

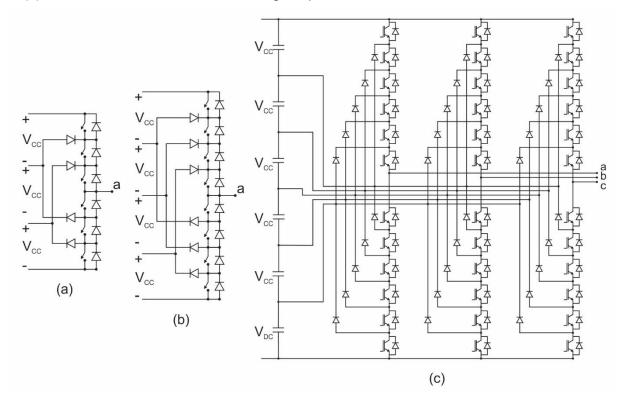
Figura 5 – (a) Sinais de comando dos interruptores eletrônicos do braço referente à fase U, (b) formas de onde de saída de tensão entre os terminais de saída e o ponto neutro e (c) tensão entre dois terminais de saída u-v do inversor NPC 3 níveis (tensão de linha).



Fonte: (NABAE, TAKAHASHI e AKAGI, 1981).

O princípio do grampeamento a diodos pode ser estendido para qualquer número de níveis de tensão utilizando-se vários capacitores conectados em série para subdividir o barramento c.c., conforme exemplificado na Figura 6 para os casos de quatro, cinco e sete níveis. Se N é o número de níveis de tensão do inversor com grampeamento a diodos, cada interruptor eletrônico deve bloquear uma tensão V_{CC} , porém, a tensão que cada diodo deve bloquear pode atingir $V_{CC}(N-1)$. Nesses casos, como são criados vários níveis de tensão intermediários, manter o balanceamento das tensões dos capacitores em série é um problema desafiador, já que o uso de fontes c.c. isoladas aumenta consideravelmente o custo dos equipamentos, sendo mais indicado o uso de algoritmos de controle apropriados.

Figura 6 – (a) Braço de um inversor a diodos de quatro níveis e (b) um de cinco níveis, e (c) um inversor de sete níveis com grampeamento a diodo.



Fonte: (HOLMES e LIPO, 2003).

A topologia NPC possui algumas variações, dentre elas a NPC Tipo G, que é descrita na seção seguinte.

2.1.1 NPC Tipo G

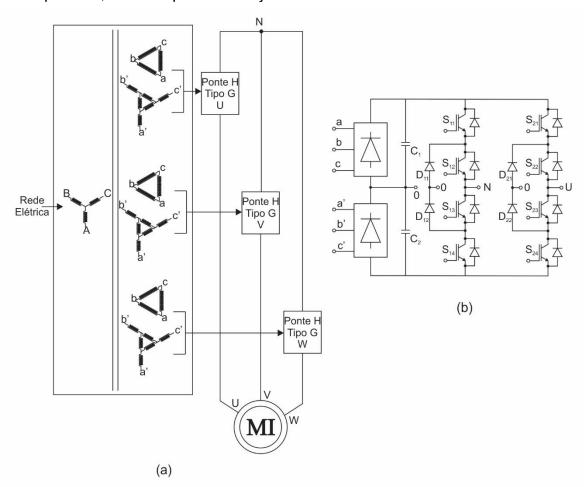
O inversor NPC Tipo G foi apresentado pela primeira vez por HILL e HARBOURT, (1999), e produzido pela GE. A configuração do circuito de potência está representada na Figura 7(a), que mostra três pontes H conectadas em um ponto neutro comum. Cada ponte é alimentada por dois retificadores trifásicos isolados, que ajudam no balanceamento das tensões dos capacitores. A necessidade de transformadores especiais é uma desvantagem dessa topologia. O transformador Y-Δ estendido é utilizado para a redução do conteúdo harmônico na corrente de entrada dos retificadores.

Cada ponte H do inversor NPC é formada por dois braços idênticos aos utilizados no NPC de três níveis convencional, como mostra a Figura 7(b). Esta

topologia fornece cinco níveis de tensão de fase na saída do inversor, e nove níveis na tensão de linha, melhorando a THD.

Essa topologia é utilizada comercialmente, como exemplo do inversor de frequência de média tensão modelo MVW01 do fabricante WEG, ilustrado na Figura 8. O MVW01 consegue lidar com motores com tensão nominal de 2,3 a 6,9 kV, e faixa de potência de 500 a 49.000 hp. A Toshiba também oferece um acionador de média tensão com topologia NPC Tipo G, o modelo Dura-Bilt5i MV, cujo esquema é apresentado na Figura 9. O Dura-Bilt5i MV opera motores de 2.300 a 4.160 V e potência de 200 a 10.000 hp.

Figura 7 – (a) Configuração do circuito de potência do inversor NPC Tipo G e (b) seu módulo ponte H, formado por dois braços de um inversor NPC três níveis.



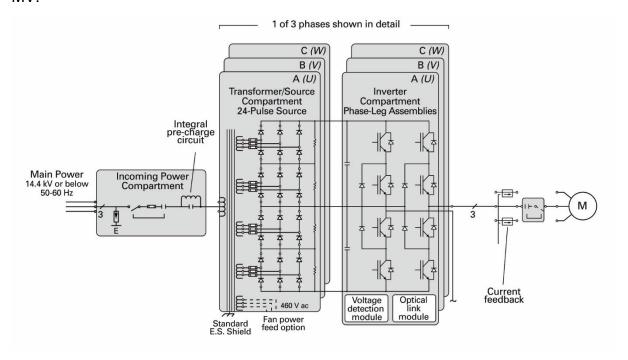
Fonte: (LUIZ e STOPA, 2015).

Figura 8 – Inversor de frequência de média tensão modelo MVW01 da WEG.



Fonte: (WEG, 2023).

Figura 9 – Esquema do circuito de potência do inversor Toshiba modelo Dura-Bilt5i MV.



Fonte: (TMEIC, 2023).

O inversor NPC Tipo G pode ser comandado por várias técnicas de modulação, incluindo o controle por histerese de corrente, como é mostrado mais adiante neste trabalho.

2.2 Controle vetorial por orientação de campo do rotor

Para implementar o controle vetorial por orientação de campo do rotor, uma maneira muito útil e compacta de representar as equações da máquina de indução é através do uso da notação em variáveis complexas. Dessa forma, sua representação é feita por vetores espaciais com eixos de referência dq rotativos com velocidade ω_e , sendo a tensão de estator $\overrightarrow{v_s^e}$ e a tensão de rotor $\overrightarrow{v_r^e}$ dadas por

$$\overrightarrow{v_S^e} = r_S \overrightarrow{l_S^e} + \frac{d}{dt} \overrightarrow{\lambda_S^e} + j\omega_e \overrightarrow{\lambda_S^e}$$
 (6)

$$\overrightarrow{v_r^e} = r_r \overrightarrow{\iota_r^e} + \frac{d}{dt} \overrightarrow{\lambda_r^e} + j(\omega_e - \omega_r) \overrightarrow{\lambda_r^e}$$
 (7)

onde

$$\overline{\lambda_S^e} = L_S \overline{\iota_S^e} + L_m \overline{\iota_r^e} \tag{8}$$

$$\overline{\lambda_r^e} = L_r \overline{\iota_r^e} + L_m \overline{\iota_s^e} \tag{9}$$

 L_m , L_s e L_r são, respectivamente a indutância mútua, indutância própria de estator e indutância própria de rotor. r_s é a resistência de estator e r_r é a resistência de rotor. O conjugado é dado por

$$T_{e} = \frac{\frac{3}{2} \frac{P}{L_{m}}}{\frac{L_{m}}{L_{r}}} (\lambda_{dr}^{e} i_{qs}^{e} - \lambda_{qr}^{e} i_{ds}^{e})$$
 (10)

Para possibilitar o controle direto da produção de conjugado, os eixos dq devem ser síncronos com o enlace de fluxo de rotor, ou seja, ω_e deve ter a velocidade instantânea de $\overrightarrow{\lambda_r}$, e deve estar inteiramente em fase com o eixo d, resultando em

$$\lambda_q^e = 0 \tag{11}$$

Assumindo que o motor é alimentado em corrente, a equação vetorial de tensão de estator pode ser omitida, e, as equações com eixos síncronos com o vetor enlace de fluxo de rotor, decompostas nos eixos d e q são

$$0 = r_r i_{ar}^e + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e \tag{12}$$

$$0 = r_r i_{dr}^e + p \lambda_{dr}^e \tag{13}$$

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L_r i_{qr}^e = 0 \tag{14}$$

$$\lambda_{dr}^{e} = L_{lr}i_{dr}^{e} + L_{m}(i_{ds}^{e} + i_{dr}^{e}) \tag{15}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_r} \frac{L_m}{L_r} \left(\lambda_{dr}^e i_{qr}^e \right) \tag{16}$$

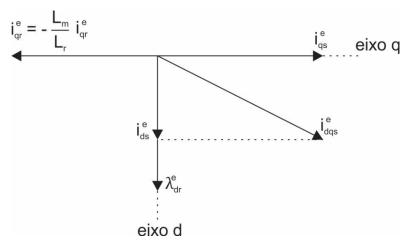
Nesse modelo, temos um "desacoplamento" nas equações da máquina. A componente de corrente de eixo em quadratura i_{qs}^e é responsável pelo comando direto de conjugado, enquanto a componente de eixo direto i_{ds}^e atua diretamente no fluxo do rotor, como pode ser percebido no diagrama fasorial da Figura 10.

Dada a dificuldade de se medir (ou calcular) o ângulo do vetor enlace de fluxo do rotor, o mais usual é a utilização do controle por orientação indireta de campo, que se baseia na relação de escorregamento da Equação 17, que é obtida a partir da Equação 12.

$$\omega_e - \omega_r = S\omega_e = -\frac{r_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} \tag{17}$$

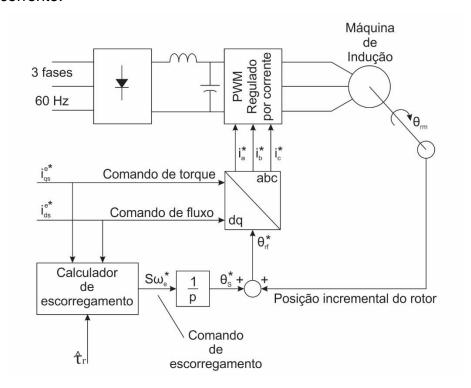
Se a relação de escorregamento é satisfeita, a componente de corrente do estator i_{ds} estará alinhada com o vetor enlace de fluxo do rotor. A Figura 11 ilustra a estrutura básica de um acionamento com controle por orientação indireta de campo utilizando comandos de corrente como entrada. A informação sobre a posição do rotor é obtida diretamente de um *encoder* acoplado ao eixo do motor. O ângulo do campo do rotor θ_{rf} é determinado pela soma do sinal de posição do rotor e o sinal de posição do escorregamento.

Figura 10 – Componentes d e q das correntes do motor referencial rotativo síncrono como o fluxo do rotor.



Fonte: (NOVOTNY e LIPO, 1996).

Figura 11 - Sistema básico de orientação indireta de campo em máquina de indução usando um modulador PWM regulado por corrente.



Fonte: (NOVOTNY e LIPO, 1996).

