

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS PALM DA SILVA

**MÁQUINA DE INDUÇÃO: ACIONAMENTO CONVENCIO-
NAL OU COM INVERSOR, UM ESTUDO DO CASO**

Porto Alegre

2022

MATHEUS PALM DA SILVA

MÁQUINA DE INDUÇÃO: ACIONAMENTO CONVENCIONAL OU COM INVERSOR,
UM ESTUDO DO CASO

Projeto de diplomação apresentado a banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção o título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2022

MATHEUS PALM DA SILVA

MÁQUINA DE INDUÇÃO: ACIONAMENTO CONVENCIONAL OU COM INVERSOR,
UM ESTUDO DO CASO

Este projeto de diplomação foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Thieli Smidt Gabbi, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, Brasil

Prof. Igor Pasa Wiltuschnig, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Chefe do Delet: _____

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Porto Alegre, outubro de 2022.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, que me criaram com muito amor e carinho, me deram suporte nos momentos difíceis e me aconselhavam nos momentos de incerteza.

A minha irmã, pela amizade e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, que me acompanharam e deram apoio durante toda essa jornada que foi a graduação.

Agradeço também ao professor Luiz Tiarajú que me transmitiu o seu conhecimento e deu suporte e orientação. E que estava sempre disposto a conversar e tirar dúvidas.

Agradeço também aos meus amigos que me acompanharam durante essa caminhada no curso de Engenharia Elétrica, que sem eles, seria ainda mais difícil.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar o motor de indução, mais especificamente o seu acionamento. Para a realização desse estudo, opta-se por acionar o motor de duas formas, o acionamento convencional e o acionamento com inversor de frequência. Dito isso, no decorrer do trabalho será apresentado uma base teórica, necessária para auxiliar na compreensão do trabalho e também será exposto os resultados obtidos em laboratório. Os resultados obtidos serão expostos e analisados. O objetivo deste trabalho é proporcionar mais uma fonte de estudo e informação sobre o motor de indução. O uso de inversores de frequência para acionar motores de indução implica em algumas vantagens e desvantagens. As vantagens estão relacionadas ao controle do motor, o uso de inversores permite que o operador tenha, de uma maneira mais fácil, controle sobre a velocidade do motor, o sentido de rotação do motor e a forma como o motor acelera e desacelera. Mas o uso de inversores também apresenta desvantagens, como o aumento da temperatura interna, a presença de ruído devido a presença de frequências harmônicas e a redução da vida útil do motor. Ao final do trabalho, foi concluído que, ao fazer o uso de inversores de frequência para o acionamento de um motor de indução, resultará em uma redução da vida útil do motor, essa redução está diretamente relacionada com a integridade do material isolante presente no núcleo do motor e entre as espiras que compõem os enrolamentos de armadura e do rotor. Sendo que o impacto na vida útil do motor é diretamente proporcional ao modo de uso do motor.

Palavras chave: Acionamento, Inversor de Frequência, Máquinas elétricas e Motor de Indução

ABSTRACT

This work aims to study the induction motor, more specifically its drive. To carry out this study, it is chosen to drive the motor in two ways, the conventional drive and the drive with frequency inverter. That said, in the course of the work will be presented a theoretical basis, necessary to help in the understanding of the work and will also be exposed the results obtained in the laboratory. The results obtained will be exposed and analysed. The objective of this work is to provide another source of study and information about the induction motor. The use of frequency inverters to drive induction motors implies some advantages and disadvantages. The advantages are related to engine control, the use of inverters allows the operator to have easier control over engine speed, engine direction of rotation and how the engine accelerates and slows down. But the use of inverters also has disadvantages, such as increased internal temperature, the presence of noise due to the presence of harmonic frequencies and reduced engine life. At the end of the work, it was concluded that, when using frequency inverters for the drive of an induction motor, will result in a reduction in the life of the engine, this reduction is directly related to the integrity of the insulating material present in the engine core and between the turns that make up the reinforcement and rotor windings. The impact on engine life is directly proportional to the way the engine is used.

Key-Words: Drive, Electrical Machines, Frequency Inverter and Induction Motor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVO	9
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Funcionamento de um motor de indução	11
2.2 Acionamento de uma máquina de indução	12
2.3 Acionamento eletrônico	12
2.3.1 Controle de tensão no estator	12
2.3.2 Controle de resistência no rotor	13
2.3.3 Controle de frequência	13
2.3.4 Controle de tensão e frequência	13
2.4 Inversor de frequência	13
3. MOTORES DE INDUÇÃO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA	17
3.1 Circuito equivalente do motor de indução	17
3.2 Escorregamento	18
3.3 Potência eletromagnética	19
3.4 Conjugado	19
3.5 Análise do circuito	20
3.6 Variação da frequência	21
3.7 Expectativa de vida	24
3.7.1 Perdas no ferro	24
3.7.2 Harmônicas	25
3.7.3 Distúrbios	28
4. EXPERIMENTOS PREVISTOS	31
4.1 Motor de indução	31
4.2 Modelo teórico	31
4.3 Acionamento convencional	31
4.4 Acionamento com inversor de frequência	32
4.5 Experimentos	32
4.6 Curva de aceleração	32
4.7 Levantamento da curva de aceleração	32
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
5.1 Conjugado de partida	38
6. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia, permite o desenvolvimento novos equipamentos capazes de realizar as mesmas funções empregando menos recursos, com um consumo menor, com menor custo de produção, com maior produtividade e etc.

Com o objetivo de criar uma máquina que pudesse substituir a máquina síncrona, foi desenvolvido o motor de indução, uma máquina que só depende de uma fonte de alimentação, uma fonte de corrente alternada, que apresenta um custo mais baixo para produzir e, ao contrário da máquina síncrona, apresenta um conjugado de partida sem a necessidade de uma conexão especial. Sendo assim uma máquina mais simples de acionar e implementar.

Devido a essa facilidade de implementação, o motor de indução foi incorporado amplamente no mercado, tendo aplicação residencial e industrial. Substituindo o uso da máquina síncrona em muitas situações, mas não todas, ainda existem aplicações onde a máquina síncrona ainda é a mais recomendada.

Assim, esse trabalho visa aprofundar o estudo sobre os motores de indução, especialmente a questão do seu acionamento, comparando o seu acionamento convencional e o seu acionamento com o auxílio de um inversor de frequência.

1.1 OBJETIVO

Como pode ser visto na introdução, esse trabalho tem como objetivo ser um material de apoio aos alunos que tem interesse em máquinas elétricas. Servindo de fonte de teoria e experimentos práticos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atender os objetivos propostos, este trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo eles:

O capítulo 1, a apresentação do trabalho

O capítulo 2, toda a base teórica.

O capítulo 3, efeitos que o inversor de frequência causa no motor de indução.

O capítulo 4, sobre os experimentos que seriam realizados

O capítulo 5, sobre os que de fato foram realizados

O capítulo 6, análise sobre os valores obtidos

O capítulo 7, conclusão sobre a experiência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem duas grandes divisões principais de máquinas elétricas, as máquinas de corrente contínua (CC) e as máquinas de corrente alternada (CA). As máquinas CA são classificadas em dois tipos, as síncronas e as de indução. Haja vista que a máquina de indução apresenta maior aplicabilidade segundo Fitzgerald (2014), a máquina de indução é a mais comum de todos os motores e raramente é utilizada como gerador. Chapman (2012) complementa dizendo que, embora seja possível usar a máquina de indução como motor ou como gerador, ela apresenta muitas desvantagens ao operar como gerador e, assim, somente em casos muito especiais ela é usada como gerador. Esse é um dos motivos de serem usualmente referidas como motores de indução.

O motor de indução apresenta duas grandes divisões estruturais, o rotor e o estator, que são, respectivamente, as partes girantes e fixa da máquina. No estator, a principal estrutura que se encontra é o enrolamento de armadura. No caso do rotor, há dois tipos de estruturas que podem ser encontradas em uma máquina de indução, o rotor bobinado e o rotor gaiola de esquilo.

O enrolamento de armadura tem dupla função. Quando a máquina de indução opera como motor, ele é alimentado para que a máquina funcione. Quando a máquina de indução opera como gerador, é dele que se capta a energia elétrica gerada.

O rotor bobinado é semelhante ao encontrado nas máquinas síncronas, a diferença ocorre em dois pontos. De acordo com Fitzgerald (2014) a máquina síncrona apresenta o enrolamento de campo (enrolamento do rotor) excitado por uma fonte CC, em contraste a isso, na máquina de indução circulam correntes alternadas em seus enrolamentos do rotor. A outra diferença é que os enrolamentos da máquina de indução são curto-circuitados.

O rotor do tipo gaiola de esquilo é diferente do rotor bobinado, pois seu formato realmente parece uma gaiola, formado por uma série de barras metálicas posicionadas paralelamente ao eixo do rotor e com suas extremidades curto-circuitadas por anéis metálicos.

2.1 Funcionamento de um motor de indução

O motor de indução tem sua origem na máquina síncrona, onde segundo Chapman (2012) foi observado que os enrolamentos amortecedores poderiam produzir um conjugado de

partida sem que fosse necessário alimentá-los com uma corrente de campo. Por isso são denominados motores de indução, pois a corrente que circula no rotor é induzida pelos enrolamentos de armadura, sem a necessidade de um meio físico para isso.

O fato de o motor de indução não precisar de uma fonte de alimentação para os enrolamentos do rotor pode ser uma vantagem, pois facilita a construção do motor e é um equipamento a menos para acioná-lo, mas também há desvantagens. Uma das desvantagens está relacionada a velocidade do motor de indução. Na máquina síncrona a velocidade do eixo da máquina é igual a velocidade do campo girante (campo produzido pela interação entre os enrolamentos de armadura e de campo). No motor de indução há uma diferença entre a velocidade do eixo do motor e a velocidade do campo girante (campo produzido pelo enrolamento de armadura e a reação do rotor). Fitzgerald (2014) afirma que, há uma diferença entre as velocidades do rotor e do fluxo de armadura. Essa diferença é chamada de escorregamento.

2.2 Acionamento de uma máquina de indução

Nas máquinas rotativas em geral, quando acionadas de forma convencional há a presença de uma alta corrente na partida, também conhecida como corrente transitória inicial, que ocorre devido ao campo magnético residual presente no material que compõe o núcleo, tanto do estator quanto do rotor do motor. A corrente de partida pode chegar a valores de, aproximadamente, 5 a 8 vezes o valor de corrente nominal do motor, essa corrente de valor elevado pode causar problemas a equipamentos que tenham sido conectados na mesma rede e danos ao próprio motor.

2.3 Acionamento eletrônico

Quando se fala de acionamento, há uma variedade de métodos, cada um com suas características, prós e contras. É interessante comentar desses métodos de acionamentos pois servirão de base para dar seguimento ao trabalho. Segundo Rashid (1999) elas são:

2.3.1 Controle de tensão no estator

O conjugado de um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação do estator e, conseqüentemente, a velocidade também é proporcional. Assim sendo, pode-se controlar a velocidade de um motor de indução pela tensão estatórica.

