



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE PORTILHO ROCHA

**ESTUDO DA FRENAGEM REGENERATIVA PARA MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Uberlândia/MG

2019

FELIPE PORTILHO ROCHA

**ESTUDO DA FRENAGEM REGENERATIVA PARA MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho
Gomes

Uberlândia/MG

2019

FELIPE PORTILHO ROCHA

**ESTUDO DA FRENAGEM REGENERATIVA PARA MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Uberlândia, ____ de _____ de _____.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes (UFU)

Orientador

Prof. Dr. Augusto W. F. Veloso da Silveira Instituição: UFU

Prof. Dr. Kleiber David Rodrigues Instituição: UFU

Dedico este trabalho aos meus pais Elizabeth e Marcos e à minha irmã Fernanda pelo apoio, incentivo e confiança durante todo o curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades que encontrei.

Aos meus pais Elizabeth e Marcos que fizeram todo o possível para que o meu sonho se tornasse realidade.

À toda minha família e amigos pelo apoio e ajuda durante todos esses anos.

Agradeço também aos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica, especialmente ao professor Luciano Coutinho que me orientou neste trabalho. Obrigado pela dedicação, paciência e confiança.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo.”

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Este trabalho é um levantamento de estudos sobre frenagem regenerativa para motores de indução trifásicos. Foi introduzido os princípios de funcionamento desse tipo de motor que são importantes para entender o funcionamento de uma frenagem. Foi apresentado, então, os métodos existentes de frenagem para motores de indução como forma de comparação e introdução para explicar o funcionamento da frenagem regenerativa. Além disso, citou-se as vantagens da utilização desse método, as dificuldades para torná-lo mais popular e a configuração mais utilizada atualmente.

Palavras-chave: Frenagem. Regenerativa. Motor. Indução.

ABSTRACT

This work is a survey of regenerative braking studies for three-phase induction motors. The operating principles of this type of motor that are important for understanding the operation of braking have been introduced. Existing braking methods for induction motors were presented as a comparison and introduction to explain the operation of regenerative braking. In addition, the advantages of using this method, the difficulties to make it more popular, and the most widely used configuration are cited.

Keywords: Braking. Regenerative. Motor. Induction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço das perdas no MIT.....	21
Figura 2 – Circuito equivalente por fase do motor de indução.....	21
Figura 3 – Diagrama de potências.....	23
Figura 4 – Curva do torque x rotação.....	24
Figura 5 – Exemplo circuito de potência inversor de frequência.....	26
Figura 6 – Curva característica.....	27
Figura 7 – Curva característica do conjugado x frequência.....	28
Figura 8 – Inversão de Fases na Frenagem por Contracorrente.....	29
Figura 9 – Curva característica do conjugado x velocidade durante a frenagem.....	30
Figura 10 – Circuito equivalente do rotor simplificado.....	31
Figura 11 – Circuito equivalente do rotor dissolvido.....	32
Figura 12 – Frenagem por Injeção de Corrente Contínua Não Dissipativa.....	34
Figura 13 – Frenagem por Injeção de Corrente Contínua Dissipativa.....	34
Figura 14 – Curva (V/f) da frenagem regenerativa.....	36
Figura 15 – Curva do conjugado com a diminuição da velocidade.....	37
Figura 16 – Circuito equivalente do rotor.....	39
Figura 17 – Ponte trifásica unidirecional com diodos.....	43
Figura 18 – Ponte trifásica bidirecional com IGBT's.....	43
Figura 19 – Dimensões do Inversor POWERDRIVE FX.....	45
Figura 20 – Funções extras do Inversor POWERDRIVE FX.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rotações síncronas por frequência e números de polos.....	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MME – Ministério de Minas e Energia

BEM – Balanço Energético Nacional

MIT – Motor Elétrico de Indução Trifásico

PWM – *Pulse Width Modulation*

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

IGBT's – Transistor Bipolar de Porta Isolada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	14
1.2 Objetivo	15
2 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES	15
2.1 Tipos De Motores	15
2.2 Características físicas de um motor de indução trifásico (MIT)	16
2.3 Campo magnético girante	17
2.4 Velocidade síncrona	17
2.5 Escorregamento	19
2.6 Rendimento	20
2.7 Circuito equivalente	21
2.8 Fator de potência	22
2.9 Conjugado	23
3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	25
3.1 Características de funcionamento	25
3.2 Método de controle escalar	26
3.3 Método de controle vetorial	28
4 FRENAGEM ELÉTRICA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	29
4.1 Métodos de frenagem elétrica	29
4.2 Frenagem contracorrente	29
4.3 Frenagem CC	33
4.4 FRENAGEM REGENERATIVA	35
4.4.1 Frenagem regenerativa com bateria	40
4.4.2 Frenagem regenerativa com supercapacitância	41
4.4.3 Frenagem regenerativa com devolução para a rede CA	42
4.5 Conjunto motor e inversor como freio	44
5 APLICAÇÕES PARA FRENAGEM REGENERATIVA	46

6 CONCLUSÃO	47
7 TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Sabe-se que as usinas hidrelétricas compõem a maior fonte da energia elétrica brasileira. Isso faz com que as alterações climáticas, como um período de seca prolongado, possam influenciar na produção energética e até mesmo gerar crises. Por isso, é importante tomar atitudes para que esse efeito seja minimizado e uma das ações que podem ser aplicadas pelos próprios consumidores é fazer uso eficiente e racional da energia. O uso consciente de eletricidade, além de ajudar a prevenir uma escassez energética, impacta nas questões ambientais e econômicas, pois existem danos ambientais na geração de energia e quanto menor o consumo menor o valor pago por esse bem.

Pesquisas do Ministério de Minas e Energia (MME), publicadas no BEN de 2019, com ano base 2018, apontam o setor industrial como o maior consumidor de energia elétrica do Brasil, representando 31,6% do consumo final. Um dos equipamentos mais usados no setor industrial que contribui para esse consumo é o motor de indução trifásico (MIT) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2019). Tal motor destaca-se entre os outros modelos principalmente em razão do sistema de distribuição de energia elétrica ser em corrente alternada trifásica, que simplifica sua instalação, além de apresentar menor custo, maior eficiência e menor custo de manutenção, entre outras vantagens. Assim sendo, estudos sobre eficiência e economia de energia envolvendo esses motores devem ser desenvolvidos e são muito pertinentes.

Em algumas aplicações é necessária a utilização de métodos de frenagem para motores e existe uma energia que é dissipada durante essas frenagens. Alguns desses métodos permitem que essa energia que seria perdida seja recuperada e usada para outros fins. Logo, é muito importante estudar sistemas de frenagem regenerativa para diminuir as perdas, tornando o consumo de energia elétrica mais eficiente.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é fazer um levantamento de estudos sobre as principais tecnologias da frenagem regenerativa, mostrando as vantagens e desafios em sua utilização, os princípios básico de funcionamento de todo o sistema (motor, inversor e freio) e uma análise da viabilidade, para ser possível escolher a melhor tecnologia para cada caso.

2 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES

2.1 Tipos De Motores

Motores elétricos são equipamentos capazes de transformar energia elétrica em energia mecânica. Existem vários tipos de motores elétricos para atender as diversas necessidades existentes no mercado. É possível dividir esses tipos de motores em dois grandes grupos levando em consideração o seu tipo de alimentação:

- a) Motores de corrente contínua: São equipamentos que possuem um custo de aquisição e manutenção maiores e, além disso, precisam de uma fonte de alimentação de corrente contínua, que pode significar a aquisição de outros equipamentos. São motores que possuem controles de grande flexibilidade e precisão. Portanto, esses modelos são utilizados em casos específicos que compensem o custo excedente.
- b) Motores de corrente alternada: São os mais comuns, pois são compatíveis com a distribuição de energia elétrica que também é em corrente alternada. Estes dividem-se em outros dois grupos, sendo eles motores síncronos, que trabalham com velocidade fixa, sem influência do escorregamento e são normalmente usados em motores de grande porte, por questões financeiras, e motores assíncronos ou de indução, que funcionam normalmente com velocidade próxima da nominal, variando moderadamente com a carga, e que possuem, também, características importantes como grande simplicidade, robustez e baixo custo, o que os tornam o tipo mais popular de todos. Atualmente, o avanço dos inversores de frequência, que podem controlar a velocidade deles, permite a utilização desse tipo de motor para muitas aplicações.

2.2 Características físicas de um motor de indução trifásico (MIT)

Sabendo que os motores de indução são os mais trabalhados, estes serão utilizados como referência neste estudo. Os motores elétricos necessitam, para o seu funcionamento, de duas partes essenciais que são elas: o estator e o rotor.

O estator é um circuito magnético que fica fixado na carcaça. É composto por três enrolamentos dispostos a 120° mecânicos (enrolamento trifásico) acomodados em um núcleo ferromagnético laminado. A rede elétrica é conectada nesse circuito e produz um fluxo girante (na frequência da rede) que atravessa o entreferro e o rotor e, assim, induz tensão no enrolamento do rotor, gerando assim uma energia cinética capaz de realizar o giro.

O rotor é a parte dinâmica do motor que transmite a energia mecânica produzida por ele até a carga que está acionando, composto por um cilindro com núcleo ferromagnético laminado, com ranhuras na superfície. Nessas ranhuras, estão alocados um ou mais enrolamentos. Motores de indução possuem dois tipos diferentes de enrolamentos para rotores, sendo as bobinas de cobre (rotor bobinado) ou barras de alumínio paralelas entre si, curto-circuitadas por anéis de mesmo material (rotor gaiola).

O rotor bobinado é envolvido por um enrolamento isolado similar ao enrolamento do estator. Cada fase do rotor (trifásico) possui um anel no exterior, montado no eixo, que permite conexões. Esses anéis e as escovas servem para conectar resistências variáveis externas, em série, com a resistência do rotor. Isso significa uma vantagem em relação ao rotor gaiola de esquilo, pois as resistências variáveis (uma por fase) aumentam a resistência do rotor na partida, permitindo um maior conjugado, e ao atingir a velocidade nominal os enrolamentos são curto-circuitados, tornando o funcionamento equivalente ao de um rotor de gaiola.