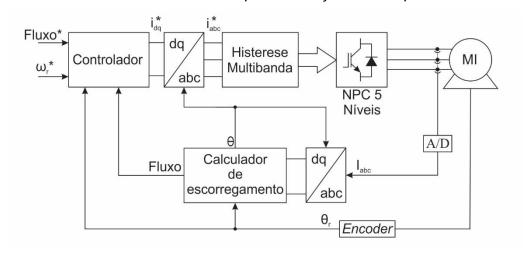
Neste caso, para usar as variáveis i_{ds}^{e*} e i_{qs}^{e*} como entrada, a relação de escorregamento é dada pela Equação 18, obtida na associação das Equações 17, 14 e 15.

$$S\omega_e^* = \frac{\left(\frac{1}{\hat{\tau}_r}\right)i_{qs}^{e^*}}{\left(\frac{1}{1+p\hat{\tau}_r}\right)i_{ds}^{e^*}} \tag{18}$$

onde $au_r = rac{L_r}{r_r}$ é constante de tempo rotórica.

No acionamento proposto neste trabalho, a componente i_{ds} é obtida através de uma referência de fluxo de rotor, que neste caso é considerado constante. A componente i_{qs} é obtida através de uma malha de controle de velocidade. O diagrama do acionamento completo está representado na Figura 12, no qual o motor de indução é acionado por um inversor de 5 níveis NPC Tipo G, que por sua vez é comandado por um modulador do tipo histerese de corrente multifaixa. O controle é vetorial por orientação indireta de campo de rotor. Além da malha de velocidade, foi implementada ainda uma malha de controle para o fluxo, que é pouco usual, porém, reduz consideravelmente o tempo de execução da simulação. O controlador é detalhado na Seção 2.2.1.

Figura 12 - Diagrama completo do acionamento da máquina de indução por inversor NPC 5 níveis, comandado por histerese de corrente multifaixa e com controle vetorial por orientação de campo.



Conforme pode ser observado na Figura 12, o cálculo da relação de escorregamento depende das variáveis de corrente no motor que são medidas, e, no acionamento com implementação digital, são amostradas por um conversor analógico/digital (A/D). No processamento digital do controle existe um atraso inevitável nos comandos do conversor devido ao tempo de execução do programa. Este atraso, normalmente, é de um período de amostragem (tempo entre uma amostra e outra). No caso do controle de corrente com eixos síncronos, este atraso resulta no erro da estimativa do ângulo que causa um erro na amplitude e fase das correntes de saída. Assim, em acionamentos com frequência de amostragem baixa, o desempenho do conversor pode ser consideravelmente comprometida (BON-HO BAE e SUL, 2001). Então, os conversores devem manter uma alta razão entre a frequência de amostragem e a frequência de saída, ou possuir maneiras de compensar esse atraso.

O modulador que utiliza um regulador de corrente, aplica diretamente as referências de corrente geradas no controle por orientação de campo para sintetizar as correntes de estator. Mas, é possível utilizar as tensões de terminal do motor para controlar, indiretamente, as correntes. Para isso, é necessário o uso do desacoplador de tensão da Figura 13, para que seja possível controlar, independentemente, as duas componentes das correntes do estator. A relação é obtida através da Equação 6 escrita em termos do fluxo do rotor em com eixo síncrono com o fluxo do rotor.

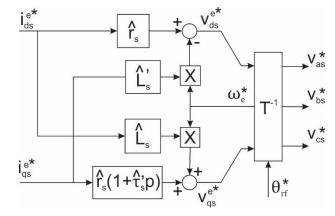


Figura 13 – Bloco desacoplador de tensão.

Fonte: (NOVOTNY e LIPO, 1996).

O desacoplador de tensão é fortemente dependente dos parâmetros da máquina, podendo gerar erros no cálculo do ângulo do fluxo do rotor. Por esse motivo,

o controle por histerese de corrente leva vantagem em relação a moduladores PWM que operam por tensão, pois utiliza a corrente como variável de atuação.

A seção seguinte mostra o detalhamento do controlador de velocidade e sua sintonia.

2.2.1 Controlador e sintonia

O diagrama esquemático do controle do acionamento é mostrado na Figura 14. O controlador possui uma malha de velocidade, que gera um sinal de erro e produz o sinal de comando. Uma malha de posição, é obtida através dos sinais de velocidade. Nessa configuração, os ganhos dos controladores b_a , k_a e k_{ia} podem ser identificadas, respectivamente, como amortecimento ativo (Nms/rad), constante de mola (Nm/rad) e rejeição de perturbações em baixas frequências (Nm/s). O conjunto conversor/motor é considerado uma fonte de conjugado ideal (ganho unitário).

Figura 14 – Controlador de velocidade.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

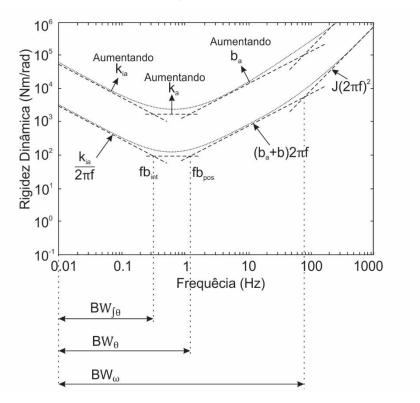
Para a sintonia do controlador, aplica-se o conceito da rigidez dinâmica, onde quanto maior a rigidez, mais imune a perturbações de carga será o acionamento

(SCHMIDT e LORENZ, 1992). É dada pela função de transferência $\left|\frac{T_l(s)}{\theta(s)}\right|$, que a partir do diagrama da Figura 14 pode ser deduzida e apresentada na Equação 19.

$$\frac{T_L}{\theta} = Js^2 + (b + b_a)s + k_a + \frac{k_{ia}}{s}$$
 (19)

A resposta em frequência da rigidez dinâmica é apresentada da Figura 15. Determinando-se as faixas passantes da malha de velocidade BW_{ω} , do sinal de trajetória BW_{θ} e da integral da trajetória $BW_{\int \theta}$, é possível fazer a alocação de polos da função de transferência.

Figura 15 – Resposta em frequência da rigidez dinâmica com malha de velocidade e posição.



Fonte: (SCHMIDT e LORENZ, 1992).

Além das malhas de controle por realimentação, foi acrescentado ao controlador o comando explícito, ou ação *feedforward*, antecipando-se o efeito do momento de inércia do motor, J, e o coeficiente de atrito viscoso b, utilizando-se os comandos de trajetória ω^* e α^* .

2.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a teoria básica a ser aplicada na implementação do acionamento com a técnica de modulação proposta. Foram descritas as características construtivas de um conversor multinível com topologia de cinco níveis de tensão na saída, o NPC Tipo G, implementado neste trabalho, suas vantagens e desvantagens.

Outro conceito importante descrito é o do controle vetorial por orientação de campo, requisito fundamental para geração das referências de corrente que serão sintetizadas pelo inversor.

O próximo capítulo descreve a técnica de modulação proposta, apontando as dificuldades na sua implementação por meios digitais, e propondo soluções para viabilizar a sua implementação.

3 CONTROLE POR HISTERESE DE CORRENTE MULTIFAIXA

No caso de um conversor multinível há um aumento na complexidade do circuito de comando dos interruptores eletrônicos, pois o controlador deve selecionar o nível de tensão adequado a ser comutado na saída. Vários métodos de moduladores por histerese para conversores multinível são descritos na literatura. Em SHUKLA, et al., (2011) alguns dos principais métodos são mostrados e comparados entre eles, a técnica multi-offset, a baseada em tempo e a multifaixa. A estratégia multi-offset é robusta e de fácil implementação, porém, é necessário um circuito adicional para compensação do offset no sinal de erro da corrente, razão pela qual este método não é amplamente aplicado. A histerese baseada em tempo possui implementação mais complexa, sendo necessária a análise do sinal derivativo da corrente, o que pode amplificar ruídos de medição, além de ser necessário dispositivos capazes de comutar mais rapidamente. Dentre as três estratégias de modulação analisadas, a histerese multifaixa apresenta um desempenho melhor, a frequência de comutação depende das larguras de faixa de histerese, e sua complexidade na implementação pode ser contornada através do uso de dispositivos digitais. Desse modo, a histerese multifaixa foi selecionada para esse estudo, para a análise de sua viabilidade na aplicação no conversor NPC de cinco níveis, analisando suas vantagens e desvantagens.

A histerese multifaixa foi apresentada pela primeira vez por MARCHESONI, (1989), e utiliza faixas de histerese simétricas para controlar a modulação, sendo uma faixa interna e mais faixas externas de acordo com o número de níveis de tensão do conversor. Assim, se um conversor possui um número n de níveis em sua saída, o comando por histerese multifaixa precisará de n-1 faixas de histerse. Sua utilização pode ser encontrada em estudos recentes como, por exemplo, a aplicação em micro redes (ELNADY e NASIR, 2022); (ELNADY e SULEIMAN, 2022), filtros ativos para eliminação de harmônicos (CHAVAN e PATIL, 2022) e acionamento de motores BLDC (RAJ, SHREELAKSHMI e GEORGE, 2020). O comportamento desse tipo de modulador é ilustrado na Figura 16 para um conversor de tensão de cinco níveis. Toda vez que o erro de corrente cruza a faixa de histerese interna h, a saída do inversor é incrementada ou decrementada de um nível de tensão, dependendo de qual limite foi cruzado e da direção da variação da corrente. Neste caso, a mudança de tensão tende a reverter o sentido do erro de corrente. Contudo, se a mudança na tensão de saída não for suficiente e a direção da corrente não se reverter, o erro continua através da

faixa h até cruzar a primeira faixa externa h_1 , e nesse momento um nível de tensão mais alto (ou mais baixo) é comutado na saída. Esse processo continua até que a corrente reverta sua direção.

Tempo h h₁ h₂ h₃

V_{DC}V_{DC}/2

-V_{DC}/2

-V_{DC}/2

-V_{DC}/2

Figura 16 – Comportamento do controle por histerese de corrente multifaixa em um conversor de cinco níveis.

Fonte: (SHUKLA, GHOSH e JOSHI, 2011).

O circuito de comando para o controle por histerese multifaixa de cinco níveis está representado na Figura 17. O erro de corrente é aplicado aos comparadores de histerese das faixas interna e externas. Os sinais dos comparadores das faixas externas passam por vibradores monoestáveis para que sejam produzidos pulsos para o incremento ou decremento do contador de 2 bits, dependendo do sinal da faixa interna. O contador, por sua vez, é responsável por guardar o nível de tensão que está sendo utilizado na saída do conversor. O sinal do contador juntamente com a faixa interna produz os sinais de comando para os interruptores eletrônicos do conversor.

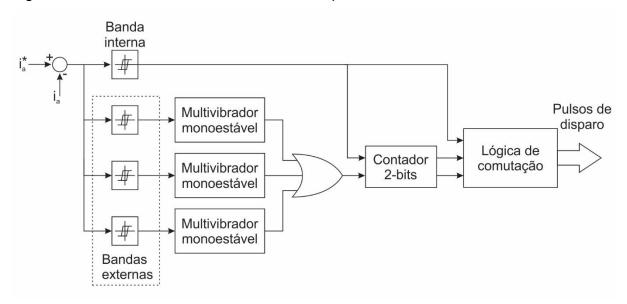


Figura 17 – Circuito de comando do controle por histerese de corrente multifaixa.

A histerese multifaixa, assim como outros métodos modulação por histerese, também apresenta a desvantagem da frequência de comutação variável. A Figura 18 mostra o exemplo da corrente e da tensão de saída de um inversor multinível operando com modulação por histerese de corrente multifaixa, com faixa de histerese interna h, para o acionamento de um motor de indução. Um ciclo de operação da histerese é dado por

$$T_1 + T_2 = T_C = \frac{1}{f_C} \tag{20}$$

onde f_c é a frequência de comutação.