Esse método de controle é recomendado para aplicações onde precise, baixo conjugado de partida, uma faixa estreita de velocidade e um escorregamento relativamente baixo e é desaconselhado em casos em que a carga tem um conjugado constante.

2.3.2 Controle de resistência no rotor

Este método consiste em fazer uma conexão trifásica externa aos enrolamentos do rotor, onde seja possível aumentar e diminuir a resistência externa. Essa variação atua no conjugado da máquina, esse aumento do conjugado com a resistência, não é linear e depende do escorregamento e da velocidade de operação da máquina.

2.3.3 Controle de frequência

Em uma máquina de indução, o conjugado e a velocidade têm uma relação direta com a frequência de alimentação da máquina. Mas somente variar a frequência pode causar consequências indesejadas, como a redução do conjugado.

O controle da frequência, deve ser simultâneo com o controle da tensão de alimentação, pois a redução da frequência com tensão constante, poderá provocar a saturação do fluxo de entreferro, ocasionando na perda de características construtivas da máquina, como a curva conjugado-velocidade.

Com a variação da frequência também há uma variação das impedâncias internas do equipamento, podendo causar uma variação na corrente que circula nos enrolamentos internos da máquina, assim, a diminuição da frequência (sem a redução da tensão) resultaria num aumento da corrente e assim, pode danificar a estrutura da máquina.

2.3.4 Controle de tensão e frequência

Derivado do método anterior, nesse caso há um controle tanto da frequência quando da tensão. Para isso é determinada uma constante, denominada de Volt/Hertz, que serve para manter uma proporcionalidade entre tensão e frequência, assim, para quaisquer variações de frequência haverá uma variação correspondente de tensão afim de manter essa constante. Isso garante que a máquina vai se manter operando conforme foi projetada e permite que o conjugado e a velocidade sejam controlados.

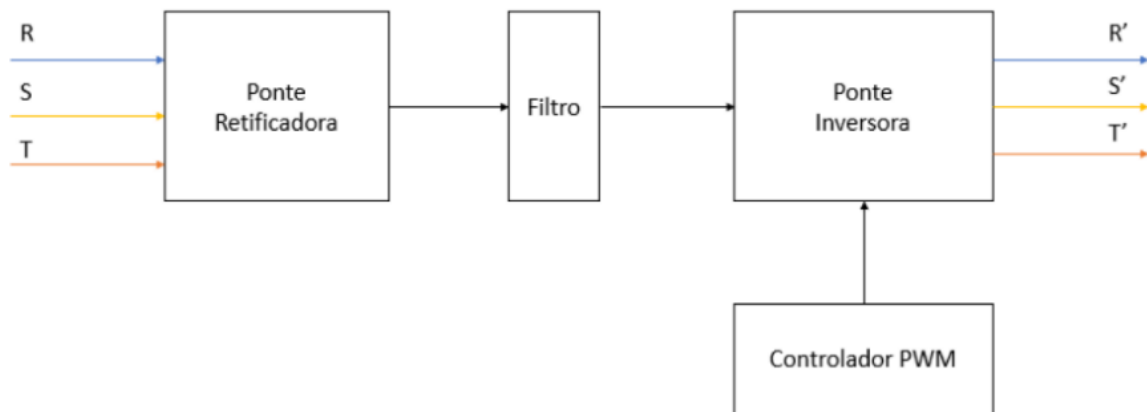
2.4 Inversor de frequência

Quando é acionado um motor de indução trifásico, com o acionamento convencional basta ligá-lo a uma fonte trifásica que ele entrará em operação. Esse método tem algumas limitações, como não controlar a sua velocidade. Para isso foi desenvolvido o inversor de frequência, que com seu auxílio é possível controlar, a alta corrente de partida, a velocidade com mais precisão, ter uma partida mais suave entre outras possibilidades.

O inversor de frequência é um dos meios mais eficientes para o controle de velocidade de um motor de indução. Com o uso de um inversor é possível dar a partida do motor e, aumentar ou diminuir a velocidade e até inverter o sentido de rotação.

O inversor de frequência, como o nome já diz, atua na frequência de alimentação do motor de indução, para isso ele trabalha com conversão CA-CC-CA.

Figura 1: Diagrama de blocos simplificado de um inversor de frequência.



Fonte: Autor, 2021.

No inversor cada bloco tem uma função específica.

A ponte retificadora e o filtro fazem parte da conversão CA-CC.

A ponte inversora faz parte da conversão CC-CA.

O controlador PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) atua na frequência da tensão de saída da ponte inversora.

Para que seja possível variar a frequência da tensão, é necessário que sejam feitas as operações mostradas no diagrama de blocos. O primeiro bloco mostra um retificador de tensão, isso porque o inversor trabalha com a tensão contínua pois a partir disso é possível alterar a frequência da tensão que alimenta o motor.

É importante ressaltar que, por se tratar de um chaveamento sequencial que resulta na variação de frequência, o formato de onda na saída do inversor de frequência pode ser aproximado de uma senoide, mas não uma senoide pura, pois o resultado desse chaveamento sequencial resulta em uma série de descontinuidades no sinal, que resultam em distorções harmônicas.

Distorções harmônicas são resultado da conversão de CC-CA, na saída do bloco inversor, há um conjunto de chaves semicondutoras que são controlados por um controlador PWM,

a função do controlador PWM é regular o chaveamento dos tiristores a fim de ter a frequência desejada na saída do inversor de frequência. Assim, a saída do inversor de frequência não é um sinal senoidal, mas uma série de pulsos que consegue ter o mesmo efeito de um sinal senoidal. Isso gera distorções harmônicas na alimentação da máquina de indução. Segundo Dias (1998), as distorções harmônicas geradas por conversores trifásicos causam como perturbação o aquecimento e perdas em máquinas rotativas. Também deve-se levar em consideração a forma como os isolantes e o esmalte dos condutores suportam o chaveamento do inversor de frequência.

Dias (1998) também afirma que a distorção harmônica de corrente em acionamentos de velocidade ajustável não é constante. Pois, a forma de onda terá diferentes formatos, dependendo dos valores de velocidade e conjugado.

Um inversor não apresenta corrente de pico que é gerada na partida de motores. Isso ocorre devido ao fato que, no inversor de frequência, a tensão de alimentação e a frequência aumentam e diminuem proporcionalmente.

Em máquinas rotativas existe uma característica construtiva denominada Volt/Hertz, que serve para mensurar a relação entre tensão e frequência. Como o aumento da tensão e da frequência é gradual e proporcional, isso mantém a magnetização do núcleo, portanto faz com que não ocorra a sobrecorrente de partida.

O inversor de frequência, geralmente, tem dois modos de controle, o modo escalar e o modo vetorial.

Segundo WEG (2021) o controle escalar é baseado no conceito original do inversor, ou seja, é baseado em manter a condição Volt/Hertz constante. A sua aplicabilidade se dá quando não há a necessidade de respostas rápidas a comandos de velocidade e conjugado e, principalmente, quando há conexão e um inversor e múltiplos motores. O controle escalar é feito em malha aberta, ou seja, é um controle mais simples e destinado a aplicações que não exijam muita precisão e rapidez no controle de velocidade

O controle vetorial opera com a decomposição da corrente de alimentação do motor de indução em dois vetores, um para a produção do fluxo magnetizante e outro para a produção de conjugado. O controle vetorial pode ser feito de duas formas, em malha aberta (*sensorless*) ou em malha fechada (com realimentação), quando operando em malha fechada, é necessário o uso de um sensor externo, como, por exemplo, um *encoder*. Segundo WEG (2021) o controle

vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle de velocidade e conjugado.

A diferença entre os dois modos é que, o modo escalar baseia-se nas amplitudes das grandezas elétricas e no circuito equivalente do motor, ou seja, é um controle baseado em equações de regime permanente do motor. Enquanto o controle vetorial admite a representação das grandezas elétricas instantâneas, ou seja, se baseia em equações dinâmicas do motor.

3. MOTORES DE INDUÇÃO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

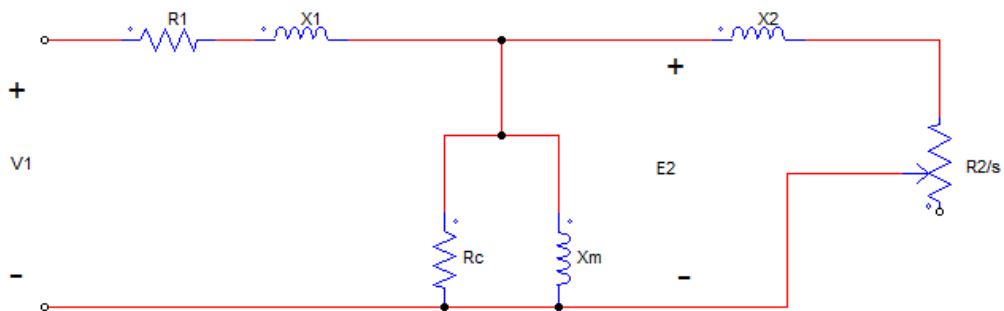
Conforme foi exposto anteriormente, o inversor de frequência é um dispositivo de controle e acionamento do motor de indução. O acionamento convencional consiste em apenas fornecer a alimentação com rede trifásica ao motor, o inversor de frequência além disso é capaz de alterar a frequência e a tensão de alimentação.

A análise do o circuito equivalente do motor de indução pode fornecer uma perspectiva do comportamento da máquina conforme a frequência varia.

3.1 Circuito equivalente do motor de indução

A Figura 2 representa o circuito equivalente do motor de indução. Esse modelo já é bem consolidado e amplamente aceito no ramo acadêmico. Assim sendo, parte-se para a análise do circuito.

Figura 2: Circuito equivalente do motor de indução



Fonte: Autor (2022)

Em que,

V_1 : Tensão de fase de terminal do estator;

E_2 : Força contra-eletromotriz gerada pelo fluxo de entreferro resultante;

I_1 : Corrente do estator;

R_1 : Resistência efetiva do estator;

X_1 : Reatância de dispersão do estator;

R_c : Resistência de perdas no núcleo;

X_m : Reatância de magnetização;

$\frac{R_2}{s}$: Resistência do rotor, de acordo com o escorregamento;

R_2 : Reatância de dispersão do rotor.

Com essas informações em mãos, dar-se-á início a análise dos efeitos da variação da frequência no motor de indução.

3.2 Escorregamento

O escorregamento é a diferença entre a velocidade de rotação do eixo do motor e a velocidade de rotação do campo girante presente dentro o motor. Assim o escorregamento pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

Onde n_s é a rotação síncrona e n é a rotação do motor.

A rotação síncrona é determinada a través da equação.

$$n_s = \left(\frac{120}{P} \right) f_e \quad (2)$$

Onde f_e é a frequência elétrica da fonte de alimentação.