Algumas desvantagens que podem ser destacadas em relação ao rotor gaiola de esquilo são que os anéis precisam ser alimentados por escovas, fazendo com que a manutenção desses motores ocorra em maior frequência, tal como uma maior complexidade do núcleo e dificuldade de construção, tornando-os mais caros. Além disso, existem tecnologias de controle de partida em dispositivos como os inversores de frequência e as *soft-starters* que estão muito mais acessíveis atualmente, fazendo com que eles percam espaço em pequenas potências.

O rotor tipo gaiola de esquilo curto-circuitada não possui nenhum tipo de conexão externa, sua alimentação é proveniente da indução eletromagnética do estator sobre as barras do rotor. Não existe isolamento entre o núcleo do rotor e as barras, pois as tensões induzidas são baixas e o entreferro entre o rotor e o estator deve ser muito pequeno para se alcançar a maior intensidade de campo. As vantagens sobre o rotor bobinado são possuir uma quantidade menor de peças mecânicas e um sistema mais simples, logo, menores custos de manutenção e construção.

A principal desvantagem em relação ao rotor bobinado é que o conjugado de partida somente pode ser controlado por meio da tensão aplicada nos terminais do estator ou pela frequência. Isso significa a utilização de métodos mais sofisticados que hoje pode ser resolvido mais facilmente, como foi dito anteriormente, pela popularização dos inversores de frequência e as *soft-starters*.

Os motores do tipo gaiola de esquilo são os mais usados pela indústria. Isso pode ser explicado pelo seu baixo custo de aquisição, menor necessidade de manutenção e o avanço da eletrônica de potência, dominando, assim, o mercado para cargas de pequenas e médias potências.

2.3 Campo magnético girante

O campo magnético girante é o princípio básico do funcionamento de um motor de indução. Quando o estator da máquina é alimentado por uma fonte trifásica com tensão de mesma amplitude e defasadas em 120° , correntes elétricas passam a circular nos enrolamentos gerando, em cada fase, campos pulsantes com o mesmo desfasamento entre as tensões de alimentação. O eixo de simetria de cada campo pulsante é fixo no espaço, mas a resultante entre eles é um campo de valor constante que gira em algum sentido com determinada velocidade, chamado campo girante.

2.4 Velocidade síncrona

Como já esclarecido anteriormente, o funcionamento do MIT é baseado no campo magnético girante. A velocidade desse campo depende da frequência da rede que alimenta a máquina e o número de polos, que é determinado pela disposição

física dos enrolamentos do estator no motor. Essa velocidade pode ser considerada constante, pois o número de polos não muda e a frequência da rede possui variações quase imperceptíveis. Denominada de velocidade síncrona, pode ser calculada de acordo com a equação (1), ou pela rotação em (2).

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (1)$$

Em que:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2)$$

Adotando:

ω_s – Velocidade síncrona em rad/s;

n_s – Velocidade síncrona em rpm;

f – Frequência da rede em Hz;

P – Número de polos.

Com base nas equações anteriores e reforçando que a velocidade síncrona é dependente da frequência e número de polos, é possível apresentar as rotações mais comuns utilizadas em motores de indução em uma tabela. Considerando as frequências de 60 Hz e 50 Hz, que são as mais comuns no mundo, apresenta-se a Tabela 1.

Tabela 1 – Rotações síncronas por frequência e número de polos.

Número de polos	$f = 60Hz$	$f = 50Hz$
2	3.600 rpm	3.000 rpm
4	1.800 rpm	1.500 rpm
6	1.200 rpm	1.000 rpm
8	900 rpm	750 rpm

Fonte: O autor

2.5 Escorregamento

Além da velocidade síncrona, existe outro termo que é importante lembrar, a velocidade do eixo do motor, pois essa grandeza pode indicar alguns fatores significativos. A velocidade do campo girante e do rotor são diferentes, isso acontece pela própria característica construtiva do motor que faz com que uma pequena quantidade de energia que é transferida ao rotor pelo estator seja perdida. Essas perdas ocorrem pelo pequeno atrito que é gerado entre os rolamentos e o eixo do motor e principalmente devido às cargas ligadas ao motor e entre outras perdas.

Assim sendo, o campo girante sempre estará adiantado do rotor. Além disso, quanto maior a solicitação de energia pelas cargas mecânicas, menor será a velocidade rotórica. A rotação nominal do motor determina os limites desse procedimento, que corresponde ao escorregamento nominal.

A diferença entre a velocidade do campo girante magnético e a velocidade no eixo do motor (o rotor) define o conceito de escorregamento. É relevante ressaltar que quando o motor está funcionando a vazio, ou seja, sem acionar nenhuma carga em seu eixo, a rotação do motor é praticamente a mesma que a velocidade síncrona. Logo, o escorregamento tem um valor próximo de zero e aumenta conforme o aumento de carga. É possível representar essa grandeza com uma equação (3) matemática.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

Sendo:

s - Escorregamento;

n - Velocidade do motor.

É comum representar o escorregamento em porcentagem, para isso, basta multiplicar a equação (3) por 100. Considerando o que foi citado, nota-se a importância do conhecimento da grandeza escorregamento na operação dos motores de indução.

2.6 Rendimento

O rendimento representa a eficiência com que o motor converte a energia elétrica absorvida pela rede em energia mecânica disponível em seu eixo. Chamando de “ P_{mec} ” a potência útil no eixo e “ P_{el} ” a potência elétrica absorvida da rede, o rendimento pode ser representado matematicamente pela seguinte equação (4).

$$\eta(\%) = \frac{P_{mec}}{P_{el}} \times 100 \quad (4)$$

Além disso, pode-se dizer que a potência mecânica corresponde à potência elétrica menos as perdas. Chamando de perdas totais “ P_t ” todas as perdas presentes no motor, a equação (5) também pode representar o rendimento de um motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_{el} - P_t}{P_{el}} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

$$P_t = P_{atrito+ventilação} + P_{fe} + P_s + P_r + P_{adicionais} \quad (6)$$

As perdas do motor de indução que foram consideradas na equação (6) podem ser divididas em:

Perdas por atrito e ventilação ($P_{atrito+ventilação}$): São as perdas aerodinâmicas devido ao atrito das partes móveis com o ar, a energia gasta pelos ventiladores acoplados e as perdas provocadas pela fricção.

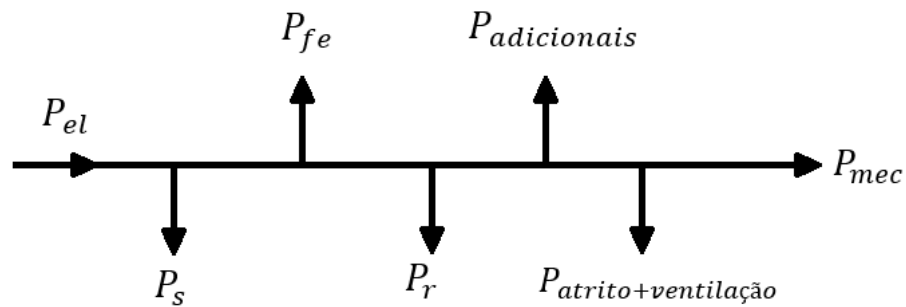
Perdas no ferro (P_{fe}): Perdas causadas pelas correntes parasitas e histerese.

Perdas joule nos enrolamentos (P_s e P_r): As perdas provocadas pelo aquecimento nos enrolamentos do estator e do rotor.

Perdas adicionais ($P_{adicionais}$): Perdas ocasionadas por correntes de cargas no ferro e outras peças de metal existentes na máquina, exceto os enrolamentos.

É possível visualizar melhor as perdas existentes em um motor por meio do esquema representado na Figura 1.

Figura 1 – Balanço das perdas no MIT.

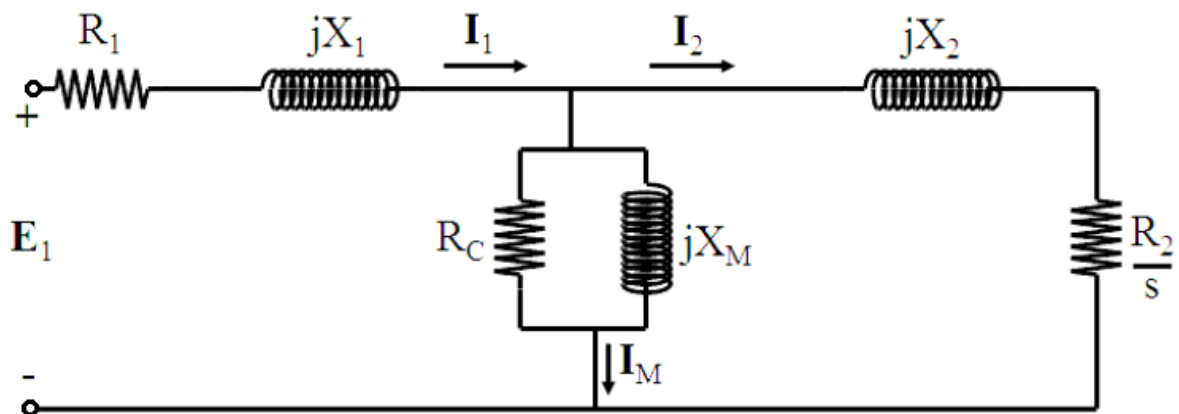


Fonte: O autor

2.7 Circuito equivalente

Para ser possível a modelagem matemática do funcionamento de um motor de indução, utiliza-se um circuito elétrico equivalente correspondente. Nessa dedução, o circuito pode ser representado por três impedâncias mistas compostas por um resistor e um indutor, sendo que cada impedância corresponde a uma parcela do motor. O estator foi representado por R_1 e X_1 , o circuito do rotor foi associado a R_2 e X_2 , sendo que a parcela do R_2 depende do escorregamento e consequentemente da carga conectada ao motor. As perdas magnéticas são representadas por R_c e X_m . A tensão aplicada nesse circuito, ou seja, no estator do motor é E_1 . Dito isso, o circuito equivalente pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito equivalente por fase do motor de indução.

Fonte: FITZGERALD, *et al.*, 2006, p. 308. Adaptado.

Em que:

R1 - Resistência do estator;

X1 - Reatância de dispersão do estator;

RC - Resistência equivalente às perdas no núcleo;

XM - Reatância de magnetização;

R2/s - Resistência do rotor em função do escorregamento (refletida ao estator);

X2 - Reatância de dispersão do rotor (refletida ao estator);

E1 - Tensão de fase conectada ao motor;

I1 - Corrente de fase do estator;

I2 - Corrente de fase do rotor (refletida ao estator);

IM - Corrente de magnetização.