Pela geometria da Figura 18 é possível afirmar que

$$\frac{di_{s}^{*}}{dt}T_{1} - \frac{di_{s}^{+}}{dt}T_{1} = 2h \tag{21}$$

$$\frac{di_s^*}{dt}T_2 - \frac{di_s^-}{dt}T_2 = 2h\tag{22}$$

onde i_s^+ é o seguimento ascendente da corrente e i_s^- o seguimento descendente, dentro da faixa de histerese h.

Através da Equação 21, podemos afirmar que a frequência de comutação depende, entre outros fatores, da faixa de histerese h. Essa é uma característica desejável, pois, desse modo é possível utilizar o valor de h para controlar f_c .

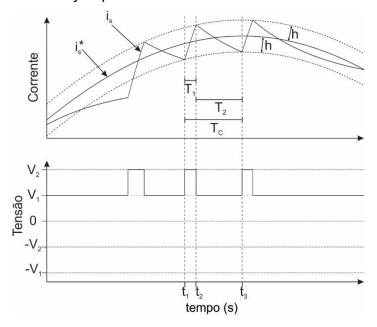
Usando a mesma abordagem feita na seção 1.1.1, com a Equação 1 e desprezando a resistência de estator, temos

$$\frac{di_s^+}{dt} \approx \frac{V_2 - e_s}{L_s'} \tag{23}$$

$$\frac{di_s^-}{dt} \approx \frac{V_1 - e_s}{L_s'} \tag{24}$$

As Equações 23 e 24 mostram que, além da faixa de histerese h, a frequência de comutação f_c também depende dos parâmetros da máquina de indução e também das condições de acionamento, que produzem diferentes níveis da força contraeletromotriz e_s . A variabilidade da tensão aplicada no estator e de e_s faz com que a frequência de comutação seja variável, e se torne muito difícil a sua determinação por métodos analíticos. Mas essa é uma característica comum a todos os métodos de histerese de corrente.

Figura 18 – Corrente e tensão de um conversor com modulação por histerese de corrente multifaixa.

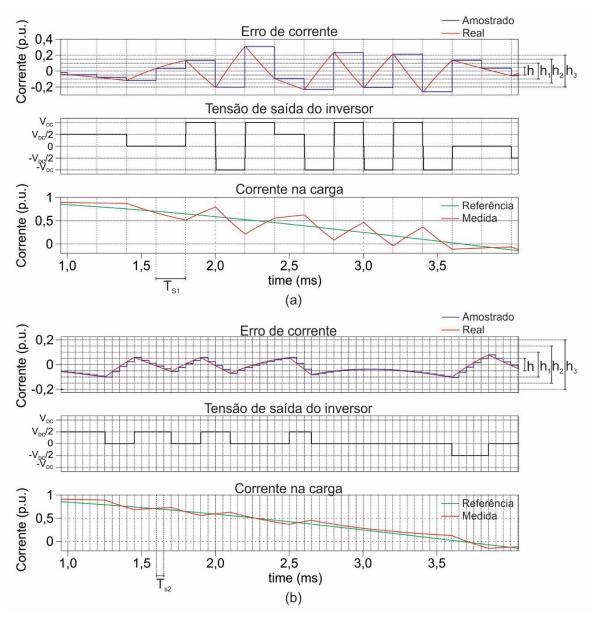


Apesar de já estar sendo implementada e estudada há algum tempo, a implementação digital da histerese multifaixa apresenta alguns desafios, como é descrito na seção seguinte.

3.1 Histerese multifaixa digital

No controle de corrente por histerese digital, o sinal de corrente é amostrado. Desse modo, a frequência máxima de comutação do inversor é limitada à metade da frequência de amostragem (RAMOS, LUIZ, et al., 2020). Isso acontece porque o inversor atua apenas uma vez a cada intervalo entre duas amostras. Essa característica é frequentemente utilizada para limitar a frequência de comutação de um conversor controlado por histerese, porém, no caso da histerese multifaixa, essa estratégia pode comprometer a qualidade das formas de onda sintetizadas na saída do inversor. A Figura 19 mostra o comportamento da histerese multifaixa com implementação digital em duas situações, sendo a primeira (a) com uma frequência de amostragem mais baixa, e a segunda (b) uma frequência de amostragem mais alta. É possível verificar que, na primeira situação, a corrente varia de forma a cruzar mais de uma faixa de histerese externa $(h_1 - h_3)$ dentro de um único intervalo de tempo T_{S1} entre uma amostra e outra. Nesse caso, o inversor troca, abruptamente, entre vários níveis de tensão em um só comando, chegando a trocar do nível mais baixo ao mais alto, e vice-versa, sem passar pelos níveis intermediários. Esse comportamento é indesejado e deve ser evitado. Grandes variações de tensão dv/dt podem causar danos aos dispositivos semicondutores ou à carga. A segunda situação mostra o mesmo inversor atuando com uma taxa de amostragem quatro vezes maior. Observase que, para um mesmo intervalo e mesma referência, o inversor recebe apenas comandos para a troca de níveis de tensão adjacentes. Isso ocorre porque a ação mais rápida do controlador permite que o erro de corrente mude seu sentido antes de atingir uma faixa de histerese externa.

Figura 19 – (a) Comportamento da histerese multifaixa com uma frequência de amostragem baixa, insuficiente para o funcionamento adequado e (b) com uma frequência de amostragem mais alta, que proporciona melhor aproveitamento da técnica.



Diante da característica da frequência de comutação variável própria do método do controle por histerese de corrente e, na dificuldade de se utilizar a frequência de amostragem para limitá-la, a solução proposta neste trabalho é a utilização de um circuito limitador de frequência no sinal de comando dos interruptores do inversor. Desse modo, é possível que o acionamento opere com uma taxa de amostragem mais alta, evitando o comportamento indesejado já descrito, e tenha uma proteção contra

uma frequência de comutação muita alta que possa exceder o limite dos interruptores eletrônicos. Os detalhes do circuito limitador de frequência e sua implementação são descritos na seção seguinte.

3.2 Circuito limitador de frequência

A Figura 20 apresenta o esquema do circuito limitador de frequência proposto. Os elementos monoestáveis geram um pulso positivo de largura fixa definida em função da frequência limite f, ou seja, a largura do pulso deve ser equivalente ao período T=1/f. Quando um pulso positivo (borda de subida) é aplicado na entrada, a saída do flip-flop RS é colocada em nível 1, o que dispara o monoestável, que por sua vez, com o auxílio das portas lógicas NOT e AND impede que um novo pulso positivo chegue até o flip-flop, até que T seja atingido. Assim, o circuito promove um atraso em um pulso de entrada que tenha uma frequência maior que a frequência limite f, ou seja, uma distância mínima entre dois pulsos positivos é garantida. A mesma lógica é aplicada para pulsos com borda de descida, limitando a frequência do sinal de entrada em f.

Entrada Saída R Q

Figura 20 - Circuito limitador de freguência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 21 mostra o comportamento do circuito limitador de frequência, para impor um limite de $2.500~\rm Hz$ ao sinal de entrada. Quando um pulso é aplicado com um ciclo de $350~\mu s$ ($2857~\rm Hz$), o sinal de saída tem seu desligamento atrasado, fazendo com que o ciclo dure por $400~\mu s$ ($2500~\rm Hz$).

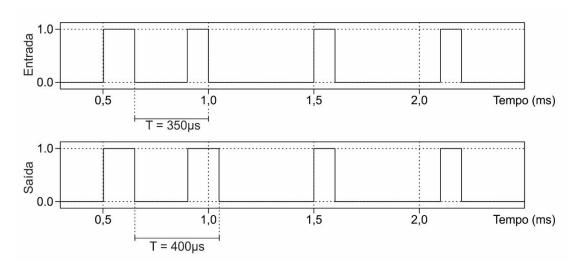


Figura 21 – Comportamento do circuito limitador de frequência.

Para a implementação do acionamento completo, o controle de velocidade, que gera as referências de corrente para o modulador, e o modulador devem trabalhar de maneira assíncrona com relação ao limitador de frequência. Desse modo, o circuito limitador de frequência não dependerá da frequência de amostragem do controle, permitindo sinais de comando mais precisos para os interruptores eletrônicos. Isso leva a necessidade de duas unidades de processamento independentes, como mostrado na Figura 22, onde um DSP é responsável pelo controle de velocidade e modulador por histerese, e um FPGA é responsável pela lógica de comutação e os limitadores de frequência. Caso todo o circuito lógico seja implementado no DSP, os circuitos limitadores de frequência seriam processados em sequência. Neste caso, a velocidade de processamento para os 24 interruptores eletrônicos poderia causar atrasos nos sinais de comando da mesma ordem de grandeza do tempo morto gerado nos drivers de acionamentos dos interruptores (microsegundos), podendo prejudicar a precisão desses sinais. O FPGA proporciona o processamento em paralelo para cada um dos limitadores de frequência dos 24 interruptores, promovendo uma precisão da ordem de nanosegundos para os sinais de comando. Além disso, sua atuação fica independente da frequência de amostragem do DSP.

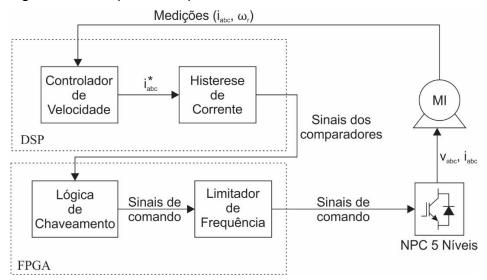


Figura 22 – Esquema do processamento do acionamento.

3.3 Conclusão

Este capítulo apresentou o método de modulação por histerese de corrente multifaixa, mostrando suas vantagens e desvantagens. Sua implementação digital apresenta algumas dificuldades que podem ser superadas através do método proposto.

A técnica proposta consiste em dissociar a frequência de amostragem da frequência de atuação do conversor. É utilizado um circuito limitador de frequência nos sinais de comando dos interruptores eletrônicos para limitar a frequência de comutação ao invés de limitar a taxa de amostragem.

O capítulo seguinte mostra os resultados de simulação e experimentais para um acionamento usando a técnica proposta.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta resultados de simulação e experimentais que têm como objetivo avaliar o desempenho operacional da técnica de histerese digital multifaixa com limitador de frequência de comutação proposto neste trabalho.

Os resultados de simulação, apresentados na seção 4.1, foram obtidos a partir da implementação de um acionamento com máquina de indução de 6.000 hp, 4.160 V, 1.787 rpm, no software PLECS da PLEXIM. Cabe ressaltar que estes níveis de potência e tensão são justamente aqueles para os quais o conversor de cinco níveis Tipo G é mais indicado. Foi feita a implementação do controle em tempo discreto para que os resultados se aproximem da situação real, e para que possam ser feitas as discussões em relação às dificuldades de implementação digital da histerese de corrente multifaixa.

Dada a dificuldade prática e custos de se ter em laboratório de pesquisa um acionamento do porte do que foi utilizado nas simulações, os resultados experimentais apresentados neste capítulo, seção 4.2, foram obtidos em um acionamento com máquina de indução de 2 cv, 220 V, 1.720 rpm existente no LEACOPI/CEFET-MG.