Com isso tem-se o primeiro limite do motor de indução, a sua velocidade pode se aproximar a rotação síncrona, mas nunca será igual, sempre será inferior, quando operando como motor.

Também pode-se notar que ao alterar a frequência de alimentação, também se altera a rotação síncrona, como o escorregamento está diretamente relacionado ao motor de indução, é importante analisar as consequências que isso implica no motor.

Como pode ser observado no circuito equivalente, o escorregamento está presente no lado direito do circuito, que representa a parte do rotor. Ou seja, o escorregamento está diretamente relacionado com o movimento, a potência e o conjugado do rotor, o que é de se esperar, tendo em vista que o escorregamento é justamente a relação de diferença que há no rotor. Com isso, é interessante focar a análise, principalmente, para as grandezas relacionadas ao rotor do motor de indução.

3.3 Potência eletromagnética

A potência eletromagnética não é a potência que o eixo do motor entrega para o sistema que ele opera. Pois ainda tem as perdas rotacionais, que são relacionadas ao atrito do eixo do rotor, da ventilação dentre outras. Mas, para fins de cálculo, e demonstrações opta por usar esse parâmetro, pois as perdas rotacionais são oriundas de características construtivas da máquina. Assim, para determinar a potência eletromagnética é preciso saber que, como existe o escorregamento, ele representa uma perda de potência. Assim, tem-se que:

$$P_{elet} = P_g - P_{rotor} \quad (3)$$

Onde:

P_g = potência no entreferro;

P_{rotor} = potência no rotor.

Que podem ser definidas como:

$$P_{elet} = n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) - n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (4)$$

Simplificando, tem-se:

$$P_{elet} = n_{fases} I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (5)$$

Com isso determina-se a relação entre a potência eletromagnética e o escorregamento.

Onde:

n_{fases} = número de fases;

I_2 = corrente no rotor.

3.4 Conjugado

Depois de determinar a relação entre a potência eletromagnética e o escorregamento, é interessante determinar o conjugado também. Pois há uma relação direta com a potência eletromagnética. Assim, para determinar o conjugado mecânico (τ_{mec}) tem-se:

$$\tau_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{P_{mec}}{(1-s)\omega_s} \quad (6)$$

Como P_{mec} já foi determinado:

$$\tau_{mec} = \frac{n_{fases} I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)}{(1-s)\omega_s} \quad (7)$$

Logo:

$$\tau_{mec} = \frac{n_{fases} I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\omega_s} \quad (8)$$

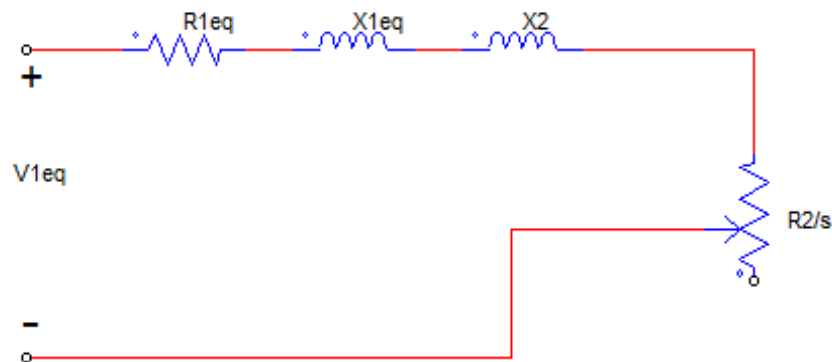
Com isso, conclui-se a determinação entre o conjugado e o escorregamento. Haja vista que a potência e o conjugado têm uma similaridade muito grande, a partir desse ponto somente será tratado o conjugado, pois qualquer alteração no conjugado resultara em uma alteração proporcional na potência.

3.5 Análise do circuito

A pesar de já se haver determinado uma equação que relacione o conjugado com o escorregamento, há um problema nessa equação é difícil medir a corrente que circula no rotor (I_2) pois os rotores de motores de indução são curto-circuitados. Assim, para que seja possível determinar como o conjugado se relaciona com o escorregamento, deve-se expressar o valor da corrente I_2 através de parâmetros que sejam conhecidos. Através do teorema de Thévenin, será determinada uma expressão que determine o conjugado através dos parâmetros construtivos do motor.

Assim, foi possível redesenhar o circuito apresentado na Figura 2 para o circuito apresentado na Figura 3.

Figura 3: Circuito resultante após o equivalente de Thévenin



Fonte: Autor, 2022

$$Z_m = \frac{jX_m R_c}{R_c + jX_m} \quad (9)$$

$$V_{1eq} = V_1 \frac{jZ_m}{R_1 + j(X_1 + Z_m)} \quad (10)$$

$$Z_{1eq} = \frac{jZ_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + Z_m)} \quad (11)$$

Onde:

V_{1eq} : Tensão de fase de terminas do estator, após o teorema de Thévenin;

Z_{1eq} : Impedância do estator após o teorema de Thévenin.

Tendo em vista o novo circuito, I_2 é corrente que circula por todos os componentes. Ou seja:

$$I_2 = \frac{V_{1eq}}{Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{S}} \quad (12)$$

Substituindo a expressão de I_2 na equação 8, tem-se que o conjugado pode ser determinado pela seguinte expressão.

$$\tau_{mec} = \frac{n_{fases} V_{1eq}^2 \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_s (Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{S})^2} \quad (13)$$

Sabendo que $Z_{1eq} = R_{1eq} + jX_{1eq}$

Pode-se reescrever a equação do conjugado como:

$$\tau_{mec} = \frac{n_{fases} V_{1eq}^2 \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_s \left(\left(R_{1eq} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{1eq} + X_2)^2 \right)} \quad (14)$$

3.6 Variação da frequência

O inversor de frequência, além de dar a partida em um motor de indução, também pode controlar a sua velocidade de operação, desde que não ultrapasse a velocidade síncrona. Para manter a densidade de fluxo, aproximadamente constante, deve-se ser mantida a relação Volts/Hertz. Em outras palavras, a tensão e a frequência que alimentam o motor de indução devem variar igualmente e proporcionalmente.

Tendo isso em mente, serão feitas algumas considerações.

Primeiramente, para essa análise inicial será considerado que $R_{1eq} = 0$, pois o principal objetivo é analisar o efeito da mudança de frequência, por isso R_{1eq} é desprezível. E será adotada a constante $\frac{\omega_e}{\omega_{nf}}$ que vai fazer a relação entre as frequências onde:

ω_e : frequência angular elétrica (frequência normal de operação)

ω_{nf} : nova frequência angular (frequência reduzida)

Começando pela tensão de alimentação, temos a seguinte relação:

$$V_1 = \frac{\omega_e}{\omega_{nf}} V_{1nf} \quad (15)$$

E, para a tensão de Thévenin, tem-se:

$$V_{1eq} = \frac{\omega_e}{\omega_{nf}} V_{1eqnf} \quad (16)$$

Quando se varia a frequência, isso também afeta as reatâncias do sistema. Por isso, também tem que considerar:

$$(X_{1eq} + X_2) = \frac{\omega_e}{\omega_{nf}} (X_{1eq} + X_2)_{nf} \quad (17)$$

E, quanto ao escorregamento:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{P \cdot \Delta\omega_m}{2 \omega_e} \quad (18)$$

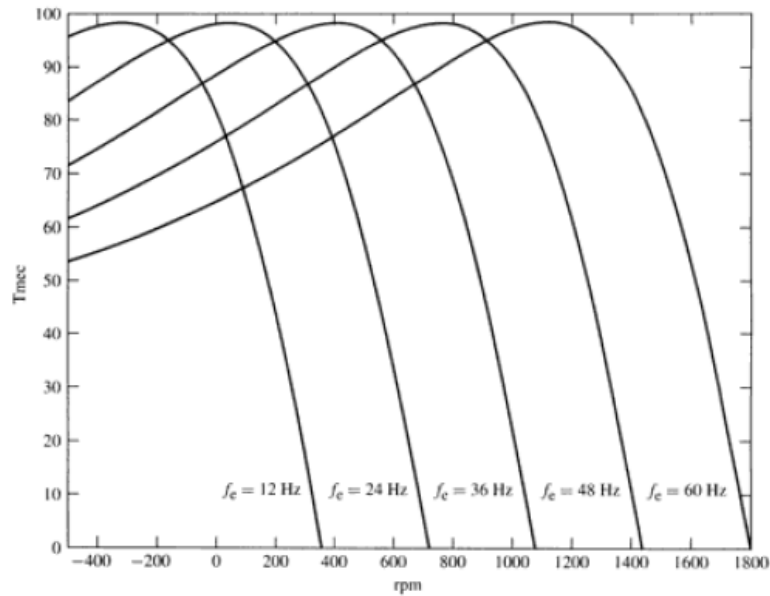
Assim sendo, substituindo as equações 16, 17 e 18 na equação 14, determina-se que o conjugado mecânico é:

$$\tau_{mec} = \frac{n_{fases} V_{1eqnf}^2 \left(\frac{R_2}{\Delta\omega_m} \right)}{\frac{2 \omega_{e} nf}{polos} \left(\left(\frac{R_2}{\Delta\omega_m} \right)^2 + (X_{1eq} + X_2)_{nf}^2 \right)} \quad (19)$$

Com isso, pode-se observar que a dependência do conjugado com a frequência e velocidade dependem do termo $\frac{R_2}{\Delta\omega_m}$, assim supondo que R_1 seja desprezível, ao variar a frequência elétrica de um motor, a curva de conjugado por velocidade mantém a mesma característica, apenas se deslocando no sentido de menor velocidade. Assim, se um motor de 4 polos, a 60 Hz tem um pico de conjugado em 1710 rpm, isso corresponde a um escorregamento de 5%, quando acionado em 30 Hz o conjugado de pico ocorrerá em 810 rpm, que corresponde a um escorre-

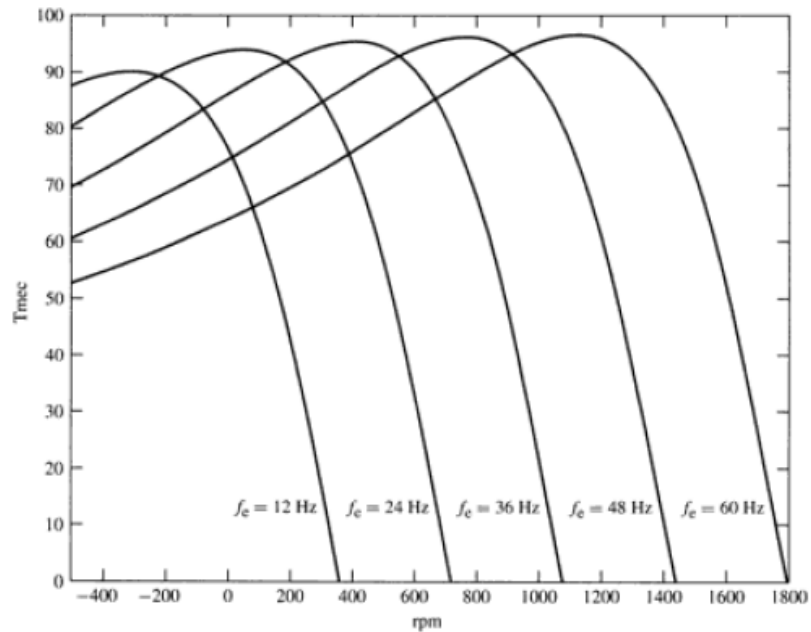
gamento de 10%. Porém, caso R_1 não seja desprezível, haverá uma variação nas curvas de conjugado por velocidade, mas isso será uma atenuação nos valores de conjugado máximo. Para ilustrar, as Figuras 4 e 5 exemplificam o que acontece quando R_1 é desprezível ou não.