2.8 Fator de potência

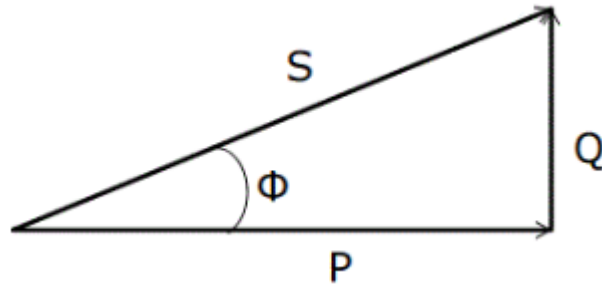
Existem três tipos de potência que, se tratando de motores, é possível trabalhar, são elas: potência ativa, reativa e aparente. Potência ativa é aquela que é convertida em trabalho mecânico, calor (perdas), luz, entre outros, medida em KW e seus múltiplos. A potência reativa é necessária para a magnetização, que mantém os campos eletromagnéticos das cargas indutivas. É medida em KVar e seus múltiplos. A potência aparente, medida em KVA, é a soma vetorial das duas potências.

Já que não produz trabalho, apenas circula na rede elétrica entre as cargas e a fonte, ocupando um espaço do sistema que poderia ser utilizado para levar mais potência útil ao consumidor, a potência reativa não é desejável no sistema e deve ser controlada, isso pois energia reativa pode ser suprida localmente por meio de bancos de capacitores.

Sendo assim, entende-se que um consumidor pode tanto consumir quanto gerar energia reativa. Para isso, existe um órgão que regulamenta o quanto de energia reativa um consumidor pode demandar ou fornecer. Esse parâmetro é determinado

pelo fator de potência, que é um valor que quantifica a potência ativa que está sendo consumida em relação à potência aparente, ou seja, o fator de potência pode ser calculado a partir da equação (7) e ser relacionado com as potências a partir do diagrama da Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de potências.



Fonte: JOHNSON; HILBURN; JOHNSON, 1994, p. 310

$$fp = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (7)$$

Em que:

fp – Fator de potência;

$\cos \varphi$ – Cosseno do ângulo entre P e S;

Q – Potência reativa em var;

P – Potência ativa em W;

S – Potência aparente VA.

Logo, é possível perceber que o fator de potência também pode ser chamado de $\cos \varphi$, sendo que ele corresponde ao cosseno do ângulo φ entre P e S. Além disso, esse parâmetro é um valor entre zero e um, que pode ser indutivo (consumindo reativo) ou capacitivo (gerando reativo).

2.9 Conjugado

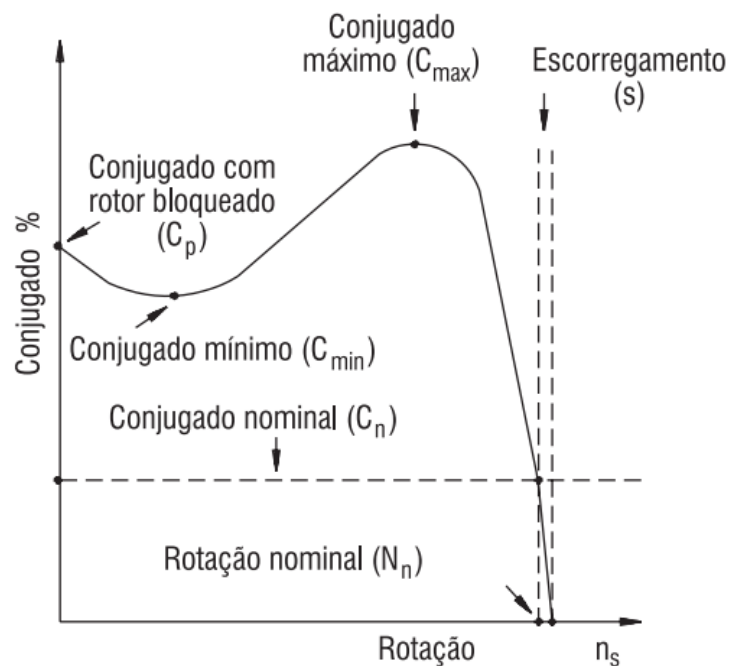
“O conjugado (também chamado torque ou momento) é a medida do esforço necessário para girar um eixo.” (WEG, 2019, p.7). Para motores elétricos, é importante

conhecer a dinâmica do conjugado em diferentes situações, destaca-se o conjugado de partida e de regime permanente, pois estes determinam o tipo de carga que poderá ser acionada pelo motor.

Quando o motor está trabalhando em regime permanente com alguma carga em seu eixo e ocorre um pequeno aumento da solicitação de potência, o escorregamento cresce e a velocidade no eixo do motor cai. Consequentemente, os campos magnéticos solicitam maior intensidade e a corrente aumenta para sustentar o campo e manter a carga no eixo. Cargas de valores mais próximos da nominal resultam em uma redução do ângulo φ entre a tensão e a corrente no motor, aumentando o fator de potência.

O conjugado máximo de um motor de indução é em torno de duas a três vezes maior que o conjugado nominal. O conjugado mínimo é o necessário para que o motor consiga vencer a inércia e iniciar o movimento. A Figura 4 mostra a relação entre o conjugado e a velocidade no motor por meio de uma curva.

Figura 4 – Curva do torque x rotação.



(Fonte: WEG, 2019, p.25)

Existem dois meios de controlar o torque de um motor elétrico de indução, variando a velocidade síncrona, ou seja, alterando a frequência de alimentação que é proporcional a ela ou variando a tensão de entrada.

3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

3.1 Características de funcionamento

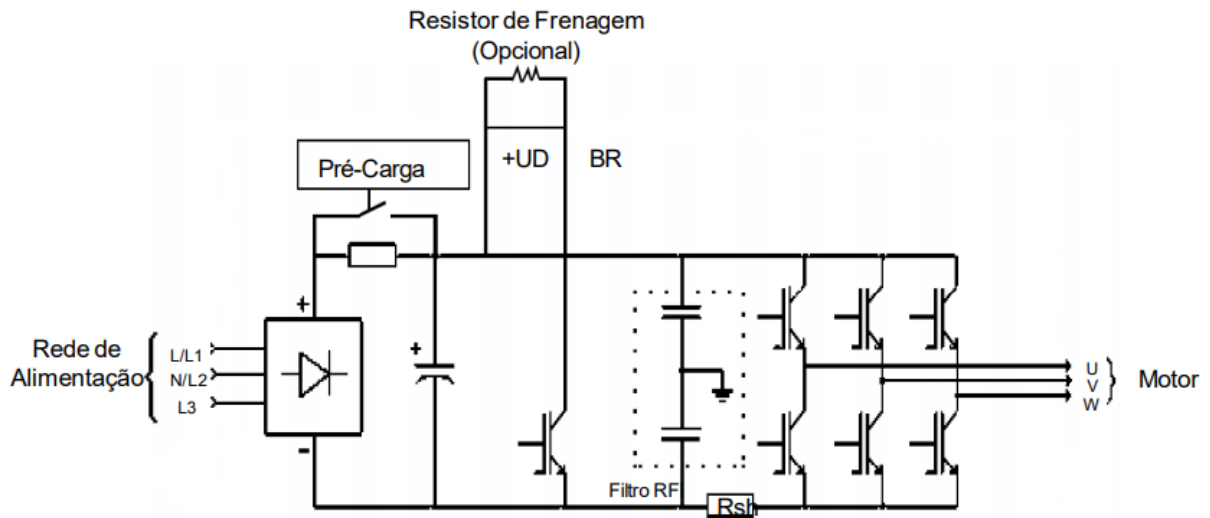
Além de estudar o funcionamento dos motores de indução trifásico, é muito importante estudar também o inversor de frequência, que é um dispositivo que usa a eletrônica de potência para controlar alguns aspectos importantes do motor. Os inversores de frequência permitem variar a velocidade nos motores de indução com um bom rendimento, adaptando a velocidade conforme a necessidade dos processos, e também é possível obter conjugados de partida elevados com correntes menores.

A tecnologia utilizada em inversores de frequência está cada dia mais avançada, estão sendo equipados com sistemas de processamento mais poderosos, que permitem a implementação de sistemas de controle aprimorados, aumentando as possibilidades de aplicação de motores de indução.

Basicamente o funcionamento do inversor pode ser dividido em três partes. A primeira é um circuito retificador, que é alimentado por uma fonte trifásica da rede em corrente alternada (C.A.) e convertida em corrente contínua (C.C.). A segunda parte tem a função de filtrar e manter a tensão C.C. que foi recebida do retificador de forma pulsante em tensão estável, nessa parte, existem diversas topologias variadas que são empregadas por fabricantes e modelos diferentes. Além disso, são incluídos, aqui, itens como sistema de dissipação de energia para inversores com módulos de frenagem e em alguns modelos super capacitores e/ou baterias. A terceira e última parte do sistema de funcionamento dos inversores tem a função de converter a tensão C.C. novamente em tensão C.A. com amplitude da tensão e frequência variáveis. A técnica mais utilizada para realizar essa função é composta por transistores, que são vinculados a um circuito de controle, que coordena o chaveamento destes, controlando-os por modulação por largura de pulsos (*Pulse Width Modulation – PWM*)

permitindo gerar o sinal com uma frequência predefinida. A Figura 05 mostra um exemplo de topologia empregado nos inversores de frequência.

Figura 5 – Exemplo circuito de potência inversor de frequência.

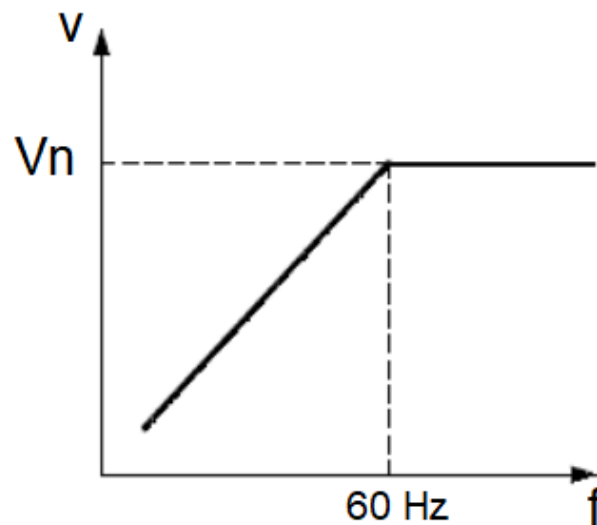


(Fonte: WEG, 2019, p.16)

3.2 Método de controle escalar

O método de controle escalar, também denominado de “V/F constante”, consiste basicamente em realizar um ajuste da velocidade em relação a uma curva que relaciona tensão e frequência aplicada no estator, ou seja, manter constante a relação tensão/frequência (V/f). Nesse caso, o conjugado do motor terá um valor constante, independente da velocidade, e uma baixa circulação de corrente no estator. A curva que determina essa relação pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 – Curva característica.