4.1 Resultados de simulação para um acionamento de 6.000 hp

4.1.1 Parâmetros do acionamento

Os dados da máquina de indução trifásica utilizada nas simulações estão apresentados na Tabela 1. O barramento c.c. do inversor NPC é ajustado em 3.400 V. As fontes de tensão do barramento c.c. são ideais, assim como o modelo dos interruptores eletrônicos. Em inversores com comando por histerese de corrente, a faixa de histerese comumente adotada é entre 2 e 5%, neste caso a faixa de histerese interna foi ajustada para 2 % da corrente nominal da máquina, ao passo que as faixas externas foram ajustadas em 10, 15 e 20 % da corrente nominal.

Para o acionamento em questão, as faixas de passagem foram definidas como $BW_{\omega}=3~{\rm Hz}$ (malha mais interna), $BW_{\theta}=0.3~{\rm Hz}$ e $BW_{\int\theta}=0.03~{\rm HZ}$ (dez vezes menor para cada malha adiconal), obtendo-se, assim, os ganhos do controlador como $k_{ia}=4520.5~{\rm Nm/s}, k_a=26.620.0~{\rm Nm/rad}$ e $b_a=13.992.0~{\rm Nms/rad}$.

Tabela 1 – Parâmetros da máquina de indução trifásica de 6.000 hp.

Parâmetro	Valor
Potência	6.000 hp
Tensão	4.160 V/60 Hz
Número de polos	4
Velocidade Nominal	1.787 rpm
Resistência de estator	0,022 Ω
Resistência de rotor	0,022 Ω
Indutância de dispersão (Estator e rotor)	0,0008 H
Indutância de magnetização	0,0589 H
Momento de Inércia	674,971 kg⋅m²
Coeficiente de atrito	2,444 N⋅m⋅s

Fonte: (CATHEY, CAVIN e AYOUB, 1973).

4.1.2 Resultados de simulação

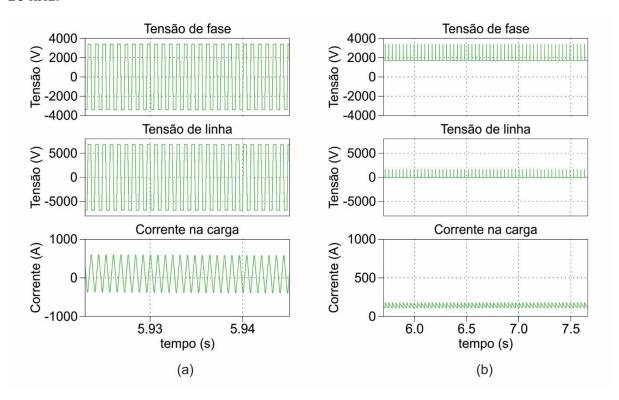
Para que fosse feita a comparação entre a técnica tradicional e a técnica proposta neste trabalho, duas situações foram simuladas, sendo que, no primeiro caso, a histerese de corrente multifaixa digital opera com uma taxa de amostragem mais baixa, de 5 kHz, com o objetivo de limitar a frequência de comutação do inversor em 2,5 kHz. No segundo caso a taxa de amostragem foi ajustada em 20 kHz, e foi usado o circuito limitador de frequência proposto na seção 3.2, com a frequência de comutação limite ajustada para 2,5 kHz.

A simulação inicia com o período de estabelecimento de fluxo da máquina em seu valor nominal de 8,89 Wb (valor obtido através de simulação), que ocorre nos primeiros 15 s. Após esse período é aplicado um sinal em rampa com duração de 4 s para referência de velocidade, com valor inicial zero e valor final 1.787 rpm, correspondente ao nominal da máquina. Após esse período, é aplicado o conjugado nominal da máquina em seu eixo (23.909 Nm). No tempo de 25 s de simulação, é aplicada uma referência de velocidade em rampa decrescente, até que o sentido de rotação seja invertido em 29 s, e atinja novamente o seu valor nominal em 33 s. O

motor é novamente desacelerado entre 38 e 42 s, quando a referência de velocidade volta a zero novamente.

A Figura 23 mostra o comportamento da tensão de fase, da tensão de linha e da corrente na fase a do motor durante o período de estabelecimento do fluxo da máquina para os dois casos estudados. Como os sinais são cíclicos, apenas um curto período é apresentado na figura para que se possa perceber os detalhes. No primeiro caso, com frequência de amostragem mais baixa de 5 kHz, a oscilação da corrente é maior, se comparada com o segundo caso com frequência de amostragem mais alta de 20 kHz. Na tensão de fase, nota-se que o conversor utiliza todo os níveis de tensão disponíveis, fazendo inclusive comutações abruptas do nível mais baixo para o mais alto, e vice-versa, em apenas uma atuação. O mesmo não ocorre no segundo caso, quando o conversor utiliza apenas dois níveis de tensão.

Figura 23 – Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor durante o período para estabelecimento do fluxo para (a) a situação onde a frequência de amostragem é de 5 kHz e para (b) o segundo caso com frequência de amostragem d 20 kHz.



As Figura 24 e Figura 25 mostram a velocidade do rotor e o conjugado (estimado) para o acionamento com a frequência de amostragem ajustada em 5 e 20 kHz, respectivamente. É possível notar que existem oscilações no conjugado com amplitudes muito maiores no caso onde a frequência de amostragem é menor, sendo de 117 % do valor nominal para o primeiro caso e 33,5 % para o segundo caso. A Figura 26 mostra no detalhe a oscilação do conjugado durante a aceleração da máquina.

Figura 24 – Velocidade do rotor e conjugado (estimado) para o acionamento do motor com modulação por histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem de 5 kHz.

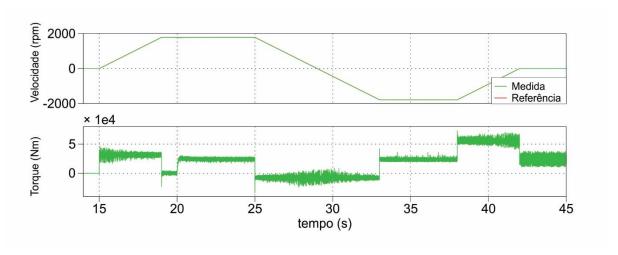


Figura 25 – Velocidade do rotor e conjugado (estimado) para o acionamento do motor com modulação por histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem de 20 kHz e circuito limitador de frequência.

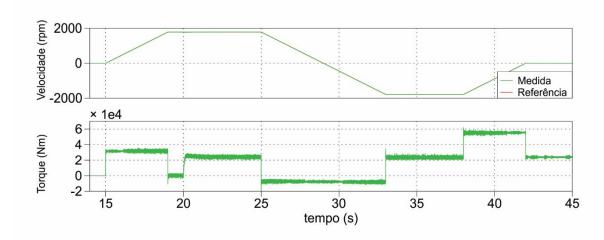
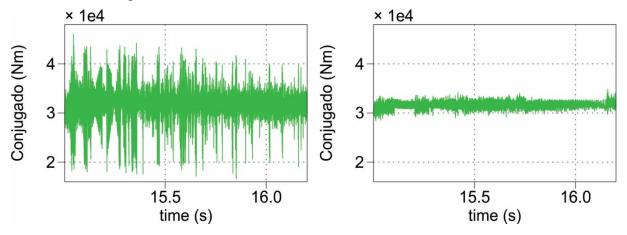


Figura 26 – Detalhe da oscilação do conjugado durante a aceleração da máquina para (a) o acionamento com taxa de amostragem de 5 kHz e (b) para o acionamento com taxa de amostragem de 20 kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

As Figura 27 e Figura 28, com a tensão de fase e a tensão de linha e corrente no motor, destacam esse período para as taxas de amostragem de 5 e 20 kHz, respectivamente. Percebe-se que há uma maior oscilação da corrente no primeiro caso, onde a comutação da tensão ocorre de forma abrupta entre todos os níveis do inversor, conforme exposto no detalhe da Figura 27. Por esse motivo, é perceptível que a maior oscilação no conjugado ocorre no período onde a velocidade é mais baixa, pois, nesse momento a força contra eletromotriz é menor, fazendo com que a corrente varie mais rápido. Esse é exatamente o problema descrito anteriormente na seção 3.1, quando o erro de corrente ultrapassa mais de uma faixa de histerese externa entre uma amostra e outra. Isso não ocorre no segundo caso, onde a frequência de amostragem é maior, o que promove uma ação mais rápida do modulador, permitindo que a comutação ocorra primeiro apenas entre níveis de tensão adjacentes, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 27 – Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor para a operação em rampa de velocidade, para acionamento com taxa de amostragem de 5 kHz.

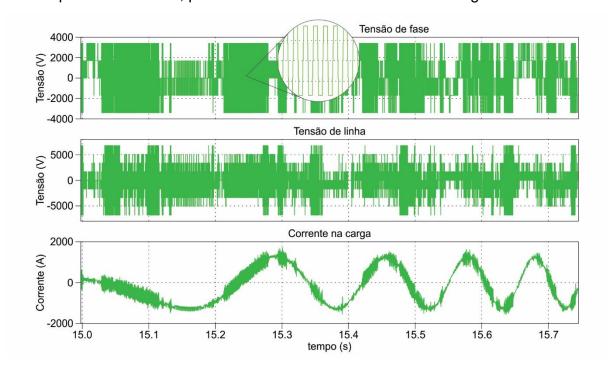
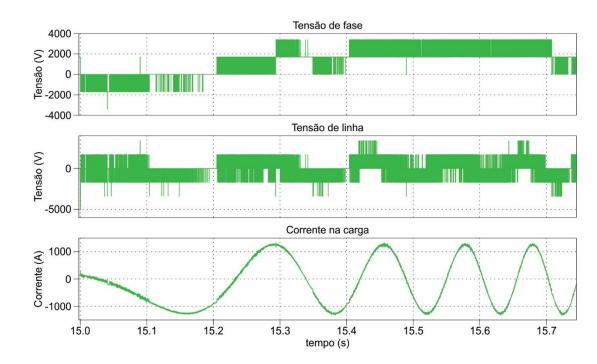


Figura 28 – Tensões da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor para a operação em rampa de velocidade, para acionamento com taxa de amostragem de $20~\mathrm{kHz}$.

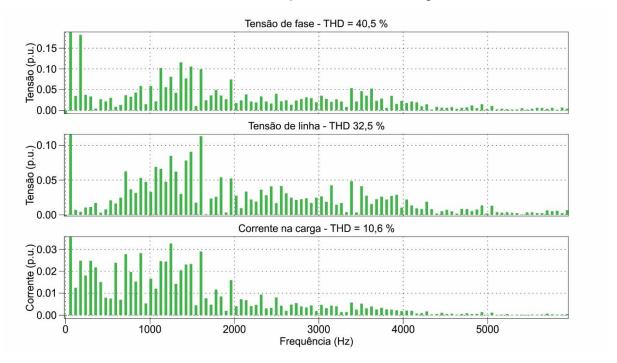


A oscilação na corrente de saída do inversor influencia diretamente na qualidade das formas de onda sintetizadas. As Figura 29 e Figura 30 apresentam o espectro harmônico das tensões de fase e de linha e da corrente na carga para as frequências de amostragem de 5 e 20 kHz, respectivamente. Como esperado, as componentes harmônicas estão espalhadas por todo o espectro, dada a característica de frequência de comutação variável da técnica de histerese de corrente. A distorção harmônica total dos sinais de tensão e de corrente estão listados na Tabela 2, na qual percebe-se uma nítida vantagem para o caso onde a frequência de amostragem é maior.