Figura 4: Efeito da variação da frequência na curva de conjugado x velocidade com R_1 desprezível.



Fonte: Máquinas Elétricas, A.E. Fitzgerald (2008)

Figura 5: Efeito da variação da frequência na curva de conjugado x velocidade considerando R_1 .



Fonte: Máquinas Elétricas, A.E. Fitzgerald (2008)

Quando o valor de R_1 é desprezado, como pode ser notado na Figura 4, conforme o valor da frequência varia, o conjugado máximo se mantém, quando se mantém o valor do R_1 ,

há uma atenuação nos valores de conjugado máximo de acordo com a frequência de alimentação. Esse efeito ocorre por que, ao considerar o valor de R_1 que representa a resistência do enrolamento de armadura, estão sendo adicionadas perdas ao sistema, e isso diminui o valor do conjugado que o motor pode fornecer. Quando se diz que estão sendo adicionadas perdas, quer dizer que está sendo contabilizada a queda de potencial nos enrolamentos de armadura.

3.7 Expectativa de vida

Quando um motor é projetado se determina a sua vida útil, que representa a estimativa de quanto tempo ele pode operar sem que apresente falhas. A determinação da vida útil de um motor é dada, principalmente, por causa da vida útil do isolante elétrico presente no interior do motor. Com isso, é interessante ver as consequências que a variação da frequência pode causar no isolante elétrico presente no núcleo do motor de indução e como isso afeta a sua vida útil.

A vida útil de um motor pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$VU = Ae^{B/T} \quad (20)$$

Onde:

VU : Vida útil.

A e B : São constantes referentes ao material utilizado no isolamento.

T : Temperatura absoluta.

Essa expressão mostra que a vida útil de um motor tem um comportamento exponencial decrescente conforme a temperatura dentro do motor aumenta.

3.7.1 Perdas no ferro

As perdas em um motor de indução afetam, principalmente o seu rendimento, mas também geram calor e com isso, aumentam a temperatura interna do motor. Em geral, máquinas elétricas apresentam três tipos de perdas, as perdas ôhmicas, as perdas mecânicas e as perdas no ferro. E destas três perdas citadas, apenas as perdas no ferro tem relação com a frequência de alimentação. Que são, a perda por histerese e a perda por corrente parasita.

A perda por corrente parasita varia com a densidade de fluxo magnético, a frequência de alimentação e a espessura das chapas que compõem o núcleo do motor. E pode ser determinada pela expressão:

$$P_p = K_e (B_{max} f \Delta)^2 \quad (21)$$

Onde:

Δ : Espessura da chapa;

B_{max} : Densidade de fluxo máxima;

f : Frequência;

K_e : Constante de proporcionalidade.

A constante de proporcionalidade depende do volume e da resistividade do ferro.

As perdas por histerese podem ser expressas por uma equação, a qual é determinada empiricamente.

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad (22)$$

Onde:

B_{max} : Densidade de fluxo máxima;

f : Frequência;

K_e : Constante de proporcionalidade;

n : é um valor que varia entre 1,5 e 2,5.

Quando comparadas, as perdas por correntes parasitas têm uma certa facilidade para reduzir os seus efeitos, pois, para isso é preciso laminar o núcleo do motor e aplicar alguma substância que faça o isolamento elétrico entre as lâminas que compõem o núcleo. Já as perdas por histerese não têm essa simplicidade. Pois elas decorrem da interação entre o campo magnético gerado pelos enrolamentos de armadura e o material que compõe o núcleo. As perdas por histerese não são simples de se determinar e possuem uma dependência direta com o material do núcleo e, principalmente, com a frequência.

3.7.2 Harmônicas

O inversor de frequência faz a variação da frequência através da modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*), quando o inversor faz essa operação, ocorrem a presença de distorções harmônicas na alimentação do motor. Essas harmônicas podem ser de três naturezas: positiva, negativa ou zero e elas causam distúrbios na operação o motor. As

harmônicas positivas causam a aceleração do eixo do motor, as negativas geram um conjugado em oposição ao movimento, assim, reduzindo a velocidade do motor.

A presença das distorções harmônicas pode causar, variação de velocidade, variação do conjugado e vibração do eixo, aumentando a fadiga do material do eixo, e, conseqüentemente, reduzindo a vida útil do motor de indução e todas as harmônicas influenciam no aumento da temperatura do motor.

Quando se fala de distorções harmônicas em motores de indução, em especial os efeitos que causam na vida útil do motor, tem-se um outro fator limitante, que se deve ter um cuidado reforçado, o aquecimento. Durante o funcionamento da máquina, há um sobreaquecimento, principalmente na fase mais solicitada, o sobre aquecimento é decorrente das perdas suplementares no cobre, sendo resultantes da circulação das correntes harmônicas nos enrolamentos do estator e do rotor.

É possível calcular a corrente harmônica através da seguinte fórmula:

$$I_h = \frac{V_h}{X_{RBh}} \quad (23)$$

$$X_{RBh} = 2\pi fhL_{RB} \quad (24)$$

Onde:

X_{RBh} : Reatância de rotor bloqueado para uma harmônica de ordem h

L_{RB} : Indutância de rotor bloqueado do motor de indução

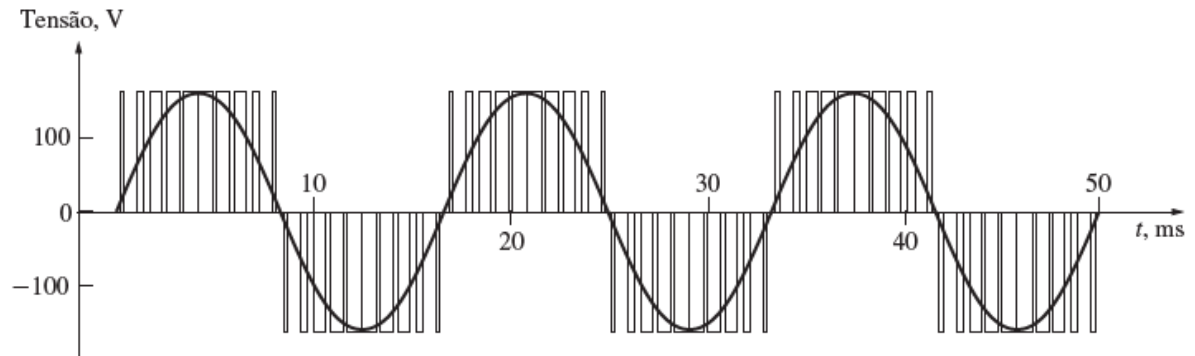
I_h : Valor eficaz da corrente harmônica de ordem h

V_h : Valor eficaz da tensão, por fase, harmônica de ordem h

São essas correntes que ao circular nos enrolamentos do rotor e estator causam perdas ao motor. E, como mencionado anteriormente e descrito pela equação 20, quando há um aumento de temperatura, a vida útil da máquina decresce devido a deterioração do material isolante presente no núcleo da máquina.

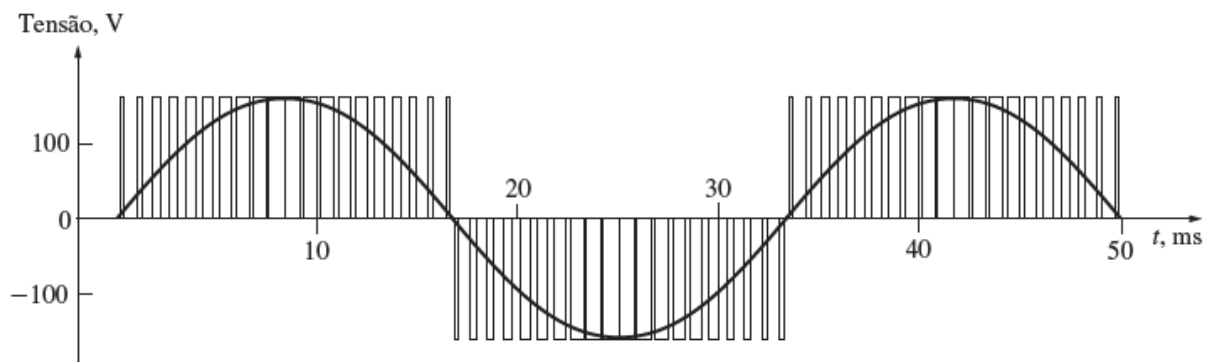
Para dar seguimento a análise dos harmônicos e demais distúrbios causados pelo inversor de frequência, é importante olhar para o formato de onda na saída do inversor de frequência.

Figura 6: Formato de onda na saída de um inversor de frequência em 120V e 60Hz



Fonte: Fundamento de máquinas elétricas, Chapman (2013)

Figura 7: Formato de onda na saída de um inversor de frequência em 120V e 30Hz



Fonte: Fundamento de máquinas elétricas, Chapman (2013)

As Figuras 6 e 7 apresentam dois exemplos de formato de onda resultante da operação de um inversor de frequência. É conhecido que o formato de onda gerado é resultante de uma modulação PWM e isso é mostrado nas Figuras acima. Na Figura 6, há uma onda senoidal no fundo para servir de referência para auxiliar na interpretação do sinal PWM.

O PWM é a média das tensões em um período de tempo, assim, quanto maior a largura do pulso, maior o tempo em nível alto, assim, maior o valor médio da tensão e quanto menor a largura do pulso, menor é o valor médio da tensão.

Na Figura 7 temos uma onda parecida com a apresentada na Figura 6, porém esse tem uma frequência menor, ou seja, ela apresenta uma largura de amostragem maior, e assim, variando essa largura de amostragem que o inversor de frequência atuar sobre a frequência de alimentação de um motor de indução.

É importante ressaltar que, para cada pulso, há uma variação abrupta no nível de tensão, indo de zero para o máximo e posteriormente, de zero para o mínimo. Essas variações abruptas geram distúrbios no sistema, na alimentação e na estrutura do motor de indução. Um dos distúrbios é o que foi tratado até o momento, a distorção harmônica. Os demais distúrbios serão apresentados a seguir.