Fonte: MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p.56

Esse sistema possui um valor limitante em sua operação em baixas velocidades. Como pode ser visto na equação 8, uma frequência baixa faz com que a indutância dos enrolamentos fique pequena, tornando a impedância do sistema altamente resistiva, fazendo com que o conversor não consiga manter o torque. A frequência limitante varia de equipamento, mas costuma ser entre 3Hz e 6 Hz.

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (8)$$

Em que:

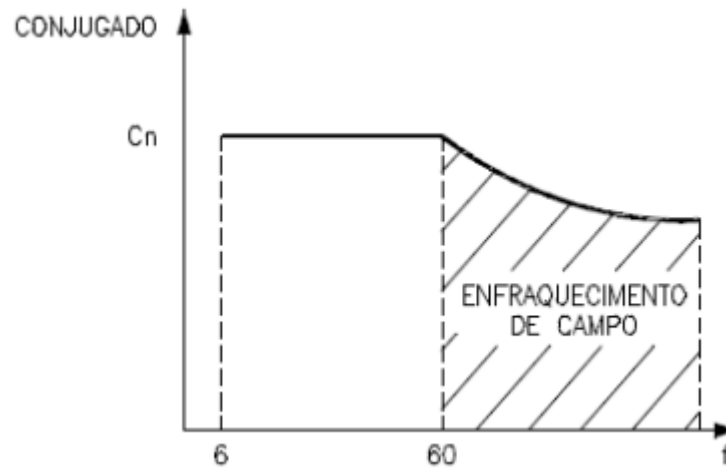
X_L – Indutância em Ω ;

f – Frequência em Hz;

L – Indutância em Henrris.

Além disso, existe uma tensão máxima que pode ser aplicada em um motor para que o isolamento dele não seja danificado, que é a própria tensão nominal do motor. Para manter, portanto a relação V/f constante, a corrente diminuirá. Consequentemente, o torque também enfraquecerá. Logo, acima de 60Hz existe uma região que é denominada enfraquecimento de campo. A Figura 7 mostra a relação do torque com a frequência.

Figura 7 – Curva característica do conjugado x frequência.



Fonte: MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p.56

3.3 Método de controle vetorial

O sistema de controle vetorial não possui uma curva de parâmetros predefinida como o controle escalar. Esse sistema é aplicado em situações com maior dinâmica, com necessidade de respostas rápidas e maior precisão no controle da velocidade. Seu controle é baseado na variação de tensão e frequência proporcionalmente à necessidade de torque, com base nos valores da corrente de magnetização e corrente no rotor do motor.

Além disso, a aplicação desse método exige a utilização de um microprocessador e conhecimento de alguns parâmetros do motor, como a resistência e a indutância do estator e do rotor, para que o controle seja mais refinado para cada tipo de motor. O cálculo das correntes de magnetização que produz fluxo e a corrente que produz o torque efetivamente precisa ser em tempo real e somente um microprocessador é capaz disso. A corrente total é soma vetorial dessas duas correntes e caracteriza o desempenho do inversor.

As principais vantagens de tal método é a grande precisão no controle da velocidade, bom desempenho na dinâmica e a possibilidade de operação em baixas velocidades com um torque constante, mesmo que a carga não seja estável.

4 FRENAGEM ELÉTRICA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

4.1 Métodos de frenagem elétrica

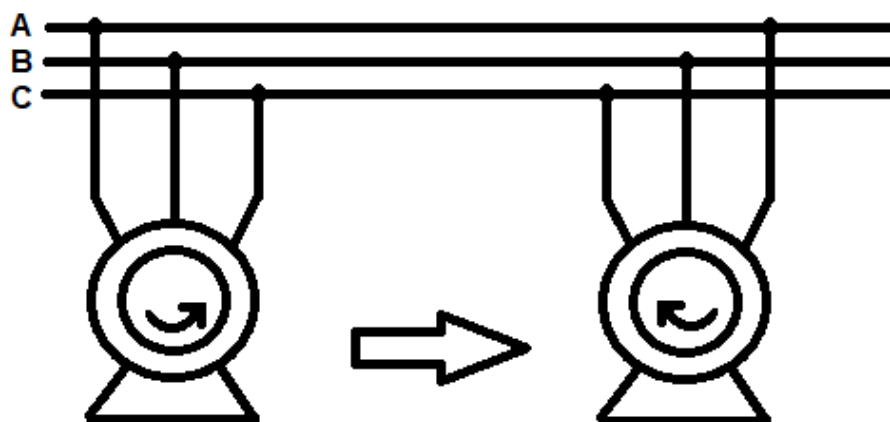
Existem duas formas que são utilizadas para realizar a frenagem de motores, por meio de freios mecânicos ou elétricos. Os freios elétricos possuem vantagens em relação aos mecânicos, pois exigem menor frequência de manutenção, são eficientes, garantem maior precisão durante a frenagem e possibilitam a regeneração de parte da energia dissipada no processo. Serão abordados então, os principais métodos de frenagem elétrica neste trabalho, sendo eles:

- Frenagem Contracorrente;
- Frenagem CC;
- Frenagem Regenerativa / Dinâmica.

4.2 Frenagem contracorrente

A frenagem por contracorrente acontece quando é invertida a sequência de fases de um motor durante sua operação, para isso, deve-se trocar duas fases do motor, como pode ser visto na Figura 8. Essa inversão deve ser realizada por contadores eletromecânicos.

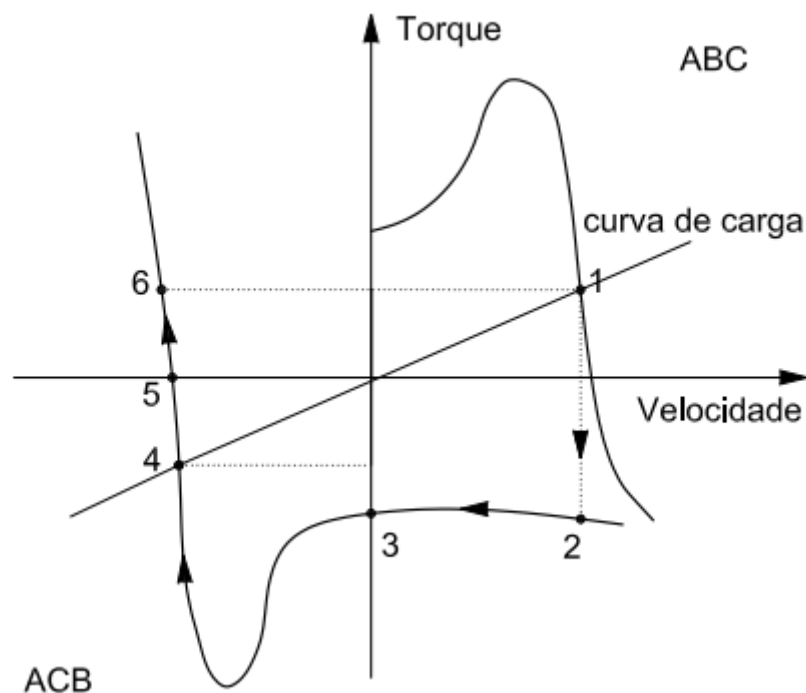
Figura 8 – Inversão de fases na frenagem por contracorrente.



Fonte: O autor

O campo magnético que é gerado no estator pela circulação de corrente nos enrolamentos tem a direção determinada pela sequência de conexão das fases nos terminais do motor. Quando ocorre uma alteração nessa sequência, o sentido de giro do campo magnético é alterado. A Figura 9 apresenta a curva característica do conjugado pela velocidade de um motor de indução, semelhante à Figura 4, em que é possível visualizar o comportamento da máquina durante a frenagem por contracorrente, considerando uma determinada curva de carga.

Figura 9 – Curva característica do conjugado x velocidade durante a frenagem.



Fonte: O autor

Supondo que o motor seja conectado a uma sequência de fase inicial ABC e que, após a partida, atinja uma velocidade constante para a curva de carga considerada, pode-se definir que o motor se encontra no ponto (1), no 1º quadrante da Figura 9. Com a inversão da sequência de fase, agora sendo ACB, o motor sairá do ponto (1) e irá para outro ponto de operação estacionário, que corresponde ao mesmo valor de conjugado e velocidade anteriores, porém em sentido contrário, que

está localizado no ponto (4), no 3° quadrante. Antes de chegar nesse ponto, o motor passará por outros, destacados na Figura 8. Inicialmente, se deslocará do (1) para o ponto (2), mas devido à diferença de conjugado de carga ele continua se movendo até o ponto (3) onde a velocidade é zero e o motor pode ser parado. Caso o motor seja desenergizado nesse instante, pode-se dizer que a frenagem está completa, senão ele irá se mover até atingir ponto (4).

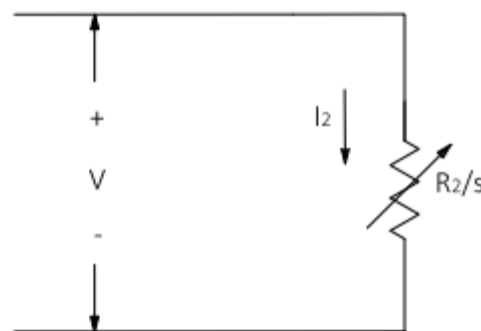
A frenagem por contracorrente não permite a recuperação da energia gerada durante a frenagem do motor, analisando a curva de conjugado e do circuito equivalente do MIT é possível compreender essa característica. Com base na equação 3 e nas curvas apresentadas na Figura 9, pode-se dizer que no ponto (1), sequência ABC, o escorregamento é definido pela equação 10 e no ponto (2), sequência ACB, o escorregamento é definido pela equação 11.

$$s_1 = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \therefore 0 < s_1 < 1 \quad (10)$$

$$s_2 = \frac{-n_s - n}{-n_s} = \frac{n_s + n}{n_s} \quad \therefore 1 < s_2 < 2 \quad (11)$$

Após definido os intervalos de valores dos escorregamentos para essas duas condições de operação, é preciso analisar o circuito equivalente do motor para entender as condições de funcionamento. Com base na Figura 2, é possível representar apenas o circuito equivalente do rotor, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Circuito equivalente do rotor simplificado.