Tabela 2 – Distorção harmônica total (THD) para as tensões da fase a e de linha V_{ab} e corrente no motor para os acionamentos com frequência de amostragem de 5 e 20 kHz, com operação em regime permanente e plena carga.

	T	THD (%)		
Frequência de amostragem	5 kHz	20 kHz		
Tensão de fase	40,5	36,4		
Tensão de linha	32,5	22,9		
Corrente	10,6	5,41		

Figura 29 – Espectro harmônico dos sinais da tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor, em operação em regime permanente, para o acionamento por histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem de 5 kHz.



A variação abrupta da tensão, assim como no período de aceleração da máquina, também ocorre no período de operação em regime permanente, quando se utiliza baixas taxas de amostragem, conforme evidenciado na Figura 31. É possível observar a comutação da tensão entre mais de um nível de maneira muito rápida, conforme evidenciado no detalhe da figura. A Figura 32, onde a taxa de amostragem é mais alta, mostra um melhor comportamento do modulador, trocando primeiro entre níveis de tensão adjacentes, e formando degraus de tensão quando um novo nível é necessário.

É importante ressaltar que durante todo o acionamento nenhum interruptor eletrônico operou com frequência de comutação acima de 2,5 kHz, devido à atuação do circuito limitador de frequência. A Figura 33 mostra a atuação do circuito limitador de frequência no sinal de acionamento de um dos braços da fase A do inversor, para os interruptores S₁ e S₂. O nível lógico 1 indica que o sinal está sendo atrasado naquele momento. Durante os 45 s de simulação, foram 4.140 atuações do limitador no sinal do interruptor S₁ e 1.957 atuações no sinal do interruptor S₂.

Figura 30 – Espectro harmônico dos sinais da tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor, em operação em regime permanente, para o acionamento por histerese de corrente multifaixa com frequência de amostragem de $20 \, \mathrm{kHz}$ e com circuito limitador de frequência.

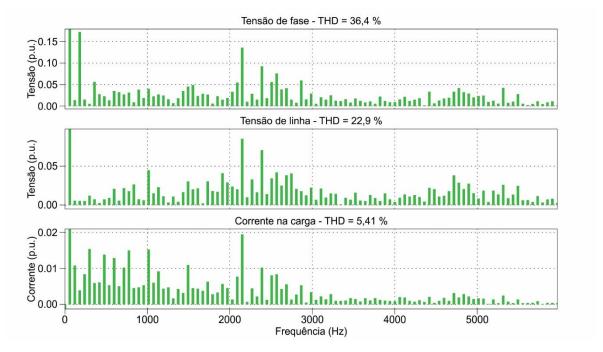
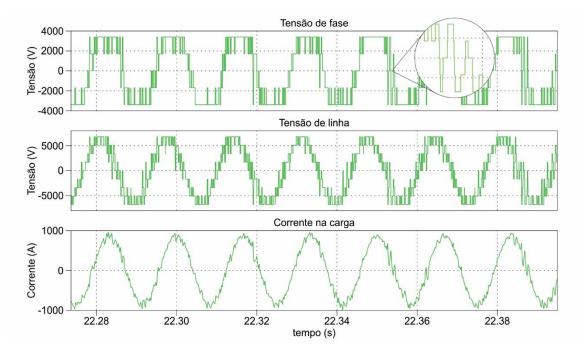


Figura 31 – Tensão na fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor em operação em regime permanente, com a frequência de amostragem de 5 kHz.



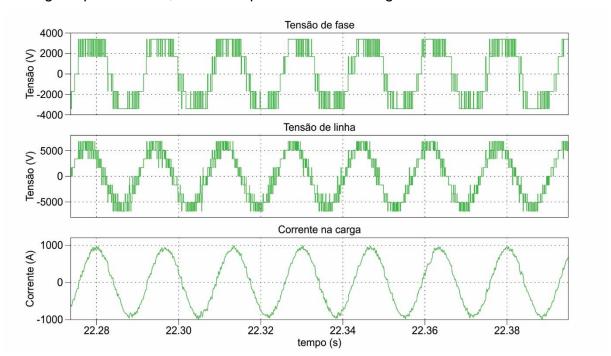
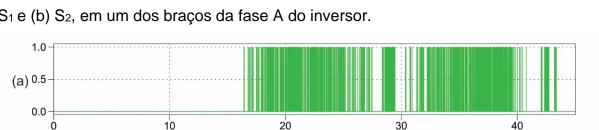


Figura 32 - Tensão da fase a, tensão de linha Vab e corrente no motor em operação em regime permanente, com a frequência de amostragem de 20 kHz.



30

40

Figura 33 – Atuação do circuito limitador de frequência para o (a) interruptor eletrônico S₁ e (b) S₂, em um dos braços da fase A do inversor.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

10

1.0

0.0

(b) 0.5

Para que fosse feita uma comparação, foi executada uma simulação com a taxa de amostragem ajustada em 20 kHz e sem o circuito limitador de frequência. Nesse caso, houve uma pequena alteração nas THDs das formas de onda de tensão sintetizadas apresentadas na Tabela 2, sendo 33,6 % na tensão de fase, 19,7 % na

20

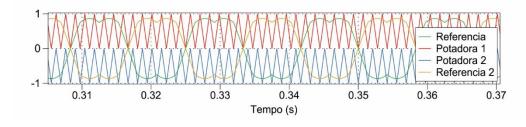
Tempo (s)

tensão de linha, demonstrando a influência no atraso gerado nos sinais de comando para a limitação da frequência de comutação. A THD da corrente na carga permaneceu inalterada em 5,41 %.

4.1.3 Comparação entre histerese multifaixa e SVPD-PWM

Neste ponto, é interessante comparar a técnica de modulação proposta com outra já consolidada e comumente empregada em conversores comerciais, como é o caso da *Space Vector Phase Disposition PWM* (SVPD-PWM). Essa técnica de modulação multinível consiste em um conjunto de portadoras triangulares deslocadas verticalmente uma da outra e comparadas com as tensões de referência. Os sinais de comando do inversor Tipo G são similares ao NPC de três níveis, e duas portadoras são necessárias para a comparação. Neste caso, duas referências de tensão deslocadas de 180º entre si são comparadas com as portadoras triangulares, assim como na técnica unipolar aplicada ao inversor de dois níveis em ponte H. A adição da componente de terceira harmônica nas referências senoidais de tensão cria os sinais de comando para o SVPD-PWM e melhora a utilização do barramento c.c. Os sinais para geração dos comandos para a modulação SVPD-PWM são mostrados na Figura 34.

Figura 34 – Sinais para geração dos comandos para modulação SVPD-PWM.

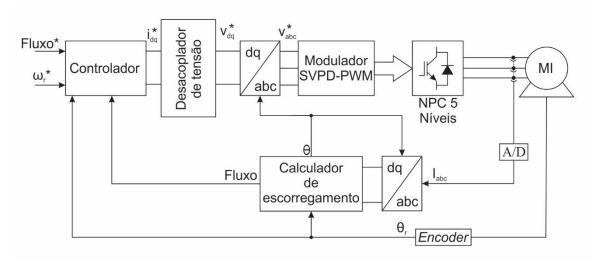


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Uma diferença importante entre os métodos de comando é que, no caso do SVPD-PWM, o modulador utiliza referências de tensão, e não corrente, como no caso do controle por histerese. Sendo assim, o acionamento precisa de uma nova etapa, que converte as referências de corrente em tensão, chamada desacoplador de tensão. O diagrama com o bloco adicional está representado na Figura 35. Uma desvantagem

deste recurso é que esse desacoplador é dependente de uma boa estimativa dos parâmetros da máquina. Esta etapa pode levar a erros de estimação do ângulo de orientação de campo, comprometendo o controle.

Figura 35 - Diagrama completo do acionamento da máquina de indução por inversor NPC 5 níveis, comandado por modulador SVPD-PWM e com controle vetorial por orientação de campo.



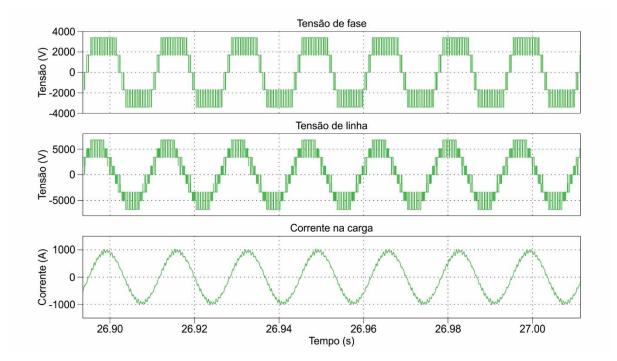
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para que fosse feita uma comparação justa, a frequência do modulador foi ajustada de modo que o número de comutações por ciclo da fundamental fosse próximo tanto no modulador por histerese quanto no modulador SVPD-PWM. Assim, a frequência da portadora foi ajustada para 840 Hz, garantindo exatamente 128 comutações por ciclo no modulador SVPD-PWM, e a faixa interna de histerese permaneceu em 2 % do valor da corrente nominal, o que leva a uma média de 120 comutações por ciclo no caso do modulador por histerese de corrente.

A Figura 36 apresenta as tensões de fase e linha e corrente na carga para o inversor com modulação SVPD-PWM, em operação do motor em regime permanente. É visualmente perceptível que as formas de onda de tensão, no caso do modulador SVPD-PWM, possuem comutações muito mais simétricas se comparadas aos resultados do modulador por histerese de corrente. Porém, as THDs de tensão são consideravelmente maiores no caso do SVPD-PWM devido, principalmente, a injeção da terceira harmônica na referência. No caso da corrente na carga a THD tem valores mais próximos, como apresentado na Tabela 3. Para comparação, os resultados da

histerese multifaixa limitada pela baixa taxa de amostragem também são retomados na tabela.

Figura 36 - Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor em operação em regime permanente, com modulação SVPD-PWM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 3 – THDs das tensões de fase, de linha e corrente na carga para os dois tipos de modutadores.

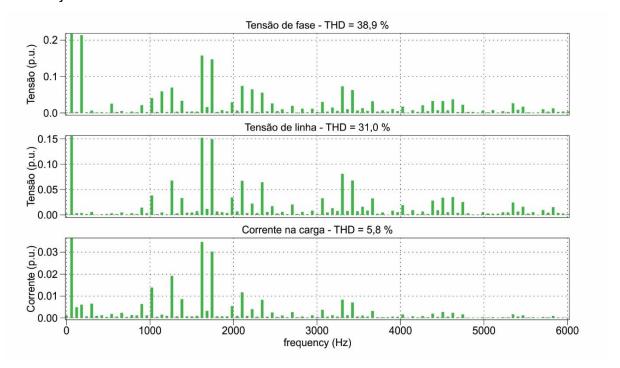
		THD	
Técnica de modulação	Tensão de	Tensão de	Corrente
	fase	linha	no motor
SVPD-PWM (amostragem 20 kHz)	38,9 %	31,0 %	5,8 %
Histerese multifaixa (amostragem 20 kHz)	36,4 %	22,9 %	5,41 %
Histerese multifaixa (amostragem 5 kHz)	40,5 %	32,5 %	10,6 %

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Outro dado importante a ser analisado é o espectro harmônico das formas de onda na saída do inversor. Conforme apresentado na Figura 37, as componentes harmônicas, no caso do modulador SVPD-PWM, estão concentradas ao redor dos múltiplos da frequência de comutação do inversor, enquanto no modulador por histerese de corrente as componentes aparecem espalhadas por todo o espectro de

frequência, devido à característica de frequência de comutação variável desse modulador.