3.7.3 Distúrbios

Dentre os distúrbios que podem ocorrer em um inversor de frequência, é importante falar de *Sag*, *Swell* e Surto, todos os distúrbios mencionados afetam a tensão de alimentação do motor.

Sag, que significa mergulho, é o distúrbio causado por uma subtensão de curta duração, poucos segundos, onde a tensão fornecida é abaixo da tolerância normal. O *sag* afeta, principalmente, computadores e circuitos de controle.

Swell, que significa salto, é o distúrbio causado por uma sobretensão, assim como o *sag*, o *swell* tem curta duração, poucos segundos e a tensão fornecida é acima da tolerância nominal. O *swell* afeta, principalmente, o equipamento que está em operação, como no caso deste estudo, o motor de indução, como a tensão de alimentação aumenta significativamente isso acaba afetando o isolamento do núcleo e dos enrolamentos do motor, fazendo com que sua vida útil seja reduzida devido ao superaquecimento dos enrolamentos.

Segundo Dias (1998), a magnitude típica do *sag* é em torno de 0,1 p.u. e 0,9p.u. e para o *swell* é em torno de 1,1 p.u. e 1,8 p.u.

Surto são picos de tensão de curtíssima duração, da ordem de micro segundos até mili segundos, os surtos são extremamente difíceis de se medir e tem um comportamento aleatório, geralmente são causados por iluminação, interrupção e acionamento de cargas. O surto danifica equipamentos eletrônicos, transformadores e motores, afetando, principalmente, o isolamento. Neste ponto é importante olhar novamente para as Figuras 6 e 7, exibidas anteriormente, ali mostra que o sinal de alimentação gerado por um inversor de frequência é uma série de chaveamentos sequenciais. Esses chaveamentos acontecem com uma certa frequência podendo chegar até 20kHz, porem quanto maior a frequência de chaveamento, maior a degradação do isolamento, segundo WEG (2021) a relação entre a frequência de chaveamento e a vida útil do motor de indução não é simples, mas pode ser aproximado como, para frequências menores ou iguais a 5kHz a probabilidade de falha do isolamento ser diretamente proporcional a frequência

de chaveamento e, para frequências maiores que 5kHz a probabilidade de falha é proporcional ao quadrado da frequência de chaveamento. Porém o aumento da frequência de chaveamento tende a melhorar o desempenho do motor em termos de temperatura e ruído.

O aparecimento de surtos se ocorre por causa do *rise time*, que é o tempo necessário para transitar de seu valor mínimo até o seu valor máximo. Segundo WEG (2021) a grande rapidez do crescimento do pulso de tensão emitido pelo inversor ao motor, faz com que as primeiras espiras de cada bobina fiquem submetidas a um alto valor de tensão, mas como o motor tem características capacitivas e indutivas isso acaba por amortecer os efeitos nas espiras seguintes. Com isso, o *rise time* influencia diretamente na vida útil do isolamento do motor, pois quanto menor for o tempo de crescimento do pulso, maior será o pulso gerado.

Quando se fala em variação, pode-se falar como a taxa de variação da tensão pelo tempo, ou seja, $\frac{dV}{dt}$. A derivada da tensão no tempo é a representação matemática do *rise time*, e isso vai auxiliar na interpretação do quanto um pulso de tensão pode ser prejudicial ao motor.

Segundo Nema (2016) o *rise time* é o tempo em que a tensão leva para subir de 10% a 90% da tensão do *link DC* ($\approx 1,41 V_{nom}$). Então, segundo o critério Nema, tem-se:

Supondo um motor $V_{nom} = 220 V$.

$$V_{linkDC} = 1,41 \cdot 220 = 310,2 V \quad (25)$$

Para uma variação de 80% da tensão, tem-se que:

$$\Delta V = 0,8 \cdot 310,2 = 248,16 V \quad (26)$$

Assumindo um *rise time* de $0,1 \mu s$.

$$\Delta t = 0,1 \mu s \quad (27)$$

Conclui-se que:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{248,16 V}{0,1 \mu s} = 2481,6 \frac{V}{\mu s} \quad (28)$$

Com isso é possível ver quanto o chaveamento realizado pelo inversor de frequência pode ser prejudicial ao motor de indução.

Assim sendo, dos distúrbios causados pelo inversor de frequência, esse é o que acaba se tornando o mais perigoso, pois pode ocorrer a todo instante, gerando o aquecimento do motor

e, conseqüentemente, reduzindo a sua vida útil. De forma semelhante ao $\frac{dV}{dt}$ o chaveamento causado pelo inversor de frequência também surte efeito na corrente que alimenta o motor, assim, de forma análoga se tem o $\frac{dI}{dt}$.

A variação da corrente no tempo ($\frac{dI}{dt}$), tem um comportamento similar ao $\frac{dV}{dt}$, a diferença entre ele é que, enquanto o $\frac{dV}{dt}$ afeta o isolamento do motor, o $\frac{dI}{dt}$ afeta os semicondutores envolvidos no processo de modulação PWM.

4. EXPERIMENTOS PREVISTOS

4.1 Motor de indução

Para a realização desse estudo, é preciso conhecer adequadamente o equipamento a ser testado e analisado, o motor de indução, e os instrumentos a serem utilizados para fazer a análise.

Primeiramente, deve-se levantar todas as características, físicas e elétricas, do motor para obter um modelo teórico que se aproxime do motor a ser utilizado. Pois assim, há como fazer cálculos, cujos resultados, serão utilizados como um norte para os experimentos a ser realizados.

Com os resultados teóricos em mãos, sabe-se o que esperar dos experimentos a serem executados e assim, comparar os valores obtidos de maneira qualitativa.

4.2 Modelo teórico

Para o levantamento do modelo teórico do motor de indução, serão realizados três ensaios. O primeiro é para determinar a resistência estatórica, que consiste em aplicar uma corrente pré-determinada nos enrolamentos de armadura e medir a queda de tensão nos terminais dos enrolamentos de armadura. O próximo é o ensaio em vazio, onde o motor opera com tensão nominal e sem movimentar carga, nesse ensaio mede-se a corrente nos enrolamentos de armadura e a potência entregue a máquina. E por fim, o último ensaio é com o rotor bloqueado, onde o motor opera com corrente nominal circulando nos enrolamentos de armadura, nesse ensaio se mede a tensão nos terminais do enrolamento de armadura e a potência entregue a máquina.

A partir disso, é possível montar o modelo teórico do motor e determinar se os valores a serem medidos nos ensaios seguintes, estão de acordo com o que se espera.

4.3 Acionamento convencional

O acionamento convencional consiste em conectar o motor de indução a uma fonte de tensão trifásica equilibrada. Após isso, com o auxílio de um transdutor de conjugado, será medida a curva de aceleração do motor, a fim de determinar conjugado de partida e conjugado máximo.

4.4 Acionamento com inversor de frequência

O acionamento do motor com o inversor de frequência é, basicamente, alimentar o inversor de frequência com a rede trifásica e conectar os terminais de saída dele ao motor de indução. Após isso, com o auxílio de um transdutor de conjugado, será medida a curva de aceleração do motor, a fim de determinar conjugado de partida e conjugado máximo.

4.5 Experimentos

Conforme dito anteriormente, o experimento consiste em montar o modelo teórico do motor de indução e, com base nele, comparar os resultados obtidos. Onde além de avaliar o acionamento do motor, também seria avaliado como cada método de acionamento afeta a máquina quando a carga que ela movimenta aumenta.

Assim, foi analisada a curva de aceleração do motor, de fato, no decorrer da execução do experimento, essa análise se mostrou mais interessante para o objetivo do estudo.

4.6 Curva de aceleração

A curva de aceleração mostra uma relação ente a velocidade do motor e o seu conjugado. A determinação da curva de aceleração do motor de indução é importante, pois a partir dela conseguimos determinar pontos importantes para a operação da máquina, como o conjugado de partida e o conjugado máximo.

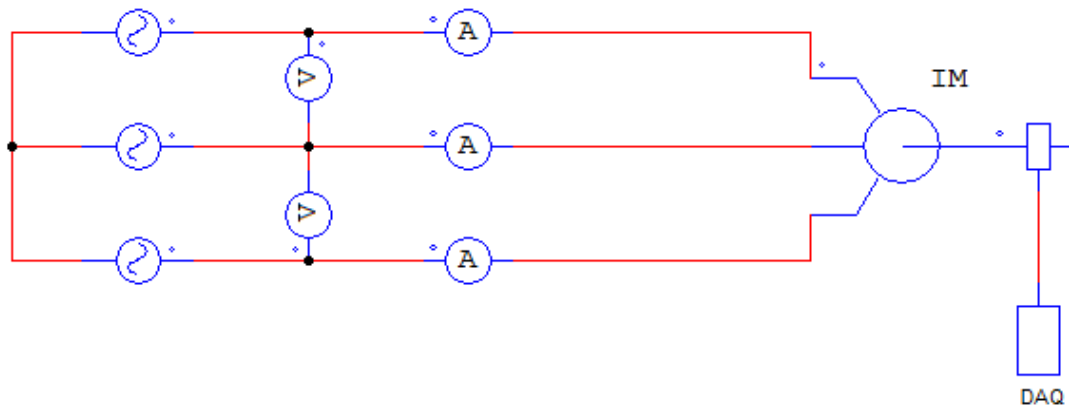
O conjugado de partida é o conjugado mínimo para que a máquina entre em movimento, seria o valor em que a máquina está na iminência de entrar em movimento e permanecer parada.

O conjugado máximo, como o nome já sugere, é o máximo valor de conjugado que o motor consegue entregar, caso o conjugado exigido seja maior que esse valor, a máquina para de operar, ou seja, o rotor para de girar. Esse é justamente o motivo pelo qual optou-se por não realizar o primeiro experimento.

4.7 Levantamento da curva de aceleração

Para realizar o levantamento das curvas de aceleração foi utilizado, além do motor, um transdutor de conjugado e um analisador de potência, as conexões realizadas para o experimento podem ser observadas nas Figuras 8 e 9. A Figura 8 demonstra o esquema de montagem para o acionamento convencional e a Figura 9 demonstra o esquema de montagem para o acionamento com o inversor de frequência.