Fonte: FITZGERALD, *et al.*, 2006, p. 308. Adaptado.

Outra forma existente de representar o circuito equivalente do rotor é separando a impedância $\frac{R_2}{s}$ em duas partes, uma que depende do escorregamento e

outra não. Após um desenvolvimento matemático, essa relação pode ser enxergada pela equação 12,

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{s}$$

$$R_2 + \frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{s} + R_2$$

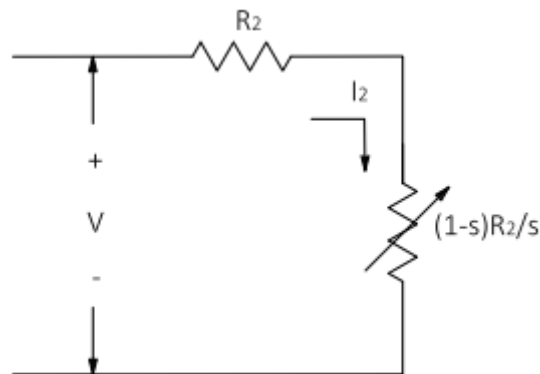
$$R_2 + \frac{R_2}{s} - R_2 = \frac{R_2}{s}$$

$$R_2 + \frac{R_2 - R_2 s}{s} = \frac{R_2}{s}$$

$$R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s} = \frac{R_2}{s} \quad (12)$$

Dessa maneira, pode-se também representar o circuito equivalente do rotor na Figura 11.

Figura 11 – Circuito equivalente do rotor dissolvido.



Fonte: FITZGERALD, *et al.*, 2006, p. 308. Adaptado.

Observa-se, com base no circuito equivalente apresentado na Figura 11 e nas equações 10 e 11, que o ramo do circuito que depende do escorregamento será positivo quando a máquina estiver trabalhando no ponto (1) e negativo quando estiver no ponto (2), de sequência invertida.

$$R_2 \frac{(1-s_1)}{s_1} > 0 \quad (13)$$

$$R_2 \frac{(1-s_2)}{s_2} < 0 \quad (14)$$

Analisando a equação 13, fica demonstrado que a máquina no ponto (1), ou seja, em condições normais, opera como motor e está consumindo potência, visto que a resistência tem valor positivo. No ponto (2), a resistência pode ser representada por um valor negativo, que não existe na prática, porém é uma forma de representar a inversão do fluxo de potência, conforme a expressão 14. Logo o MIT está entregando potência, que é consumida pelo próprio motor por meio da resistência R_2 representada na Figura 11. Essa potência é convertida em calor, não havendo nenhuma parcela de energia devolvida e ainda consumirá simultaneamente uma parcela de energia da fonte de alimentação do motor. Portanto, a energia liberada durante a frenagem por inversão de fases é convertida em calor e não é possível convertê-la em energia elétrica.

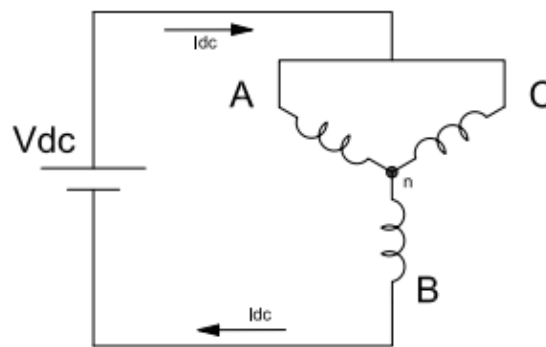
4.3 Frenagem CC

Na frenagem por corrente contínua, aplica-se um campo magnético estacionário no entreferro por injeção de corrente contínua nos enrolamentos do estator, induzindo um conjugado também estacionário no rotor. Esse campo irá induzir corrente no secundário, fazendo com que as perdas no rotor aumentem. Enquanto houver corrente contínua nos enrolamentos, o motor buscará se alinhar ao campo, ou seja, parar o movimento e permanecer estacionado, assim como o campo. Dessa forma, existirá uma resistência a um conjugado em qualquer sentido e essa força que resiste ao movimento é proporcional a corrente contínua que alimenta o motor (BIM, 2012).

O tipo de topologia do sistema de frenagem CC irá variar conforme o tipo de aplicação. Na topologia mais simples, é injetado corrente contínua diretamente no motor até que ele pare completamente, como é evidenciado na Figura 12. Nesta, a energia é dissipada nos enrolamentos do motor na forma de calor. A simplicidade do sistema facilita a sua utilização, porém deve ser tomadas algumas precauções, devido ao fato de que caso a frenagem seja realizada frequentemente ou com duração muito prolongada, pode superaquecer o motor, danificando-o ou reduzindo sua vida útil. Tal

topologia é conhecida como Frenagem por Injeção de Corrente Contínua Não Dissipativa.

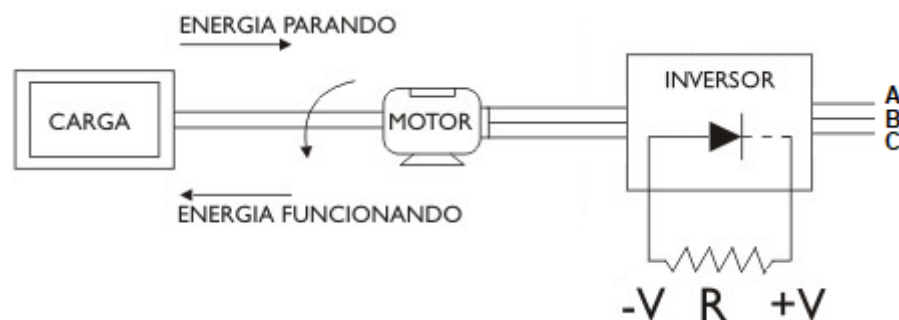
Figura 12 – Frenagem por Injeção de Corrente Contínua Não Dissipativa.



Fonte: O autor

Outro tipo de topologia de frenagem por corrente contínua é utilizar um sistema de dissipação de energia acoplado ao motor, como pode ser visto na Figura 13. Durante a realização da frenagem, utiliza-se um resistor para dissipar a energia que seria descarregada nos enrolamentos, assim, reduzindo o aumento da temperatura. Esse modelo é mais recomendado para frenagens que demandam um período mais elevado, como as frenagens frequentes. Além disso, os inversores de frequência são amplamente utilizados nesse tipo de sistema chamado de Frenagem por Injeção de Corrente Contínua Dissipativa, pois muitos deles já possuem essa função programada e permitem a conexão de resistores.

Figura 13 – Frenagem por Injeção de Corrente Contínua Dissipativa.



Fonte: OHMIC - Resistores e Reostatos, 2019. Adaptado.

O processo de dissipação da energia em resistores exige a utilização de uma chave semicondutora para conectar a carga resistiva ao circuito. O comando da chave pode ser feito pelo nível de tensão contínua, e o tempo para diminuir a velocidade depende da razão de dissipação da energia no banco de resistores, que deve ser dimensionado, considerando também a inércia da carga.

As duas topologias de frenagem CC citadas anteriormente podem ser classificadas como frenagens de elevado escorregamento, pois a diferença entre a velocidade síncrona com a injeção de corrente contínua passa a ser zero e a velocidade do motor antes de iniciar a frenagem é muita alta. Essa é uma característica que pode ser comparada à partida de um motor elétrico de indução, em que o rotor está parado e a velocidade do campo do estator é equivalente à síncrona. Portanto, devem ser tomadas algumas precauções com os níveis de tensão CC a serem aplicados no motor para que não haja danos nos enrolamentos.

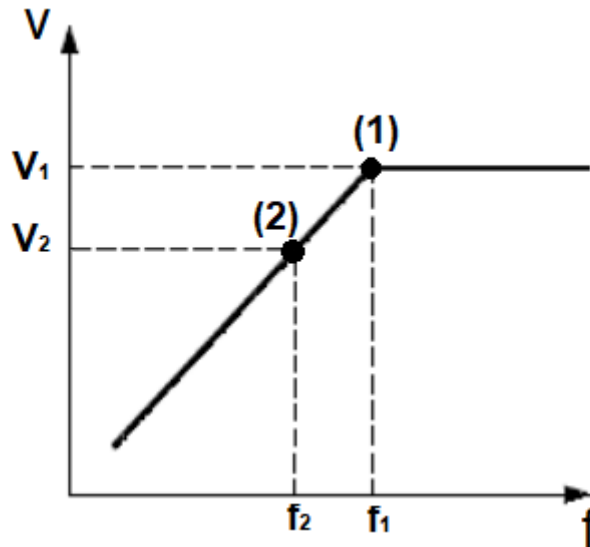
4.4 Frenagem regenerativa

Sempre que um sistema possui conversões eletromecânicas há perdas de energia, pois parte dela transforma-se em perdas indesejáveis como calor, som, vibração, entre outras. Assim, é desejável diminuir essas conversões quando se quer aumentar a eficiência de um sistema, convertendo a energia cinética que é gerada durante a frenagem em energia elétrica e aproveitá-la para outros fins. Para isso, pode-se armazená-la em baterias, banco de capacitores ou até mesmo devolvê-la para a rede CA em que o motor está conectado. Os sistemas de frenagens que utilizam essa lógica são chamados de Frenagem Regenerativa.

Para ser possível a aplicação da Frenagem Regenerativa em um sistema, é preciso que o controle de velocidade do motor seja realizado por meio de um inversor de frequência. Como foi dito no item 3.2 deste estudo, o inversor de frequência controla a velocidade de um motor por intermédio da frequência aplicada ao estator, mantendo-se a razão (V/f) constante, método esse chamado de controle escalar. Quando se diz que um inversor irá fazer a frenagem de um motor, significa que ele irá fazer uma redução na velocidade dele, parando completamente ou não. Pelo método escalar, pode-se dizer que para o inversor praticar essa ação, deve-se diminuir a frequência da tensão aplicada ao estator, chamada de velocidade síncrona, e a tensão

aplicada. Essa variação pode ser vista na Figura 14, sendo o estado inicial de alimentação do motor representado pelo ponto (1) e o estado final após a frenagem o ponto final (2).