Figura 37 - Espectro harmônico dos sinais da tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor, em operação em regime permanente, para o acionamento com modulação SVPD-PWM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.2 Resultados experimentais para um acionamento de 2 cv

4.2.1 Parâmetros do acionamento

O inversor foi implementado em laboratório para o acionamento de um motor trifásico de 2 cv. Os dados da máquina estão relacionados na Tabela 4.

Os resultados experimentais são preliminares, sendo que a metodologia de projeto do controlador não foi implementada até o fechamento do texto. A etapa de controle foi simplificada e substituída por um controlador proporcional-integral (PI), e os ganhos foram determinados empiricamente, sendo o ganho proporcional de 0,5 Nms/rad e o integral igual a 2 Nm/rad. Neste caso não foi utilizada a malha de fluxo como na situação da simulação anterior com a máquina de 6.000 hp.

Tabela 4 – Dados da máquina de indução trifásica de 2 cv.

Dados de placa		
Parâmetro	Valor	
Potência	1,5 kW/2 cv	
Tensão	220/380 V/60 Hz	
Número de polos	4	
Corrente Nominal	6,9/3,99 A	
Velocidade Nominal	1.720 rpm	
Parâmetros estimados		
Resistência de estator	1,36/4,08 Ω	
Resistência de rotor	1,62/4,87 Ω	
Indutância de dispersão do estator	0,00347/0,0104 H	
Indutância de dispersão do rotor	0,00617/0,0185 H	
Indutância de magnetização	0,0833/0,25 H	

0,018 kg·m²

0,0018 N·m·s

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Coeficiente de atrito

4.2.2 Descrição da bancada de testes

Inércia

A Figura 38 mostra o diagrama completo do *hardware* do acionamento da máquina de 2 cv. Todo o estágio de controle e a geração dos sinais dos elementos de histerese foram implementados em um DSP modelo TMS320F28335 da Texas Instruments, que foi programado com a ajuda do codificador incluso no software PLECS, da Plexim. O diagrama de blocos foi implementado no PLECS, que compila o código e grava no DSP. A lógica de comutação dos interruptores eletrônicos e os circuitos limitadores de frequência foram implementados em um FPGA modelo Cyclone IV do fabricante Altera, programado através do software Quartus. Os circuitos limitadores de frequência foram ajustados para a frequência máxima de 5 kHz.

Os sinais de comando vindos do FPGA passam por um condicionador de sinais que eleva a tensão de 0-3,3 V para 0-15 V, para a entrada dos *drivers* de acionamento dos interruptores eletrônicos. Estes *drivers* são do fabricante Semikron,

modelo Skyper 32. Os interruptores, por sua vez, são do tipo IGBT do fabricante Infineon, modelo IRG4PC40UD, tensão máxima de bloqueio de 600 V e corrente máxima de 20 A. Os IGBTs são montados sobre dissipador de alumínio com ventilação forçada. Para alimentação dos *drivers* e condicionadores de sinais foi utilizada uma fonte simétrica do fabricante ICEL, modelo PS-6000.

O DSP recebe a informação da velocidade do rotor através de um *encoder* acoplado ao eixo da máquina, que gera 1024 pulsos por volta em cada canal. Foi implementada uma lógica digital no FPGA que determina o sentido de rotação a partir dos pulsos do *encoder* e envia a informação para o DSP. Os sinais do *encoder* são condicionados passando de diferenciais em 5 V para sinais comuns em 3.3 V.

A leitura das correntes do inversor é feita através de três sensores de efeito Hall modelo LA55-P do fabricante LEM. O sinal dos sensores é condicionado antes de ser enviado ao conversor A/D do DSP, passando de um sinal de 0 a 50 mA para um sinal de 0 a 3 V.

A máquina acionada por esse inversor tem seu eixo acoplado a um segundo motor, que por sua vez é alimentado por um inversor de frequência modelo CFW09 do fabricante WEG. Este segundo motor é usado para impor conjugado na máquina estudada, operando como um emulador de cargas mecânicas.

Tabela 5 – Dados da máquina utilizada como emulador de cargas mecânicas.

Parâmetro	Valor
Potência	1,5 kW/2 cv
Tensão	220/380/440 V/60 Hz
Número de polos	4
Corrente Nominal	6,15/3,56/3,08 A
Velocidade Nominal	1.755 rpm

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A leitura dos sinais do inversor foi feita através de um osciloscópio de quatro canais modelo DPO2014B, uma sonda de alta tensão modelo P5200A e uma sonda de corrente modelo A622, todos fabricados pela Tektronix. Os dados foram salvos pelo osciloscópio e importados no PLECS para facilitar a análise e a composição das figuras.

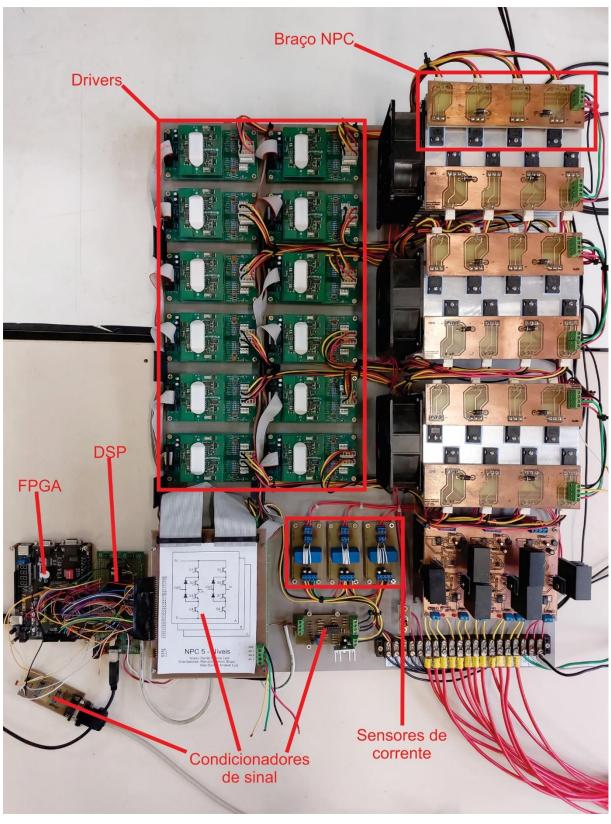
Em todos os testes, a faixa interna de histerese foi ajustada em $2\,\%$ do valor nominal da corrente do motor, e as faixas externas foram ajustadas em $8,\,12,\,$ e $16\,\%$ do valor nominal. O circuito limitador de frequência foi ajustado em $5\,\mathrm{kHz}.$

USB 21 bit **FPGA** DSP -A/B A/D A/B 24 bit Condicionador +15 V de sinais 0 - 3,3 V para 0 - 15 V +15 V Drivers de acionamento Fonte simétrica -15 V - 0 V - +15 V dos IGBTs Barramento C.C. 90+90 V 90+90 V 90+90 V NPC 5 Níveis +15 V 50 mA para 0 - 3 V Sensores de Condicionador ±15 V corrente de sinais П Ф Diferencial/Comum 0 - 5 V para 0 - 3 V Condicionador de sinais Encoder Inversor WEG Motor de indução 2 cv CFW09 Motor de indução 2 cv Emulador de cargas mecânicas

Figura 38 – Diagrama completo do hardware do acionamento da máquina de 2 cv.

A Figura 39 mostra a foto da montagem do inversor NPC tipo G implementado em laboratório.

Figura 39 – Foto da montagem do inversor NPC Tipo G.



A máquina foi conectada em triângulo, ou seja, com tensão de entrada nominal de 220 V. Com isso, a tensão total do barramento c.c. é de 180 V, ou seja, 90 V em cada capacitor, fornecendo uma tensão total de pico de 311,7 V. O ajuste da tensão foi feito com a ajuda de um varivolt da marca STP modelo ATV-245-T, de 4,5 kVA, conectado na entrada dos transformadores, sendo um transformador com dois secundários para cada fase do inversor. As saídas dos retificadores foram unidas no ponto médio do barramento para ajudar no balanceamento das tensões dos capacitores. O circuito de entrada completo está representado na Figura 40. Os transformadores são de 15 kVA do fabricante ETNA, relação de transformação 1:1:1, com o enrolamento primário em Δ e dois secundários, um em Δ e outro em Υ . Os retificadores são do fabricante Semikron, modelo SKD62/16, com tensão máxima de bloqueio de 1600 V e corrente direta máxima de 60 A, foram montados sobre dissipador de calor em alumínio. Os capacitores são uma associação de duas unidades em paralelo para cada metade do barramento, sendo uma de 470 μ F e outra de 820 μ F, ambas para 200 V.

Rede Elétrica
Trifásica
220 V/60 Hz

Transformador

A
B
C
A
B
C
A
B
C
A
Fase A
Fase B
Fase C

Figura 40 – Circuito de entrada e barramento c.c.

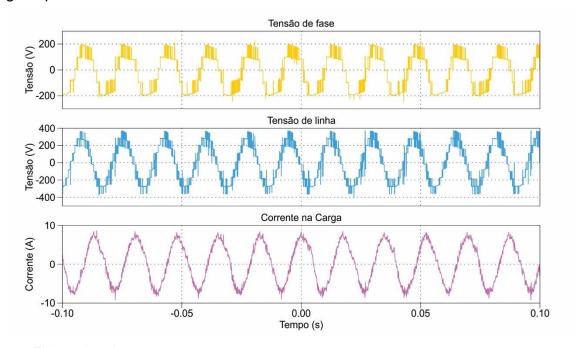
4.2.3 Resultados experimentais

4.2.3.1 Operação a vazio

O primeiro resultado é apresentado na Figura 41, que mostra as tensões de fase, de linha e corrente no motor, para a operação em regime permanente e a vazio. A frequência de amostragem da corrente é de 20 kHz. A comutação das tensões ocorre entre níveis adjacentes, conforme o comportamento adequado que se espera na modulação por histerese multifaixa. É possível notar cinco níveis de tensão de fase e nove níveis na tensão de linha. É importante ressaltar que, no período observado, nenhuma comutação excedeu o limite de 5 kHz imposto pelo circuito limitador de frequência implementado no FPGA.

O espectro de frequência das tensões de fase e de linha e da corrente na carga estão representados na Figura 42. Assim como na simulação, as componentes estão espalhadas no espectro devido à frequência de comutação variável. Neste caso, a THD da tensão de fase ficou em 31,1 %, a da tensão de linha em 26,1 % e a da corrente em 12,5 %. As componentes de valor mais alto estão ao redor da frequência de 2640 Hz.

Figura 41 – Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor de 2 cv em regime permanente a vazio e velocidade nominal.



Tensão de fase - THD = 31,1 %

Tensão de linha - THD = 26,1 %

Tensão de linha - THD = 12,5 %

Corrente na Carga - THD = 12,5 %

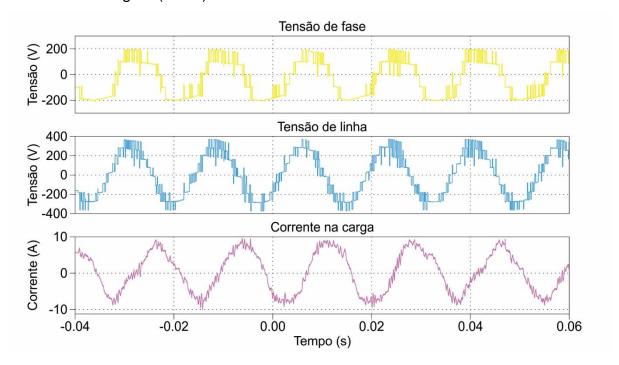
Tensão de linha - THD = 12,5 %

Tensão de linha - THD = 12,5 %

Figura 42 – Espectro de frequência da tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e da corrente no motor de 2 cv em regime permanente a vazio e velocidade nominal.