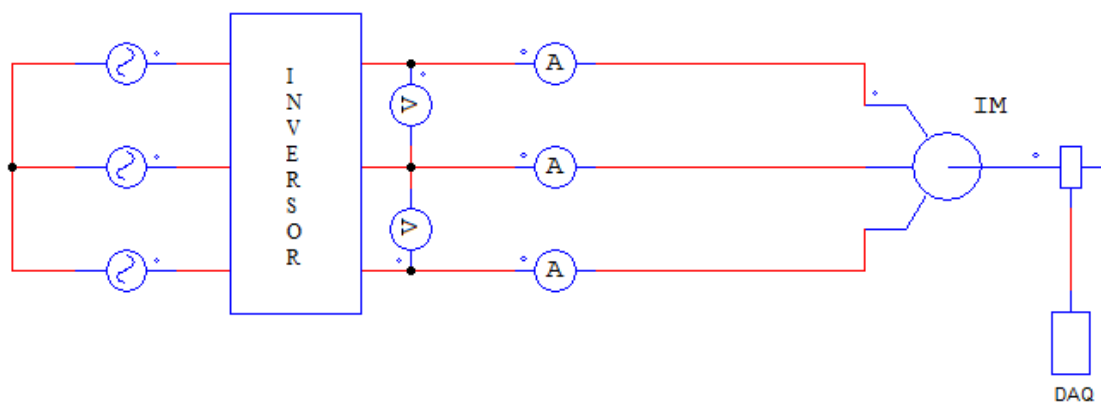
Figura 8: Circuito utilizado para o acionamento convencional



Fonte: Autor (2022)

A Figura 8 mostra o circuito utilizado em laboratório para o levantamento da curva de aceleração do motor de indução quando acionado de modo convencional. É importante destacar os elementos presentes na Figura 8, começando da esquerda para a direita, encontra-se uma fonte trifásica equilibrada de corrente alternada, logo em seguida um par de voltmímetro para a aferição da tensão usada para alimentar o motor, bem como três amperímetros utilizados para medir a corrente que circula em cada fase. O conjunto de voltmímetro e amperímetros simboliza as conexões feitas no analisador de potência. Mais a direita se encontra o motor de indução e conectado ao seu eixo o *encoder*, responsável pela leitura de conjugado e velocidade do motor, que faz comunicação com o DAQ, que é o sistema de aquisição de dados.

Figura 9: Circuito utilizado para o acionamento com inversor de frequência

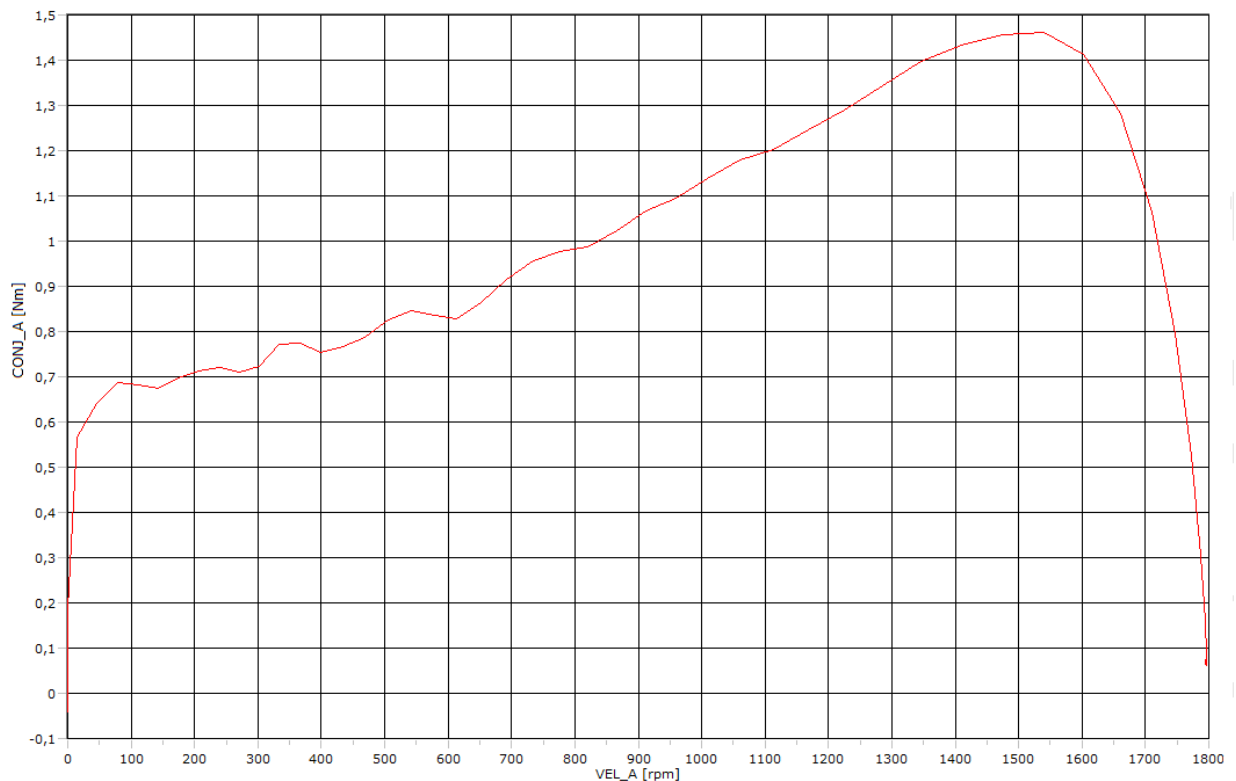


Fonte: Autor (2022)

A estrutura da Figura 9 é muito semelhante com a da Figura 8, a única diferença é a presença do inversor de frequência, que é alimentado por uma fonte trifásica e o próprio inversor de frequência faz a função de alimentar o motor de indução. Os demais componentes exercem a mesma função conforme mencionado anteriormente

Primeiramente foi realizado o acionamento convencional, como o objetivo é justamente a curva de aceleração do motor, pois isso implicaria no aumento gradual da velocidade conforme a tensão aumenta, então optou-se por conectar o motor diretamente a rede elétrica trifásica. Conectado ao eixo do rotor do motor, foi acoplado o transdutor de conjugado. O transdutor de conjugado é um equipamento que permite a medição de conjugado e velocidade do motor, todos os sinais gerados pelo transdutor foram transmitidos até o QuantumX. QuantumX é um sistema de aquisição de dados que faz a comunicação entre o transdutor e o computador, para que assim seja possível analisar os sinais gerados pelos sensores acoplados no motor. Assim, com o *software* Catman, que faz toda a interface de comunicação com o QuantumX, o resultado obtido está exposto na Figura 10, a curva de aceleração do motor com acionamento convencional, ambos, QuantumX e Catman são produtos fabricador pela empresa HBM.

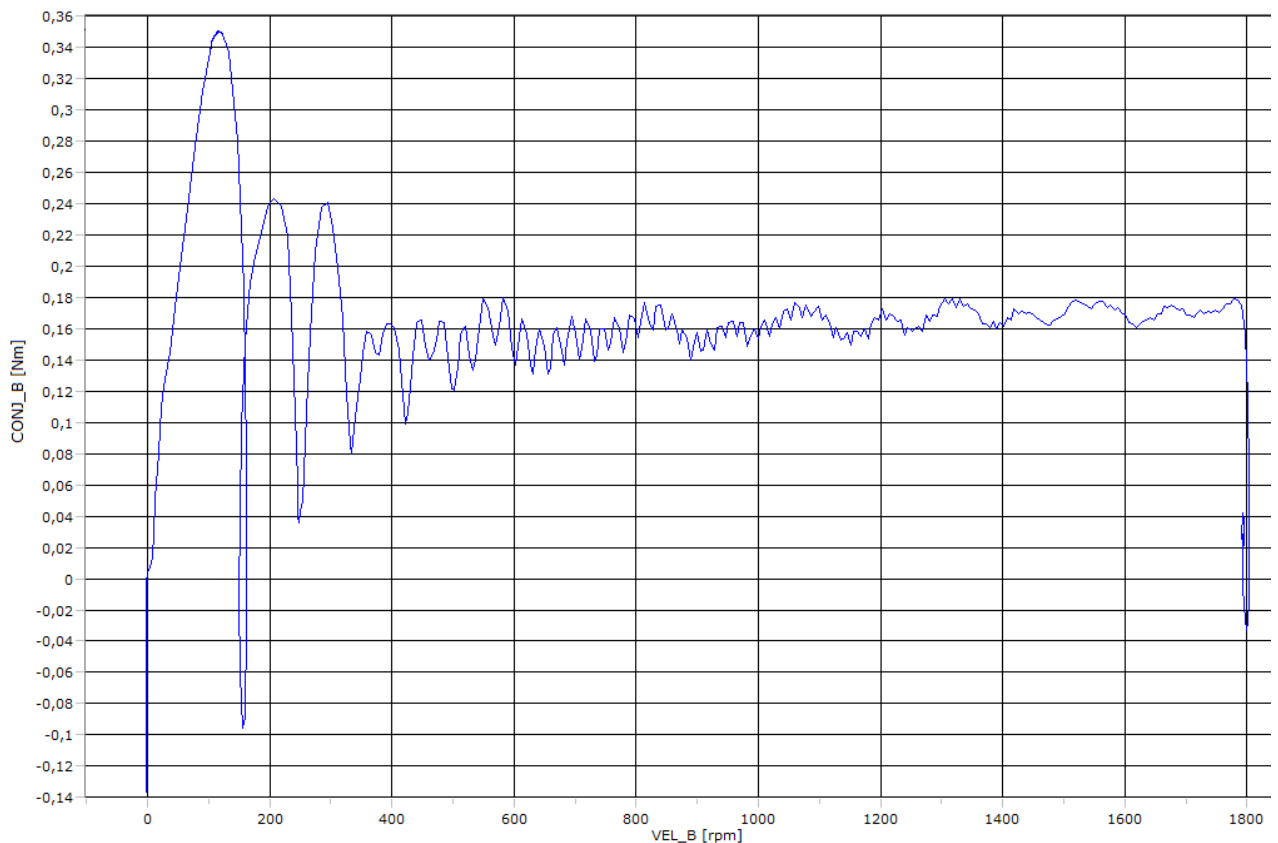
Figura 10: Curva de aceleração com acionamento convencional



Fonte: Autor (2022)

Após a coleta desses dados, foi repetido o experimento, porém, dessa vez, com o inversor de frequência. Nesse caso vale ressaltar que o acionamento do motor de forma convencional é realizado com tensão da rede trifásica diretamente no motor, ou seja, não houve um aumento gradual. Com o inversor de frequência a tensão e a frequência são aumentadas de forma gradual e isso pode influenciar as curvas de aceleração. O inversor de frequência utilizado no experimento foi o inversor SEW – Eurodrive – Movitrac, type MC07A22022-2A3-4-00. Este inversor possui entrada trifásica de 200 a 240V, 50 a 60Hz, 7,6 A. A saída fornecida pelo inversor também é trifásica 200 a 240 V, 8,6 A e pode fornecer até 2,2 kW de potência. O inversor SEW tem selo de resistência ao pó e a humidade IP20. Assim foi obtida a seguinte curva da Figura 11.