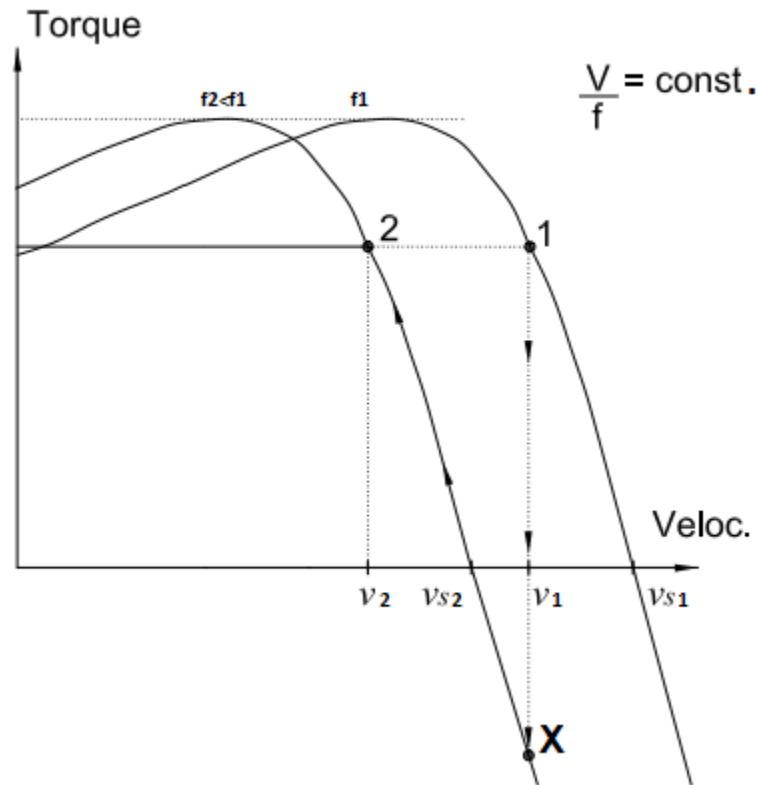
Figura 14 – Curva (V/f) da frenagem regenerativa.



Fonte: MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p.56. Adaptado.

É importante analisar, também, a frenagem citada anteriormente por meio da curva de torque por velocidade, em que as condições do motor vão do ponto (1) ao (2) e agora passará também por um ponto de transição (X), que permitirá chegar em algumas conclusões importantes.

Figura 15 – Curva do conjugado com a diminuição da velocidade.



Fonte: O autor.

Quando ocorre uma diminuição na frequência aplicada no motor, significa que mudou a velocidade síncrona do estator, logo, alterou-se também o escorregamento do motor, visto que o escorregamento depende da velocidade síncrona e da velocidade do rotor, como pode ser visto na equação 03.

O motor inicialmente encontra-se operando no ponto (1) com uma determinada tensão (V_1), frequência (f_1), velocidade (v_1) e condições que estão sendo atendidas com uma velocidade síncrona (v_{s1}). É possível observar pela curva que ($v_1 < v_{s1}$), logo, o escorregamento será positivo e menor que 1 ($0 < s_1 < 1$), como mostra a equação 15.

$$s_1 = \frac{v_{s1} - v_1}{v_{s1}} \quad \therefore 0 < s_1 < 1 \quad (15)$$

Como foi dito anteriormente, quando um motor faz uma frenagem, o inversor diminui a tensão e frequência aplicada no motor na mesma proporção. Logo, pode-se dizer que o motor passa a ter uma frequência ($f_2 < f_1$), e consequentemente uma velocidade síncrona ($v_{s2} < v_{s1}$), assim, o motor passa a trabalhar em outra curva de

conjugado por velocidade, que foi representada pela curva 2, na Figura 15. Sabe-se que a velocidade do rotor tende a acompanhar a do estator, logo, a velocidade rotórica irá diminuir também. No instante da mudança estabelecida, o motor passará a operar em um determinado ponto na nova curva de torque, pois a inércia mecânica não permite a variação imediata da velocidade. Sendo assim, haverá uma migração do ponto (1) para o ponto (X), como pode ser visto na Figura 15.

O motor agora encontra-se operando no ponto (X) com uma determinada tensão (V_2), frequência (f_2), velocidade (v_1), condições que estão sendo atendidas com uma velocidade síncrona (vs_2). É possível observar pela curva que ($v_1 > vs_2$), logo, o escorregamento será negativo ($s_x < 0$), como mostra a equação 16.

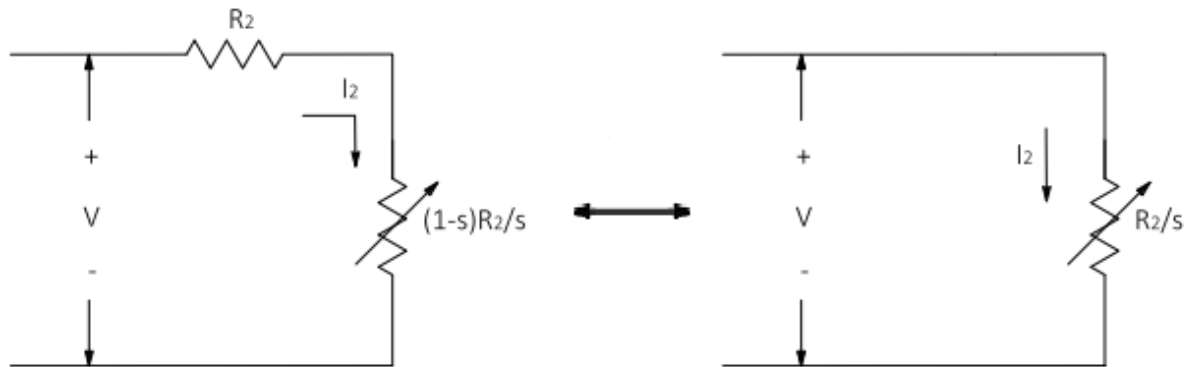
$$s_x = \frac{vs_2 - v_1}{vs_2} \quad \therefore s_x < 0 \quad (16)$$

Após passar pelo ponto (X), o motor irá diminuir de velocidade até atingir o ponto (2), ponto em que as condições de tensão, frequência e velocidade síncrona são as mesmas do ponto (X), porém com velocidade (v_2), como pode ser visto na Figura 15. Agora, é possível, por meio da curva dois, dizer que ($v_2 < vs_2$), logo, o escorregamento voltará a ser positivo e menor que 1 ($0 < s_2 < 1$), como mostra a equação 17.

$$s_2 = \frac{vs_2 - v_2}{vs_2} \quad \therefore 0 < s_2 < 1 \quad (17)$$

Encontrado os valores de escorregamento para os pontos de operação do motor durante a frenagem, é possível fazer algumas análises. Para isso, é preciso analisar o circuito equivalente do rotor, que já foi representado nas Figuras 10 e 11, que juntas formam a Figura 16 e que foi desenvolvida na equação (12).

Figura 16 – Circuito equivalente do rotor.



Fonte: FITZGERALD, *et al.*, 2006, p. 308. Adaptado.

Analisando a Figura 16, é possível perceber que R_2/s é igual à soma de R_2 , que representa as perdas no cobre do rotor, com $(1-s)R_2/s$ que representa a conversão de energia elétrica em mecânica. Quando $(0 < s < 1)$, como no caso de s_1 e s_2 , é possível dizer que a resistência equivalente é positiva, ou seja, o motor está transformando energia elétrica em movimento. Essa relação pode ser vista na equação (18) e (19).

$$R_2 \frac{(1-s_1)}{s_1} > 0 \quad (18)$$

$$R_2 \frac{(1-s_2)}{s_2} > 0 \quad (19)$$

Quando $(s < 0)$, como é caso do s_x , que é o escorregamento do ponto (X) da Figura 15. Pode-se dizer que a resistência que representa a conversão de energia elétrica em mecânica é negativa, logo, o motor se comporta como gerador. Ou seja, transformando movimento em energia elétrica, como é visualizado na equação (20).

$$R_2 \frac{(1-s_x)}{s_x} < 0 \quad (20)$$

Sabe-se que a impedância do rotor não é composta apenas pela parte calculada na equação (20), existe também a resistência R_2 . Sendo assim, a energia regenerada não será aproveitada por completo, uma parte será dissipada nessa impedância, pois R_2 continua positivo. Diferente do que foi tratado para frenagem por contracorrente, em que $(R_2/s > 0)$, nesse caso $(R_2/s < 0)$, logo, a parcela de energia que restar poderá ser devolvida para a fonte.

4.4.1 Frenagem regenerativa com bateria

Bateria é um dispositivo capaz de armazenar e converter energia por meio de processos eletroquímicos. A bateria tem seu funcionamento baseado em movimentos de cargas elétricas entre os polos positivo e negativo. Os eletrodos positivo e negativo são colocados em uma membrana de material poroso e isolante e mergulhados em uma solução de ácido sulfúrico e água, chamada de eletrólito. Nesse ambiente ocorre reações químicas que desenvolvem tensão entre os polos. Quando o circuito é conectado a alguma carga – ou seja, quando o circuito é fechado –, os íons conseguem se movimentar pelo fluido eletrolítico e pela membrana isolante resultando, então, em corrente elétrica.

Esse dispositivo possui diversos fatores que devem ser levados em consideração ao serem utilizados em projetos, pois são relativamente caros, pelo seu curto tempo de vida. Portanto, para se escolher o melhor tipo de bateria para o projeto deve-se conhecer o tipo de carga, com base nos fatores abaixo:

- Vida útil: tempo em que a bateria pode ser utilizada antes de perder suas capacidades eletroquímicas;
- Ciclo de vida: quantidade de cargas e descargas que a bateria suporta ao longo de sua vida útil;
- Profundidade de descarga: carga mínima de energia que a bateria pode chegar sem diminuir a vida útil do equipamento;
- Eficiência: relacionada à resistência interna da bateria e correntes de auto descarga;
- Potência: relacionada à quantidade de energia que a bateria consegue armazenar;
- Tensão e corrente: níveis de tensão e corrente que a bateria irá funcionar;
- Local de instalação: determinará o tipo do material da bateria, pois cada uma necessita de um tipo de ambiente diferente, levando em conta fatores como ventilação, temperatura, entre outros para diminuir os riscos de explosão.