Para se ter uma comparação, o acionamento é realizado mais uma vez, porém, com uma taxa de amostragem reduzida para o valor de $10 \, \mathrm{kHz}$, ou seja, a frequência de comutação é limitada a $5 \, \mathrm{kHz}$. O resultado é apresentado na Figura 43. Nela é possível observar o comportamento indesejado já descrito anteriormente, quando o curto tempo entre uma amostra e outra faz com que o sinal de erro de corrente cruze mais de uma faixa externa de histerese, causando comutações abruptas entre mais de dois níveis de tensão com um só comando. Neste caso, as THDs das formas de onda sintetizadas sobem muito, sendo de $36,3 \, \%$ para a tensão de fase, $28,2 \, \%$ para a tensão de linha e $17,9 \, \%$ para a corrente.

Figura 43 – Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente na carga no acionamento do motor de 2 cv em regime permanente a vazio, com velocidade nominal e com baixa taxa de amostragem (5 kHz).



4.2.3.2 Operação com carga

O terceiro resultado, apresentado na Figura 44, mostra as tensões de fase e de linha, além da corrente na carga, para o motor operando em regime permanente com um conjugado estimado de 2,6 Nm. Mesmo com a carga aplica no eixo do motor a histerese continua funcionando conforme o esperado, comutando apenas entre os níveis de tensão adjacentes. A frequência de amostragem continua em 20 kHz. O espectro de frequência das tensões de fase e de linha e da corrente na carga estão representados na Figura 45. As componentes de valores mais altos dessa vez estão ao redor da frequência de 2400 Hz, um pouco menor que na operação a vazio. Neste segundo caso, a THD da tensão de fase ficou em 32,4 %, na tensão de linha de 20,1 %, e na corrente de 8,0 %, ou seja, com resultados melhores na tensão de linha e na corrente do que aqueles obtidos na operação a vazio.

Figura 44 – Tensão da fase a, tensão de linha V_{ab} e corrente no motor de 2 cv em regime permanente, velocidade nominal e com conjugado estimado de 2,6 Nm.

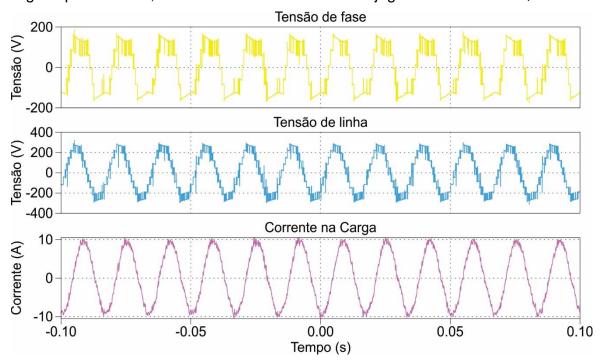
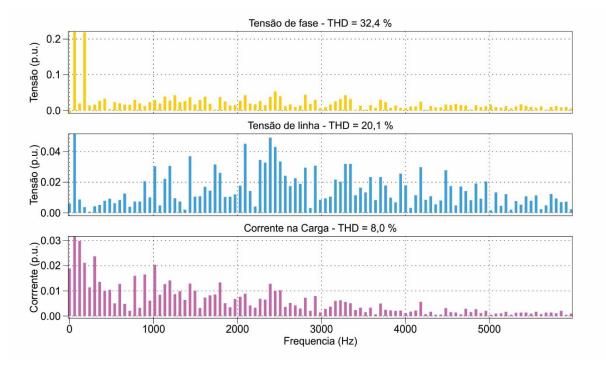


Figura 45 – Espectro de frequência da tensão da fase a, da tensão de linha V_{ab} e da corrente no motor de 2~cv em regime permanente, velocidade nominal e conjugado estimado de 2,6~Nm.



A Tabela 6 apresenta um resumo das THDs referentes aos testes realizados para a máquina a vazio e com carga. Observa-se que o caso com menores THDs é a situação na qual a máquina está sendo operada com carga e frequência de amostragem maior, de 20 kHz.

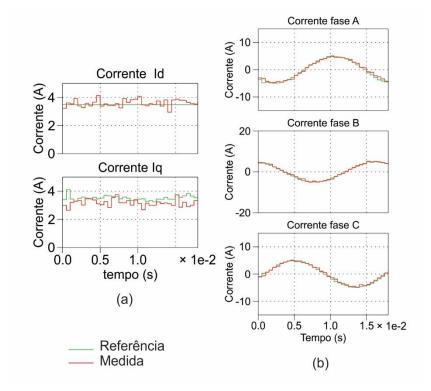
Tabela 6 - THDs das tensões de fase, de linha e corrente na carga para os acionamentos a vazio e com carga.

	THD		
	Tensão de	Tensão de	Corrente
	fase	linha	no motor
Máquina a vazio (amostragem 20 kHz)	31,1 %	26,1 %	12,5 %
Máquina a vazio (amostragem 5 kHz)	36,3 %	28,2 %	17,9 %
Máquina com carga (amostragem 20 kHz)	32,4 %	20,1 %	8,0 %

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Durante o acionamento, o DSP consegue devolver os dados de seu processamento interno através do modo de simulação externa do PLECS. Assim, é possível monitorar qualquer variável do controle durante a execução do programa. Esse recurso foi utilizado para monitorar as correntes no motor, de referência e medidas, durante a operação com carga, que estão apresentadas na Figura 46. A taxa de atualização nesse caso é baixa (200 Hz) devido à limitação do DSP, desse modo, o sinal não mostra os mesmos detalhes daqueles mostrados pelo osciloscópio, porém, é possível observar que a corrente real segue bem a referência.

Figura 46 – (a) Componentes de corrente em eixo direto I_d e eixo quadradura I_q de referência e medidas e (b) correntes das fases a, b e c de referência e medidas, para o acionamento em regime permanente e com carga estimada de 2,6 Nm, e taxa de amostragem de 20 kHz.



Outro fato importante de ser observado é a instabilidade na tensão do barramento, provocando por uma sobretensão nos capacitores. Essa instabilidae reforça a necessidade de se implementar estratégias para o controle da tensão do barramento. Em ambos os resultados apresentados, a tensão do barramento sobe além do valor esperado de 180 V, sendo que os maiores níveis são atingidos em velocidades mais baixas, conforme ilustrado na Figura 47. Nela, a tensão do barramento da fase C chega a atingir um valor superior a 300 V durante o período de partida da máquina.

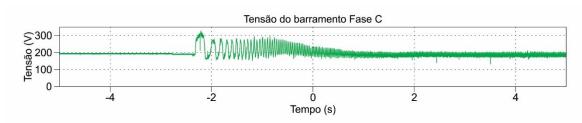


Figura 47 – Tensão no barramento c.c. da Fase C.

4.2.3.3 Operação transitória

A dinâmica do controle pode ser observada na Figura 48, onde é aplicada uma referência em rampa no comando de velocidade do controlador com duração de 4 s até que o motor atinja a velocidade nominal. Após 4 s em velocidade nominal, é aplicada uma rampa descendente, que provoca a reversão no sentido de rotação do motor, até que se atinja novamente a velocidade nominal com sentido contrário ao inicial. Os dados foram coletados através de um tacogerador do frabricante WEG modelo IRC/60 acoplado ao eixo do motor, que possui relação de 0,064 V/rpm.

Velocidade do rotor

Velocidade do rotor

-15 -10 -5 0 5 10 15 20

Tempo (s)

Figura 48 – Velocidade do rotor durante acionamento da máquina com reversão.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foi detalhada a implementação do acionamento proposto através de simulação, mostrando os detalhes de seus componentes. Os resultados servem para comparação da solução proposta no trabalho, usando o circuito limitador de frequência, com a técnica convencional, que limita a frequência de comutação através da diminuição da taxa de amostragem, quando se trata da implementação digital do controle por histerese de corrente. Os dados coletados mostram que a taxa amostragem mais alta melhora qualidade das formas de onda de tensão e corrente

na saída do inversor em termos de THD. O circuito limitador de frequência evita comutação com frequência além do limite estabelecido, atuando como uma proteção para os interruptores eletrônicos.

Os resultados obtidos no acionamento com a modulação por histerese multifaixa com limitador de frequência também foram comparados com uma técnica SVPD-PWM, amplamente utilizada comercialmente, mostrando que a técnica proposta é uma opção viável. Apesar da frequência de comutação variável, possui baixas componentes harmônicas nas saídas de tensão e corrente do inversor comparadas à técnica SVPD-PWM. Além disso, requer menos recursos computacionais quando implementada em um acionamento com controle por orientação de campo já que não necessita do uso do bloco desacoplador de tensão, que por sua vez é altamente dependente de uma boa estimativa dos parâmetros na máquina.

A implementação em laboratório através de um protótipo foi apresentada, com resultados que validam a teoria e mostram pontos que ainda necessitam de mais estudos e melhoramentos, como o controle das tensões do barramento c.c. A histerese multifaixa com alta taxa de amostragem funcionou conforme o comportamento esperado, comutando entre níveis de tensão adjacentes, mostrando vantagem sobre a técnica que usa a frequência de amostragem para limitação da frequência de comutação. Não houve comutações com frequência superior ao limite estabelecido pelo circuito limitador de frequência implementado no FPGA.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma forma de modulação por histerese de corrente multifaixa aplicada a um inversor de cinco níveis com topologia NPC tipo G. A técnica torna independentes a frequência de amostragem e a frequência de atuação do inversor, fazendo com que o controle possa atuar de forma mais adequada, melhorando o comportamento do circuito quando implementado de forma digital.

O inversor foi implementado através de simulação para acionamento de um motor de indução trifásico de 6.000 hp, alimentado em 4.160 V, faixa de operação onde é comum aplicar a topologia multinível, para diminuir os esforços dos dispositivos semicondutores e melhorar a qualidade das formas de onda sintetizadas pelo inversor. Foi utilizado o controle vetorial por orientação de campo do rotor para geração das referências de correntes utilizadas pelo modulador. Os resultados obtidos permitiram a verificação das especificidades de uma implementação digital da técnica, já que a simulação foi executada em tempo discreto.

A simulação mostrou a vantagem de se ter uma alta taxa de amostragem no caso da histerese multifaixa com implementação digital. A técnica apresenta melhores resultados nas formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor em termos de THD usando um circuito limitador de frequência nos sinais de comando dos interruptores eletrônicos ao invés de limitar a frequência de comutação através da diminuição da taxa de amostragem. Além disso, evita comutações abruptas entre vários níveis de tensão em uma mesma atuação do controlador.

A técnica proposta também foi comparada com um modulador comum, o SVPD-PWM, utilizado comercialmente, mostrando que sua aplicação é viável, apresentando vantagens em termos de utilização de recursos computacionais e dependência de uma boa estimativa dos parâmetros da máquina, uma vez que o controle por histerese de corrente não utiliza o desacoplador de tensão.