Figura 11: Curva de aceleração com inversor de frequência

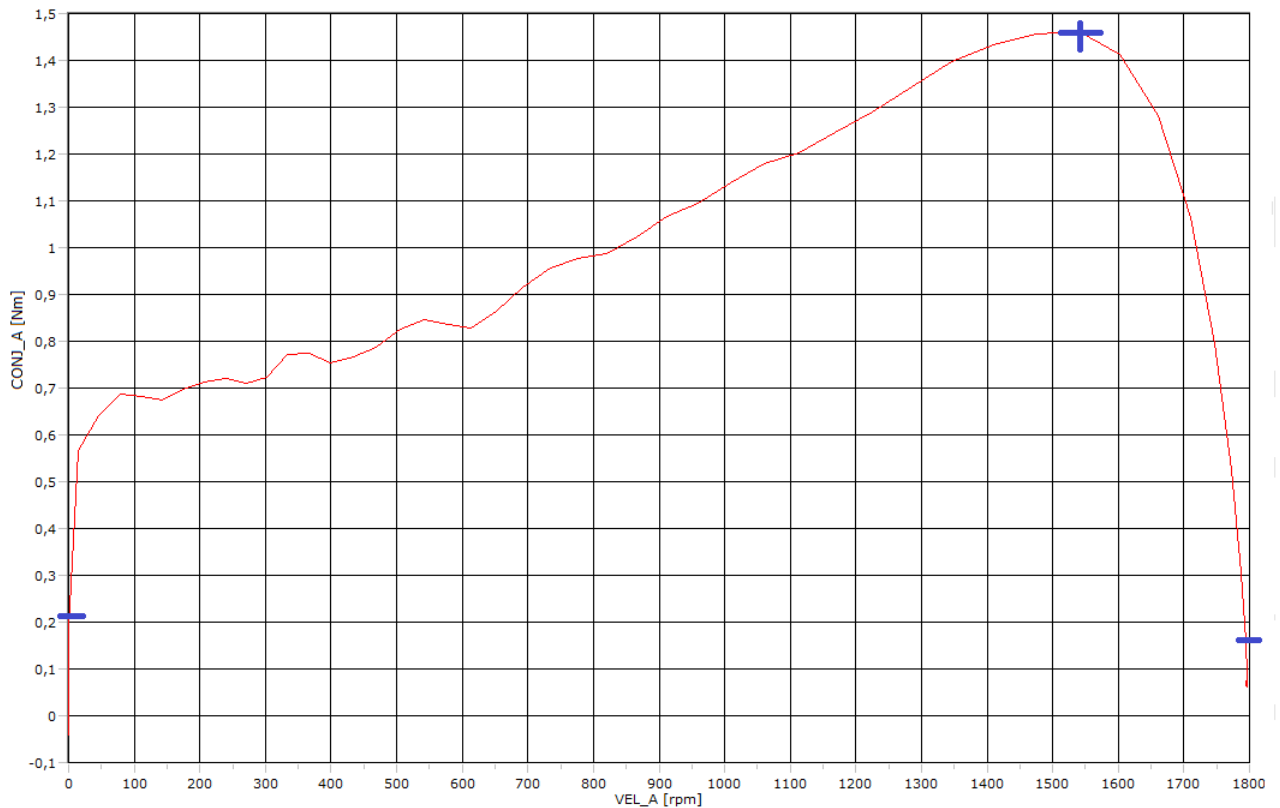


Fonte: Autor (2022)

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em mãos o resultado dos experimentos pode-se fazer algumas análises. Conforme mencionado anteriormente, com a curva de aceleração convencional do motor de indução pode-se observar pontos importantes como conjugado de partida, conjugado máximo e o conjugado que o motor tem quando opera em vazio, isso é demonstrado na Figura 12.

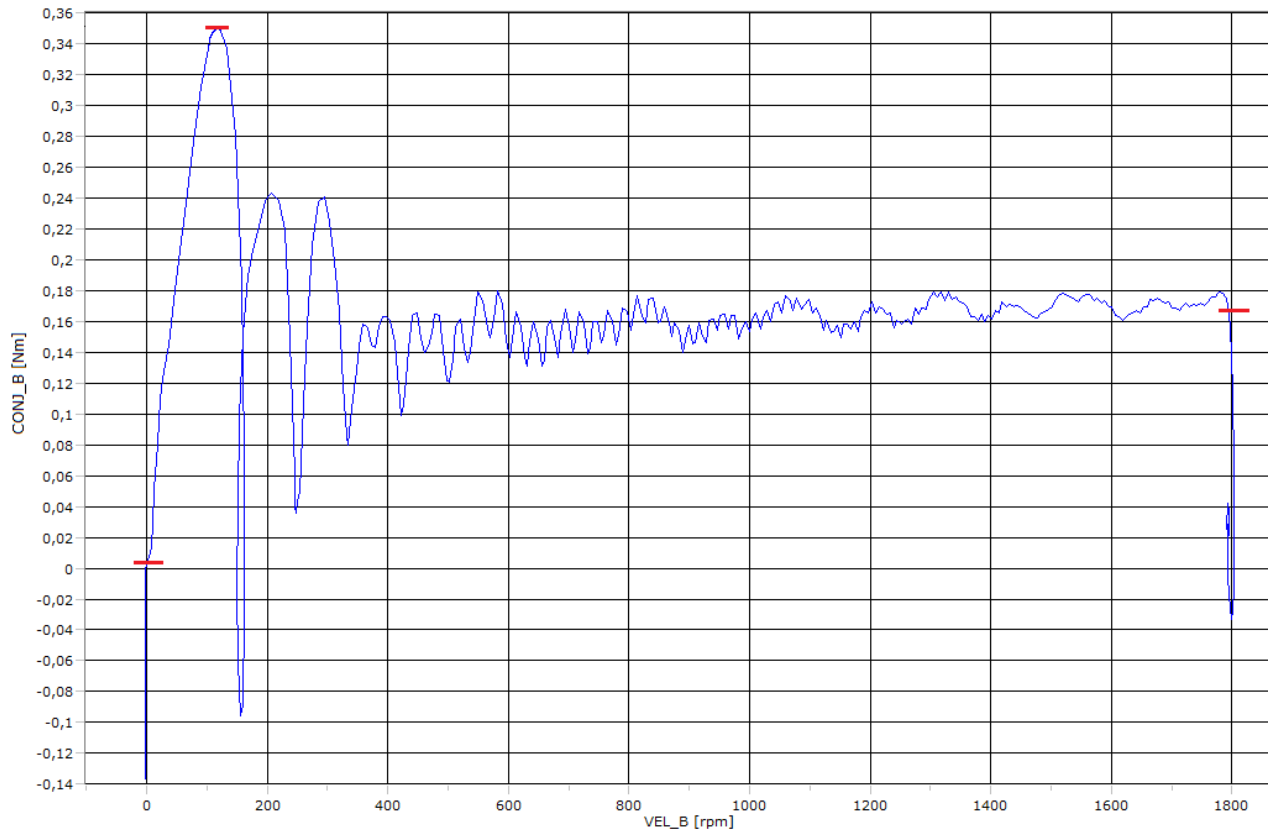
Figura 12: Pontos de interesse acionamento convencional



Fonte: Autor (2022)

Assim, conclui-se que, o motor de indução apresenta um conjugado de partida de aproximadamente 0,21 Nm, conjugado máximo de 1,45 Nm e quando operando em vazio em regime permanente aproximadamente 0,16 Nm. Vale ressaltar também que, o conjugado máximo acontece com uma velocidade de 1550 rpm e que o motor entra em regime permanente com uma velocidade de 1794 rpm.

Agora quando se observa a curva de aceleração com o inversor de frequência, nota-se que ela tem um comportamento completamente diferente do apresentado pelo acionamento convencional.

Figura 13: Pontos de interesse acionamento com inversor

Fonte: Autor (2022)

Assim como foi analisado no acionamento convencional, foi possível observar alguns pontos de interesse, como o conjugado de partida, de aproximadamente 0,01 Nm, conjugado máximo de 0,35 Nm e, quando operando em vazio, conjugado em regime permanente de 0,17 Nm. O conjugado máximo foi obtido em aproximadamente 100 rpm e o motor entrou em regime permanente em 1794 rpm.

Ao acionar o motor com o inversor, o conjugado de partida obtido foi de 0,01 Nm, um valor abaixo do conjugado de partida convencional, isso ocorre pois o inversor de frequência durante o experimento estava configurado para utilizar o controle escalar, isso faz com que a frequência e a tensão sejam aumentadas de forma gradual e lentamente até os valores nominais. Caso o inversor de frequência estivesse configurado para o controle vetorial, o conjugado de partida seria maior que o valor obtido, podendo até ser igual ao conjugado de partida do método convencional.

Ao comparar as curvas de acionamento, a curva do acionamento com inversor de frequência tem um comportamento bem peculiar comparado ao do acionamento convencional. O primeiro ponto de observação é que, o acionamento convencional apresenta um conjugado que

começa crescente e depois decrescente, o que só acontece depois de atingir o conjugado máximo, mas em nenhum momento chega a ser negativo, o que não acontece com o acionamento com o inversor, que instantes depois de fornecer o conjugado máximo ele apresenta um conjugado negativo de, aproximadamente, $-0,1 \text{ Nm}$. Outro ponto que tem que ser ressaltado é que, no acionamento com inversor de frequência, nota-se um comportamento oscilatório do conjugado.

É importante lembrar que o inversor de frequência também é um equipamento utilizado para controlar o motor de indução, assim sendo, é interessante associar a alguns conceitos de controle, como, por exemplo, o período transitório e o regime permanente. No período transitório, o conjugado do motor pode apresentar um comportamento oscilatório, podendo ter picos mais altos do que em regime permanente.

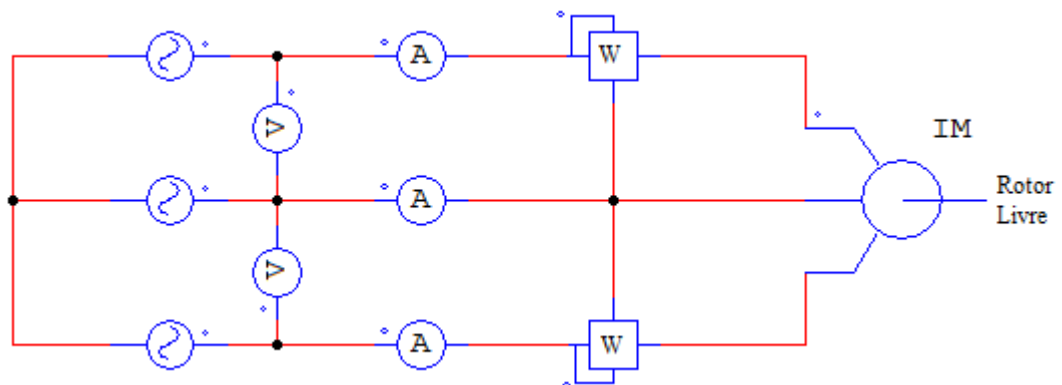
No regime permanente o conjugado do motor apresenta um comportamento mais previsível, podendo oscilar, mas sempre dentro de uma faixa reduzida. E isso descreve o comportamento do conjugado do motor de indução com o inversor de frequência.