Além disso, em caso de banco de baterias, o projetista deverá planejar o número de baterias que serão conectadas em série e em paralelo, conforme o nível

de tensão e corrente que deseja atingir. Lembrando que, quando conectadas em série, soma-se a tensão e em paralelo soma-se a corrente.

A forma mais simples para a utilização de baterias na frenagem regenerativa é conectá-las entre os terminais da parte CC do inversor. Se o circuito de controle as acionar corretamente, os IGBT's (Transistor Bipolar de Porta Isolada) do inversor irão fazer transferência da energia da máquina durante a frenagem para as baterias, permitindo, então, a utilização futura da energia que foi armazenada.

4.4.2 Frenagem regenerativa com supercapacitância

Supercapacitor é um capacitor de capacitância significativamente maior do que os eletrolíticos comuns, com uma alta capacidade eletroquímica, porém com limites de tensão mais baixos. Pode-se dizer que essa é uma tecnologia recente, que está sendo utilizada para diferentes aplicações, pois ela permite armazenar quantidades consideráveis de energia. É possível dizer, então, que os supercapacitores se equivalem às baterias, porém com algumas vantagens e desvantagens que determinam qual a melhor aplicação de cada dispositivo.

Os supercapacitores não utilizam reações químicas, portanto a sua resistência interna é menor que a das baterias. Eles podem fornecer uma carga e descarga com maior velocidade, ou seja, entregam uma maior densidade de potência quando comparados com as baterias, podendo absorver grandes picos de corrente em um sistema com a tensão constante. Além disso, os supercapacitores toleram mais ciclos de carga e descarga, tem uma maior vida útil e podem trabalhar em diferentes temperaturas ambiente.

As desvantagens desse tipo de capacitor é que ele não tem a capacidade de armazenar energia por períodos elevados, como grande parte das baterias, ou seja, tem uma auto descarga elevada. Por isso, em muitos casos, os supercapacitores são utilizados em conjunto com as baterias, utilizando os supercapacitores para armazenar e suprir grandes picos de potência, enquanto as baterias armazenam volumes de energia por mais tempo.

A utilização de supercapacitores não se enquadra muito bem para frenagem de motores de indução trifásicos, porque é muito raro encontrar cargas que variam

constantemente e que podem gerar ou demandar grandes picos de energia. Normalmente as variações de velocidade nos motores são pequenas e possuem limites bem estabelecidos. Com isso, todas as vantagens que o supercapacitor possui não serão bem aproveitadas para motores de indução, tornando inviável a utilização deles.

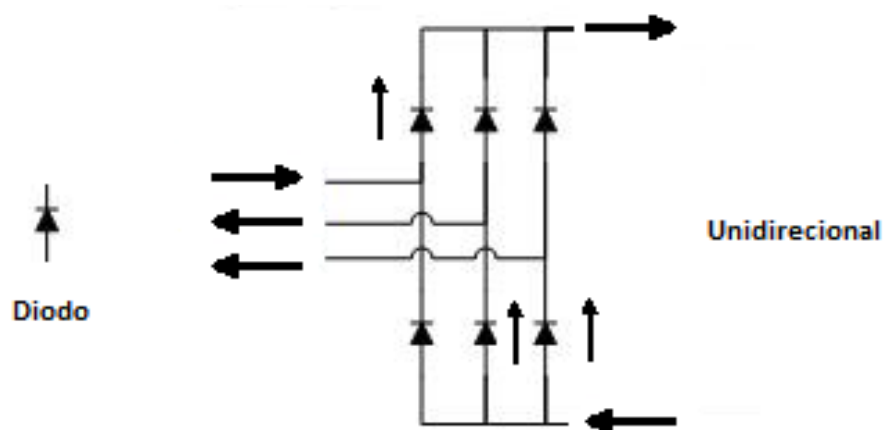
A principal aplicação para esse dispositivo é para frenagem regenerativa em veículos elétricos ou híbridos com depósito de energia. Isto é, quando os veículos fazem uma parada mais rápida, geram uma quantidade significativa de energia que é armazenada nos supercapacitores e logo após pode ser reutilizada quando estes começam a se mover novamente.

4.4.3 Frenagem regenerativa com devolução para a rede CA

Outra forma de regenerar a energia durante a frenagem de um motor de indução é devolvendo a energia para a rede que alimenta o motor. Para que isso seja possível, é necessário que sejam utilizadas topologias e dispositivos que permitam esses diferentes fluxos de potência.

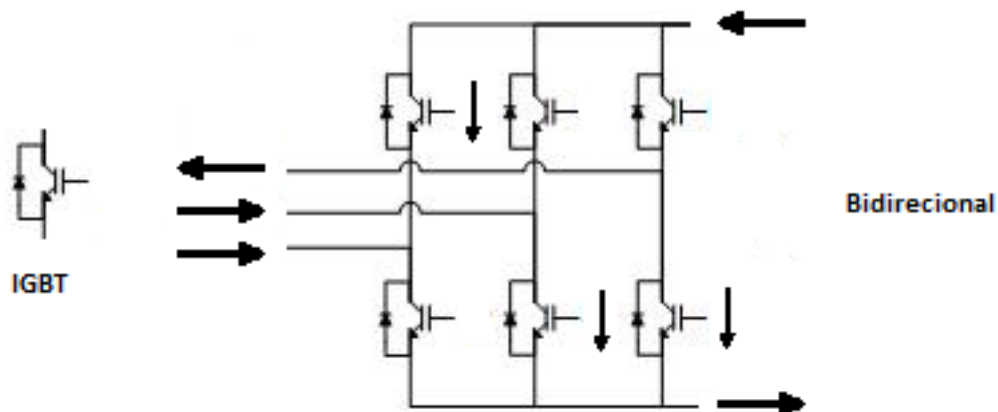
O principal componente desse sistema é o Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT), que é um semicondutor de potência de alta eficiência, chaveamento rápido e que permite o fluxo de corrente para ambas as direções. Esse dispositivo substitui os tradicionais diodos que permitem o fluxo de corrente em apenas um sentido e somente quando são polarizados diretamente. O IGBT atua como um diodo na direção reversa, e na direção direta pode permitir fluxo desde que seja aplicado um pulso em seu terminal de *gate*, que é a sua entrada de controle. Quando esses dois componentes são utilizados em uma ponte trifásica, os circuitos vão ser classificados quanto ao fluxo de potência, como unidirecionais, como pode ser visto na Figura 17, e bidirecionais, na Figura 18.

Figura 17 – Ponte trifásica unidirecional com diodos.



Fonte: MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p.56. Adaptado.

Figura 18 – Ponte trifásica bidirecional com IGBT's.



Fonte: MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p.56. Adaptado.

A ponte IGBT, como pode ser vista na Figura 18, pode transferir a corrente de volta à linha CA, desde que o controle da ponte seja feito corretamente, sincronizando a tensão gerada com as frequências senoidais da rede trifásica e com uma defasagem angular de 120° entre as senoides de cada fase.

Durante a frenagem regenerativa, o conjugado do motor está operando na direção contrária à rotação do motor. Logo, o inversor CA tenderá a resgatar essa energia do sistema mecânico pelo motor, que, nessa situação, está funcionando como gerador. Os capacitores do barramento CC do inversor são carregados enquanto o inversor está removendo essa energia. A regeneração da energia ocorrerá com a

devolução da energia desses capacitores para a rede CA. Caso não seja utilizado algum método de transformação dessa energia, seja com uma ponte bidirecional ou outros métodos citados anteriormente, a tensão do barramento CC do inversor iria aumentar até ser acusado uma falha de sobretensão.

4.5 Conjunto motor e inversor como freio

Após análise dos três tipos de frenagem regenerativa, pode-se dizer que cada uma possui suas vantagens e desvantagens, ou seja, a utilização de cada uma deve ser pensada de acordo com a aplicação desejada. Por exemplo, as baterias e os supercapacitores, que costumam ser utilizados em conjunto, são escolhidos normalmente em processos em que não há conexão com a rede, isto é, em sistemas como frenagem de veículos elétricos que normalmente já necessitam de baterias acopladas e são acrescentados supercapacitores para aumentar a eficiência.

Este estudo é direcionado a motores elétricos de indução trifásicos e essa classe de motor necessita de conexão com a rede para seu funcionamento, exceto em casos de ligação a um gerador elétrico trifásico, que nessas circunstâncias a eficiência não é um dos parâmetros mais priorizados. Em vista disso, o sistema de frenagem regenerativa que mais se encaixa para a aplicação em MIT é a frenagem regenerativa com devolução para a rede CA.

Esse sistema é formado por um motor, um inversor e a realização da frenagem é feita a partir de comandos do inversor que é programado para isso. A escolha de um motor deve ser realizada após o conhecimento da carga que ele irá acionar, analisando parâmetros como a velocidade de operação do motor, o ambiente que ele ficará alocado, o conjugado que a carga solicitará, a potência demandada, o tempo de operação contínuo, entre outros aspectos que um projetista deve ter conhecimento. Após a escolha do motor, é possível optar pelo inversor que controlará o motor.

Assim como a escolha do motor, existem vários parâmetros a ser considerados para a escolha do inversor de frequência. Os principais são a tensão e a corrente de alimentação do motor, o tipo de carga acionado por ele e a tecnologia, ou seja, as funções que se deseja utilizar no controle do motor. A tecnologia é um dos fatores mais relevantes na escolha do inversor, pois isso irá determinar as aplicações que o

sistema poderá atuar, o rendimento, a qualidade do controle, a quantidade de harmônicas que poderão ser geradas, o tamanho do equipamento, entre outros. Além disso, determinará também o preço do inversor, pois quanto maior a tecnologia envolvida, maior o preço. Assim, a escolha do modelo de inversor deve ser minuciosa para que as necessidades do projeto sejam atendidas com o melhor custo e benefício.

Pode-se dizer que a tecnologia de frenagem de motores elétricos é relativamente nova, principalmente em aplicações para motores de indução trifásicos. Sendo assim, não existem muitas opções no mercado para inversores de frequência com essa função. É possível destacar um dos fabricantes, que possuem revendedores autorizados no Brasil, que dominam essa tecnologia. Leroy-Somer™ é uma empresa francesa que tem um modelo com a função patenteada de frenagem dinâmica com retificador naturalmente regenerativo no mercado, chamado de POWERDRIVE FX, que é um “*Ultra compact regenerative drive solution*”, com potência de 22KW a 90KW. Nas Figuras 19 e 20 é possível ver com mais detalhes a peça, suas dimensões e algumas funções extras que ela permite.