Foram obtidos resultados experimentais em uma máquina de indução menor, de 2 cv. O controle vetorial por orientação de campo do rotor foi executado em um DSP, que recebe as informações dos sinais de corrente e posição do rotor no motor de indução. O do circuito limitador de frequência e lógica de comutação dos interruptores eletrônicos foram implementados em um FPGA. Os resultados obtidos em laboratório validam os resultados obtidos em simulação, e permitem verificação da dificuldade de controle das tensões dos capacitores do barramento c.c.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Analisando os resultados obtidos neste estudo, surgem novas questões que merecem uma análise mais detalhada, e desperta-se o interesse em novos estudos, entre elas pode-se citar:

- Proposição de um método para controle da tensão dos capacitores do barramento c.c., como por exemplo através da otimização da escolha dos vetores de tensão utilizados na comutação do inversor;
- Mesclar a técnica de comutação unipolar com a histerese de corrente multifaixa para minimizar as perdas por comutação dos interruptores eletrônicos;
- Implementar o conversor NPC Tipo G com controle por histerese de corrente multifaixa para outras aplicações, como por exemplo em compensadores estáticos de potência;
- Implementar o acionamento em protótipo de maior potência existente no laboratório;
- Incorporar o controle vetorial no FPGA, eliminando o uso do DSP;
- Fazer o cálculo de perdas e temperaturas de junção nos dispositivos semicondutores;
- Aplicar a topologia associada com a técnica proposta em acionamentos com maiores frequências da componente fundamental.

REFERÊNCIAS

- BHAGWAT, P. M.; STEFANOVIC, V. R. Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-17, p. 1057 1069, Novembro 1983.
- BODE, G. H.; HOLMES, D. G. Implementation of three level hysteresis current control for a single phase voltage source inverter. *IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2000. 33-38.
- BON-HO BAE; SUL, -K. A compensation method for time delay of full digital synchronous frame current regulator of PWM AC drives. *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting*, Chicago, IL, USA, 2001. 1708-1714.
- CATHEY, J. J.; CAVIN, R. K.; AYOUB, A. K. Transient Load Model of an Induction Motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Julho 1973. 1399-1406.
- CHAVAN, P.; PATIL, B. R. Harmonic Elimination with Multilevel Inverter Based Hybrid Filter Using Artificial Intelligence Approach. 2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India, 2022. 1-6.
- ELNADY, A.; NASIR, M. Nested Multiband Hysteresis Current Control of Master-Slave Scheme for Reliable Microgrid. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2022. 1-6.
- ELNADY, A.; SULEIMAN, M. S. Comparative Analysis of Direct and Indirect Current Control of Master-Slave Scheme for Microgrid. *2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*, Singapore, Singapore, 2022. 83-89.
- GAWANDE, S. P.; RAMTEKE, M. R. Current Controlled PWM for Multilevel Voltage-Source Inverters with Variable and Constant Switching Frequency Regulation Techniques: A Review. *Journal of Power Electronics*, v. 14, p. 302 314, Março 2014.
- HATTI, N.; HASEGAWA, K.; AKAGI, H. A 6.6-kV Transformerless Motor Drive Using a Five-Level Diode-Clamped PWM Inverter for Energy Savings of Pumps and Blowers. *IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 3*, Março 2009. 796-803.
- HILL, W. A.; HARBOURT, C. D. Performance of medium voltage multi-level inverters. Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, 1999. 1186-1192.

- HOLMES, D. G.; LIPO, T. A. *Pulse Width Modulation for power converters:* Principles and Practice. USA: John Wiley & Sons, 2003.
- JENA, S.; CHITTI BABU, B.; SAMANTARAY AND M. MOHAPATRA, S. R. Comparative study between adaptive hysteresis and SVPWM current control for grid-connected inverter system. *IEEE Technology Students' Symposium*, 2011. 310-315.
- KAZMIERKOWSKI, M. P.; MALESANI, L. Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 45, p. 691 703, Outubro 1998.
- LAKSHMI, S.; MATHEW, K. Hysteresis Based Fixed Switching Frequency Current Control of a Three Phase Grid Connected Voltage Source Inverter. 2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON), Kollam, India, 2022. 1-6.
- LEAL, D. F.; LUIZ, A.-S. A.; STOPA, M. M. A New Limited Switching Frequency Digital Hysteresis Current Control Strategy for a Five-Level Medium Voltage Induction Motor Drive. *Congresso Brasileiro de Automática*, Fortaleza, 2022.
- LINCA, M.; SURU, C. V.; PREDA, P. A. Indirect Current Control Algorithm Implementation for an Active Filtering System Using Constant Switching Frequency Hysteresis Controllers. 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, 2018. 1-6.
- LIPO, T. A.; HOLMES, G.; HOLMES, D. G. *Power Converters:* Principles and Practice. New Jersey: Wiley, 2003.
- LUIZ, A. -S. A.; STOPA, M. M. An Alternative Five Level NPC Converter for Medium Voltage AC Drives and Technical Issues. *Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, v. I, p. 6, Dezembro 2015.
- MARCHESONI, M. High performance current control techniques for applications to multilevel high power voltage source inverters. *20th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1989. 672-682.
- NABAE, A.; TAKAHASHI, I.; AKAGI, H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-17, p. 518 523, Setembro 1981. NOVOTNY, D. W.; LIPO, T. A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives*. New York: Claredon Press, 1996.
- PATIL, R. M.; DHOTE, V. P.; THOSAR, A. Comparative Study of PWM Techniques to Feed Permanent Magnet Synchronous Motor. *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*, Coimbatore, India, 2018. 1-6.

- RAJ, R. A.; SHREELAKSHMI, M. P.; GEORGE, S. Multiband Hysteresis Current Controller for Three Level BLDC Motor Drive. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2020. 1-6.
- RAJASEKHAR, A. N. V. V.; RAMADEVI, B. MHCC Modulation Technique for CHB Multilevel Inverter Based DSTATCOM. 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), Tirunelveli, India, 2018. 772-775.
- RAJU, A.; CHERIYAN, E. P.; RAMCHAND, R. Nearly Constant Switching Frequency Hysteresis Current Controller for Multilevel Inverter based STATCOM. *TENCON 2019 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Kochi, India, 2019. 176-180.
- RAMOS, G. V. et al. Assessment and implementation of an optimized Digital Hysteresis Current Control for a low cost Three-level Boost Rectifier in Metal Industries. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2020. 1-8.
- RASHID, M. H. *Eletrônica de potência:* Dispositivos, Circuitos e Aplicações. 4ª. ed. São Paulo: Pearson, 2014.
- SCHMIDT, P. B.; LORENZ, R. D. Design principles and implementation of acceleration feedback to improve performance of DC drives. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 3*, Maio-Junho 1992. 594-599.
- SHUKLA, A.; GHOSH, A.; JOSHI, A. Control Schemes for DC Capacitor Voltages Equalization in Diode-Clamped Multilevel Inverter-Based DSTATCOM. *IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2*, Abril 2008. 1139-1149.
- SHUKLA, A.; GHOSH, A.; JOSHI, A. Hysteresis Modulation of Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 5, May 2011. 1396-1409.
- SINGH, J. K.; BEHERA, R. K. ysteresis Current Controllers for Grid Connected Inverter: Review and Experimental Implementation. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Chennai, India, 2018. 1-6.
- SRIKAR, K.; PETER, J.; RAMCHAND, R. Comparative Analysis of Hysteresis Current Control Strategies to Achieve Nearly Constant Switching Frequency for a Two-Level Inverter Fed IM Drive. *IECON 2018 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, 2018. 433-438.
- STOJIć, D.; VEINOVIć, S.; MILINKOVIć, M. Modified Synchronous Reference Frame Based Hysteresis Current Controller. 2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 2019. 1-5.
- SURU, C. V.; POPESCU, M.; BITOLEANU, A. Hysteresis Current Controllers with Limited Switching Frequency for Electric Traction Systems with Asynchronous Motor

and Rotor Field Orientation Control. 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2023. 1-6.

TMEIC. Dura-Bilt5iMV Product Application Guide, 2023. Disponivel em: https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/D-0006-DuraBilt%20July2019-lores.pdf>. Acesso em: 10 Julho 2023.

WEG. MVW01 - Iversor de Frequência de Média Tensão, 2023. Disponivel em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h5e/h62/WEG-MVW01-inversor-de-frequencia-de-media-tensao-10413103-catalogo-pt.pdf. Acesso em: 10 Julho 2023.

YALLA, N.; BABU, N.; AGARWAL, P. A New Three-Phase Multipoint Clamped 5L-HPFC With Reduced PSD Count and Switch Stress. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, Abril 2020. 2532-2543.

APENDICE A – FOTOS ADICIONAIS DA MONTAGEM

A Figura 49 mostra a foto do conjunto de motores utilizados no laboratório juntamente com o inversor WEG, o encoder e o tacogerador. A Figura 50 mostra a foto de um dos transformadores utilizados para alimentação do barramento c.c. A Figura 51 mostra a foto da parte superior da bancada onde foram posicionados o osciloscópio, a fonte simétrica e o varivolt.

Não utilizado
Inversor WEG
CFW09

Motor principal

Motor emulador de carga

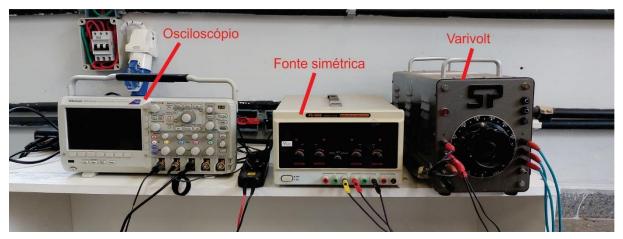
Encoder

Figura 49 – Foto dos motores utilizados no acionamento.

Figura 50 – Transformador utilizado na montagem do acionamento.

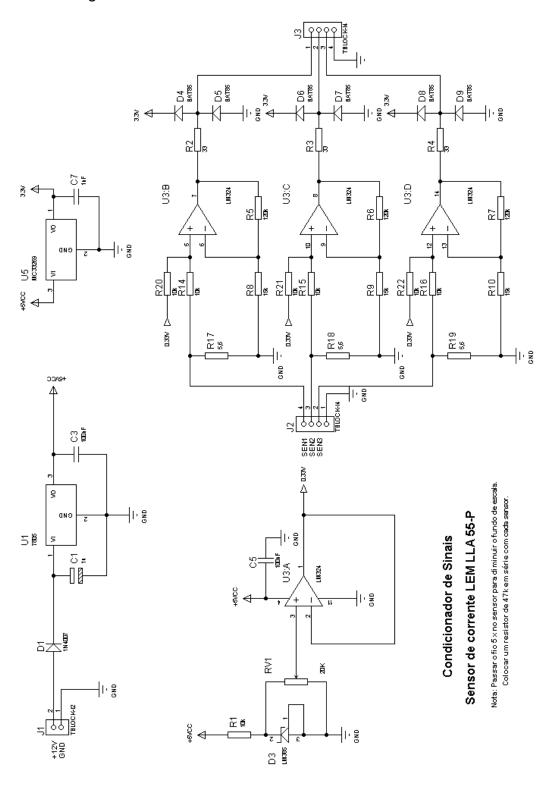


Figura 51 – Parte superior da bancada com osciloscópio, fonte simétrica e varivolt.



APENDICE B - DIAGRAMAS DOS CONDICIONADORES DE SINAIS

Figura 52 – Diagrama do condicionador de sinais dos sensores de corrente.



Saída R3 1 1k Z 1k 1 ÷2< IC2 SN7407NE4 14 17 27 27 37 6ND IC1 DS26LS32MJ C2 100nF ÷ + 25€ . C1 : 100nF +24 Para encoder

Figura 53 – Diagrama do condicionador de sinais do *encoder* de posição do motor.

Figura 54 – Diagrama do condicionador de sinais do DSP. Representação do circuito para um sinal.