Também vale ressaltar que o inversor de frequência é pré configurado para o motor que se deseja acionar, assim sendo, o próprio inversor de frequência é ajustado com os parâmetros adequados para operação do motor.

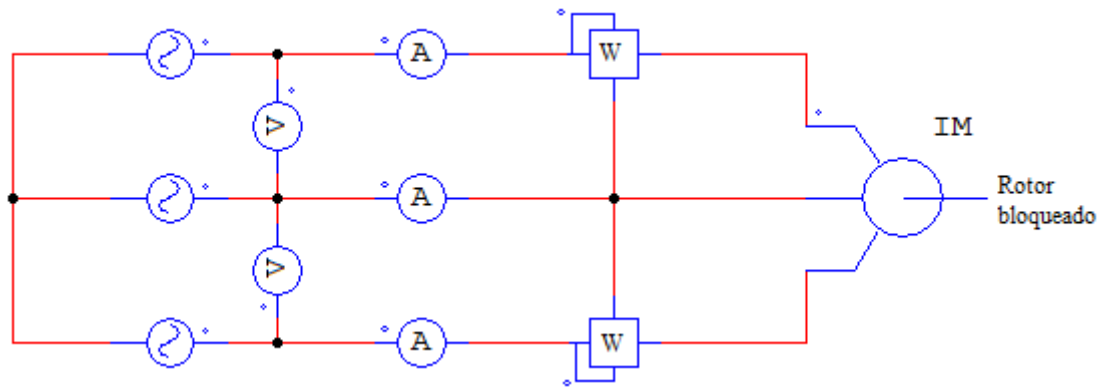
5.1 Conjugado de partida

Para o levantamento do conjugado de partida, em laboratório foi montado o circuito exposto na Figura 14.

Figura 14: Circuito utilizado em laboratório para o ensaio em vazio



Fonte: Autor (2022)

Figura 15: Circuito utilizado em laboratório para o ensaio com rotor bloqueado

Fonte: Autor (2022)

Com os circuitos das Figuras 14 e 15 foram realizados dois ensaios, sendo para o ensaio em vazio o circuito da Figura 14 e para o ensaio com rotor bloqueado o circuito da Figura 15. O ensaio em vazio consiste em alimentar o motor com tensão nominal e, a partir disso, medir a corrente que circula nos enrolamentos de armadura e a potência fornecida ao motor. O ensaio com rotor bloqueado consiste em travar o rotor do motor para que ele não gire e alimentar os enrolamentos de armadura com corrente nominal e, a partir disso, se mede a tensão nos enrolamentos de armadura e a potência entregue ao motor.

A partir dos dados coletados em laboratório, a fim de comparar com as curvas levantadas, foi determinado o valor do conjugado de partida teórico. A seguir estão apresentados os cálculos realizados para a determinação do conjugado de partida. O primeiro passo para determinar o conjugado de partida foi montar o circuito equivalente do motor de indução. Nos quadros 1, 2 e 3 estão apresentados os resultados de medições realizadas em laboratório referente aos ensaios em vazio e com rotor bloqueado e também a medição das resistências do estator.

Quadro 1: Medições realizadas durante o ensaio em vazio.

Tensão de Fase (V_{vz})	214,66 V
Corrente de Fase (I_{vz})	1,55 A
Potência (P_{vz})	145,94 W

Fonte: Autor (2022)

Quadro 2: Medições realizadas durante o ensaio com rotor bloqueado.

Tensão de Fase (V_{rb})	67,75 V
Corrente de Fase (I_{rb})	2,56 A
Potência (P_{rb})	157,90 W

Fonte: Autor (2022)

Quadro 3: Medições realizadas para determinar a resistência do estator.

R_{ab}	4,0 Ω
R_{bc}	4,0 Ω
R_{ca}	4,0 Ω

Fonte: Autor (2022)

Os enrolamentos de armadura do motor estão conectados em triângulo e os valores de resistência apresentados no quadro 3 são os valores de resistência entre dois terminais do motor, portanto, não representam a resistência de um enrolamento diretamente. As correntes apresentadas nos quadros 1 e 2 são as correntes de fase, ou seja, é a corrente que circula em cada enrolamento do motor.

A partir do ensaio em vazio, se tem:

$$FP = \frac{P_{vz}}{3V_{vz}I_{vz}} = 0,14 \quad (29)$$

Logo,

$$\theta = \arccos(0,14) = 81,63^\circ \quad (30)$$

Assim pode-se determinar a impedância em vazio

$$Z_{vz} = \left| \frac{V_{vz}}{I_{vz}} \right| \langle \theta = 20,25 + j137,64 \Omega \quad (31)$$

$$X_{vz} = X_1 + X_m = 137,64 \Omega \quad (32)$$

O mesmo raciocínio é empregado para o ensaio com rotor bloqueado

$$FP = \frac{P_{rb}}{3V_{rb}I_{rb}} = 0,303 \quad (33)$$

$$\theta = \arccos(0,303) = 72,32^\circ \quad (34)$$

Assim pode-se determinar a impedância de rotor bloqueado

$$Z_{rb} = \left| \frac{V_{rb}}{I_{rb}} \right| \langle \theta = 8,03 + j25,21 \Omega \quad (35)$$

$$X_{rb} = X_1 + X_2 = 25,21 \Omega \quad (36)$$

$$R_{rb} = R_1 + R_2 = 8,03 \Omega \quad (37)$$

Como esses dados representam um motor de indução com rotor bobinado, pode-se assumir que $X_1 = X_2$, com isso tem-se que:

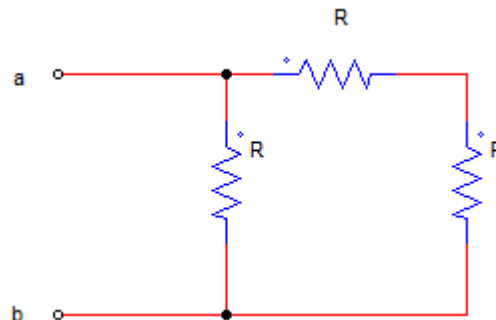
$$X_1 = X_2 = 12,60 \Omega \quad (38)$$

Substituindo o valor de X_1 na equação 28, determina-se que $X_m = 125,04 \Omega$.

Para determinar o valor de R_2 é preciso determinar R_1 primeiro, para isso é preciso olhar para o circuito equivalente aos enrolamentos de armadura.

Na Figura 16 pode-se ver o circuito equivalente a associação das resistências dos enrolamentos do motor.

Figura 16: Circuito representando a conexão entre os enrolamentos do motor de indução



Fonte: Autor (2022)

Para esse experimento, assume-se que o valor medido é igual a resistência equivalente entre os terminais a e b do circuito. Assim, conclui-se que a resistência equivalente é dada pela seguinte equação.

$$R_{eq} = \frac{2 R}{3} \quad (39)$$

Mas neste caso, R é a resistência de cada enrolamento, logo R é R_1 , portanto.

$$R_{medido} = \frac{2 R_1}{3} \quad (40)$$

$$R_1 = \frac{3 R_{medido}}{2} = \frac{3 \cdot 4}{2} = 6 \Omega \quad (41)$$

Substituindo o valor de R_1 na equação 33 temos que $R_2 = 2,03\Omega$.

Com essas informações em mãos e com o uso das equações 10, 11 e 14 consegue-se calcular o conjugado de partida. Para a determinação do conjugado de partida deve-se considerar outras condições. Primeiramente que o motor vai ser acionado com tensão nominal, no caso do motor usado em laboratório a tensão de alimentação é 220 V, a outra condição é que, como o motor está inicialmente parado, o escorregamento é unitário, ou seja, $s = 1$.

Assim sendo,

$$V_{1eq} = 220 \frac{j125,04}{6 + j(12,60 + 125,04)} = 195,73 \angle 2,49^\circ V \quad (42)$$

$$Z_{1eq} = \frac{j125,04 (6 + j12,60)}{6 + j(12,60 + 125,04)} = 4,94 + j11,66 \Omega \quad (43)$$

Também se sabe que a velocidade síncrona, é dada por:

$$\omega_s = \frac{120 f_e}{polos} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ rpm} \quad (44)$$

E com isso, é determinado que, o conjugado de partida é:

$$\tau_{partida} = \frac{3(195,73)^2(2,03)}{1800 ((4,94 + 2,03)^2 + (12,60 + 11,66)^2)} \quad (45)$$

$$\tau_{partida} = 0,203 \text{ Nm}$$

Este resultado reforça o resultado obtido graficamente, como pode ser visto na Figura 12, onde o valor aproximado do conjugado de partida é dito como 0,21Nm.

6. CONCLUSÃO

Ambos os métodos de acionamento têm suas particularidades. O acionamento convencional apresenta um tempo menor de aceleração quando comparado com o acionamento com o inversor de frequência. Porém o acionamento com inversor de frequência apresenta uma menor oscilação do conjugado desde a partida até estabilizar na velocidade de operação. Porém uma maior corrente de partida, que deve ser considerada no projeto do alimentador desse motor.

Mesmo o acionamento convencional apresenta um impacto maior na rede quando comparado com o acionamento com o inversor de frequência. O acionamento de um motor de indução com um inversor de frequência abre-se um leque de opções de controle, podendo definir curvas de aceleração e frenagem, aumento e redução da velocidade e até a inversão do sentido do giro do motor de uma maneira muito mais prática. Porém, o simples uso do inversor de frequência pode causar danos ao motor de indução, e com isso, causar a redução de sua vida útil. O quanto vai reduzir a vida útil do motor vai depender de como é o seu uso, um motor que tenha um uso diário e constante vai ter sua vida útil reduzida drasticamente quando comparado com um motor que tem uso eventual, mas ainda assim, haverá efeitos colaterais.

REFERÊNCIAS

- [1] Chapman, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, Porto Alegre, AMGH EDITORA LTDA, 2013, 5ª ed.
- [2] Dias, Guilherme A. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais**, Porto Alegre, EDIPUCRS, Coleção Engenharia 4, 1998, [s.n.].
- [3] Fitzgerald, A. E.; Jr., Charles Kingsley; Umans, Stephen D. **Máquinas Elétricas**, São Paulo, Bookman, 2008, 6ª ed.
- [4] NEMA, **Application Considerations for Constant Speed Motors Used on a Sinusoidal Bus with Harmonic Content and General Purpose Motors Used with Adjustable Voltage or Adjustable Frequency Controls or Both**, 2016, Disponível em: https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/mg-1-part-30-water-mark.pdf?sfvrsn=793de734_1 , consultado em 14 de novembro de 2022.
- [5] Rashid, Muhammad H. **Eletrônica de Potência, Circuitos, Dispositivos e Aplicações**, São Paulo, MAKRON Books, 1999, [s.n.].
- [6] WEG, **Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência**, 2021, Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>, consultado em 14 de novembro de 2022.