Figura 19 – Dimensões do Inversor POWERDRIVE FX.

Ratings and dimensions



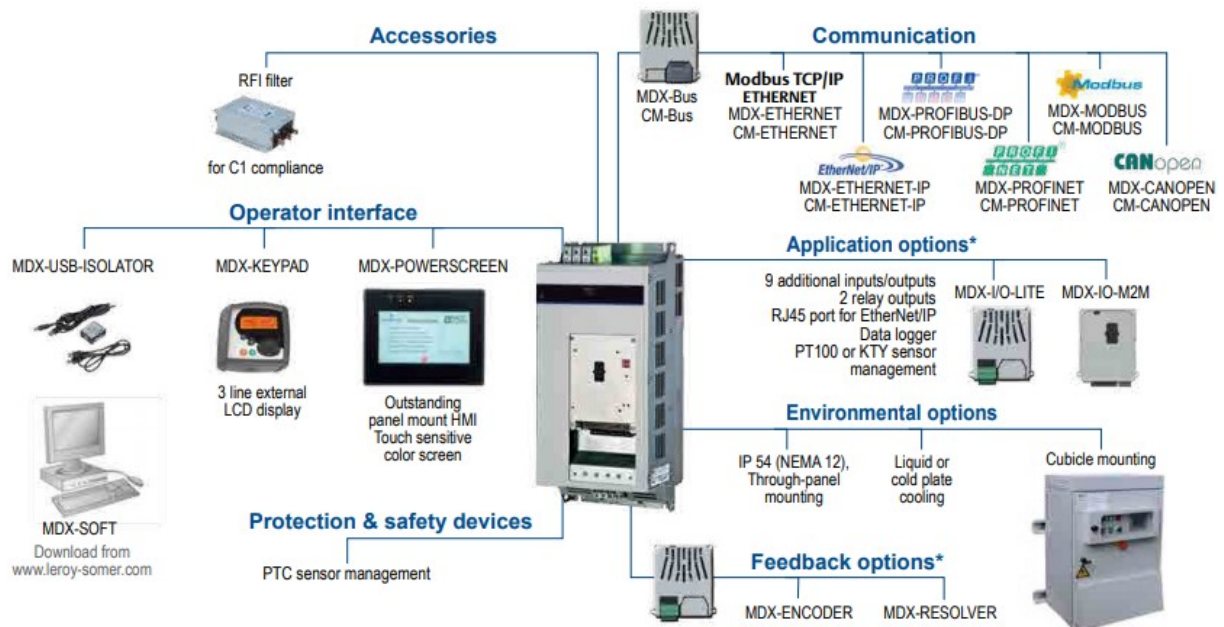
Power				Output current ¹				Model	Dimensions ²			Weight ²
				continuous		available for 60 s						
Duty				Duty								
heavy		normal		heavy	normal	heavy	normal					
kW	hp	kW	hp	A	A	A	A	H	W	D		
								mm/in	mm/in	mm/in	kg/lb	
22	30	30	40	45	59	68	64	33T				
30	40	37	50	59	73	89	79	40T	587 23.1	256 10.1	240 9.4	
37	50	45	60	73	86	105	95	50T				
45	60	55	75	92	110	135	119	60T				
55	75	75	100	110	145	165	157	75T	788 36.0	250 9.8	301 11.9	
75	100	90	125	145	175	200	189	100T				

¹ values stated for a voltage of 400 V

² without options

Fonte: Catálogo Leroy-Somer™

Figura 20 – Funções extras do Inversor POWERDRIVE FX.



Fonte: Catálogo Leroy-Somer™

5 APLICAÇÕES PARA FRENAGEM REGENERATIVA

Qualquer sistema que possua um motor e um inversor de frequência adequado, está apto a utilizar frenagem regenerativa. Contudo, como foi discutido durante o estudo, existem muitas considerações e variáveis que envolvem a utilização de um sistema de frenagem regenerativa. Dessa forma, nem sempre será viável a aplicação desse sistema, principalmente financeiramente falando.

Um inversor de frequência que possui essa funcionalidade é mais caro do que um comum e exige uma mão de obra mais especializada. Logo, a escolha dessa tecnologia está associada a um retorno financeiro esperado para esse investimento que se dará por meio da economia de energia. É importante ressaltar que esse sistema apenas tem eficiência notoriamente maior do que os comuns quando a carga acionada exige muitas frenagens e quando as frenagens têm a capacidade de gerar uma boa quantidade de energia. Algumas aplicações em que há ganhos consideráveis na eficiência são:

- Sistemas de transporte: Automóveis, motocicletas, caminhões, ônibus, trem;

- Aplicações industriais: Centrífugas, laminadores de aço, correias transportadoras para baixo, elevadores e guindastes.

Quando utilizado em sistemas de transporte, as vantagens são: aumento da autonomia dos veículos, redução dos custos de operação, menor desgaste dos freios, menor dissipação de calor e redução de impactos ambientais.

Em relação ao uso industrial, que está mais ligado aos motores de indução trifásicos, as vantagens são: redução do consumo de energia elétrica, redução de impactos ambientais e aumento da vida útil de motores. O último item está relacionado à temperatura dos motores. Quando ocorre uma frenagem não regenerativa, a energia resultante no processo é dissipada nos próprios enrolamentos do motor, aquecendo-o, e, se excedido o limite de temperatura do modelo, a máquina irá diminuir a sua vida útil, ou seja, a frenagem regenerativa faz com que a temperatura de operação dos motores diminua, com isso, caso esteja na fase de projeto é possível escolher com temperatura de operação máxima menor, que é mais barato, ou caso o motor já exista é possível colocar mais carga em seu eixo.

6 CONCLUSÃO

Conforme foi proposto nos objetivos deste estudo, foram analisados os principais sistemas de frenagem regenerativa. Com base nas particularidades de cada um, conclui-se que a melhor tecnologia de frenagem regenerativa para motores de indução trifásicos é o método de devolução para rede CA. Portanto, sugere-se que mais pesquisas sejam realizadas sobre essa tecnologia para que mais pessoas possam tomar conhecimento sobre essa possibilidade de aumento na eficiência, sendo esse um motor amplamente utilizado.

É importante lembrar que essa tecnologia pode contribuir para a diminuição no consumo de energia elétrica e consequentemente na redução dos impactos ambientais. Visto a quantidade de equipamentos com potencial para uso dessa tecnologia, caso seja mais difundida, poderia trazer bons resultados no quesito eficiência energética.

Se tratando de investimento financeiro, a frenagem regenerativa com devolução para a rede CA tem um custo relativamente elevado. É uma tecnologia que não é nova, porém a sua utilização em motores elétricos de indução trifásicos foi pouco aproveitada. Como foi dito anteriormente, inversores específicos para essa aplicação são fabricados apenas fora do Brasil e revendidos por algumas empresas aqui, dificultando o acesso das pessoas à tecnologia.

Porém, a eficiência energética é um assunto que está sempre em pauta, e essa é uma tecnologia com bastante potencial para ganhar o mercado. Se existe um sistema em que seja necessária a utilização de banco de resistores para absorver a energia durante as frenagens, provavelmente é um sistema que poderia estar regenerando tal energia para a rede e diminuindo os custos operacionais. Sendo assim, o que mais falta é conhecimento dos projetistas sobre as vantagens dessa tecnologia para que ela se destaque entre as outras.

7 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve o foco em apresentar a tecnologia, os princípios de funcionamento, as vantagens e aplicações. Logo, seria interessante o estudo de um sistema prático, fazendo os devidos experimentos para que possa ser comprovado os ganhos práticos de uma frenagem regenerativa, ou seja, um estudo de eficiência para as diferentes topologias citadas aqui.

Além disso, um estudo direcionado para o inversor de frequência poderia ser bem aproveitado. O sistema de controle é fundamental na frenagem regenerativa e um estudo sobre isso seria promissor para mostrar quais são os melhores dispositivos para compor a topologia, os melhores princípios de funcionamento e outras ferramentas para ter o maior ganho de eficiência.

Outro equipamento que poderia receber um estudo sobre frenagem regenerativa é o próprio motor, mostrando quais os seus efeitos, o que pode aumentar ou diminuir a vida útil da máquina, se haverá mudanças na temperatura de operação desta, o que mudará na escolha de um motor quando for utilizar esse sistema, entre outros aspectos.

REFERÊNCIAS

- BIM, EDSON. **Máquinas elétricas e acionamento**. Vol. 3. Elsevier, 2012.
Disponível em:
http://www.adjutojunior.com.br/maquinas_eletricas/Maquinas_eletricas_acionamento_s.pdf. Acesso em 20 out 2019.
- FITZGERALD, A. E. *et al.* **Máquinas Elétricas**. São Paulo: Bookman, 2006.
- JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em:
http://www.escolaelectra.com.br/alumni/biblioteca/Fundamentos_de_analise_de_circuitos.pdf. Acesso em: 20 out 2019.
- LEROY-SOMER™. Ultra compact regenerative drive solution. POWERDRIVE FX. Disponível em: https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/4881_en.pdf. Acesso em 28 out 2019.
- MASCHERONI, M. J. M.; LICHTBLAU, M. M.; GERARDI, D. **Guia de aplicação: Inversores de Frequência**. 3. ed. Florianópolis: Weg Automação, 2014.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro, Brasil. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em: 11 set 2019.
- OHMIC, RESISTORES E REOSTATOS. **Resistores de Frenagem**. Disponível em: <http://www.ohmic.com.br/site/produtos-frenagem-dinamica-saiba-mais>. Acesso em 20 out 2019.
- WEG, GRUPO. **Guia de Especificação - Motores elétricos**. Jaraguá do Sul, Santa Catarina. 2019. Disponível em:
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>> Acesso em 19 set 2019.
- WEG, GRUPO. **Inversor de Frequência CFW10**. Manual do Usuário. 2019. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%AÂncia/Micro-e-Mini-Drives/Inversor-de-Frequ%C3%AÂncia-CFW10/Inversor-de-Frequ%C3%AÂncia-CFW10/p/MKT_WDC_BRAZIL_FREQUENCY_INVERTER_EASY_DRIVE_CFW10. Acesso em 30 set 2019.