



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Departamento de Engenharia Elétrica

RAFAEL MATEUS CARVALHO DE PAIVA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DO ACOPLAMENTO
MAGNÉTICO EM SUBSTITUIÇÃO AO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.**

Campina Grande, Paraíba.
Dezembro de 2019

RAFAEL MATEUS CARVALHO DE PAIVA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DO ACOPLAMENTO MAGNÉTICO EM
SUBSTITUIÇÃO AO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Jalberth Fernandes de Araújo, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2019

RAFAEL MATEUS CARVALHO DE PAIVA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DO ACOPLAMENTO MAGNÉTICO EM
SUBSTITUIÇÃO AO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Jalberth Fernandes de Araújo, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Giuseppe e Ediana, que são as pessoas mais importantes na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Giussepe e Ediana, e às minhas irmãs Rafaella e Rossana, por todo amor, apoio e dedicação dados a mim, os quais foram essenciais para alcançar meus objetivos.

Agradeço aos amigos Eric Guimarães e Julio Lima, presentes desde o início do curso, pelo enorme apoio e pelos inúmeros ensinamentos que recebi durante os anos de graduação e todo o período vivenciado no SENAI, sendo eles responsáveis por mudarem minha formação técnica.

Agradeço aos amigos que fiz no decorrer do curso, Kaio Freitas, Jandilson Almeida, Diego Costa e Tamires Santos pela companhia nos momentos de diversão e estudo, e que pretendo manter contato por toda minha vida.

Também gostaria de agradecer aos amigos Arthur Alves, José Igor, Carlos Dantas e Nonato Verde que me auxiliaram na construção deste trabalho durante meu estágio na ALUMAR.

Por fim, agradeço ao professor Jalberth Fernandes por ter me orientado neste trabalho de conclusão de curso, pela oportunidade que me concedeu em participar de um projeto de extensão e pela sua dedicação em melhorar a qualidade do ensino.

*“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso,
ao esforço, à dedicação, não existe meio termo.
Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”*

Ayrton Senna.

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas as análises de dois estudos de caso que abordam a tecnologia do acoplamento magnético, com o objetivo de verificar a viabilidade do seu uso em substituição ao inversor de frequência para o acionamento de motores de indução. O acoplamento magnético trata-se de um tipo de equipamento que utiliza as propriedades dos ímãs permanentes com a finalidade de transmitir torque entre dois rotores, sem que exista contato físico entre as partes. Os principais ganhos com seu uso frente aos inversores são a não propagação de vibrações entre unidade motriz e carga, alta tolerância a desalinhamentos e não geração de harmônicas na rede. Além disso, eles podem substituir os inversores em muitas aplicações que não demandam controle rigoroso de torque e velocidade, além de trazer inúmeros benefícios para as indústrias devido seu baixo custo de manutenção. Mesmo alguns anos após seu surgimento, essa tecnologia ainda é pouco conhecida nacionalmente e poucos estudos e pesquisas nacionais contemplam o tema. No primeiro estudo de caso analisado, pode-se comprovar a viabilidade do uso dos acoplamentos em aplicações com velocidades próximas da nominal do motor. Em testes realizados em laboratório, foi constatado um consumo de energia próximo ao dos inversores, com um rendimento aproximado de 90%, gerando uma quantidade menor de reativos. No segundo estudo, é demonstrado como em um sistema de refrigeração de um edifício onde não existia controle de acionamento das máquinas, que instalação de acoplamentos magnéticos em duas bombas resultou em uma redução de 45 kW, cerca de 44%, na potência consumida pelos equipamentos, gerando uma economia de 36.000 kWh por ano, o que comprova que esse dispositivo pode ser empregado em projetos de eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Motor de Indução, Inversor de Frequência, Acoplamento Magnético.

ABSTRACT

In this work is presented the analysis of two case studies that approach the magnetic coupling technology, aiming to verify the feasibility of its use in substitution to the variable frequency drive (VFD) to use with the induction motor. Magnetic coupling is a type of equipment that uses the properties of permanent magnets to transmit torque between two rotors, without physical contact between the parts. The main gains from its use against VFD's are the non-propagation of vibrations between drive and load, high tolerance to misalignment and no harmonic generation. In addition, they can replace VFD's in many applications that do not require a high precision control on torque and speed, and also bring numerous benefits to industries due to their low maintenance cost. Even a few years after its introduction, this technology is still little known nationally and few studies and national research address the theme. In the first case study analyzed, it is possible to prove the feasibility of using couplings in applications with speeds close to the nominal value of the machine. In tests performed in laboratory, it was found a power consumption close to the VFD's, with a yield of approximately 90%, generating a lower amount of reactive power. In the second study, it is shown that in a building cooling system where there was no control of the machines, the installation of magnetic couplings in two pumps resulted in a reduction of 45 kW, about 44%, in the power consumed by the equipment's, saving 36.000 kWh per year, which proves that this device can be used in energy efficiency projects.

Keywords: Energy Efficiency, Induction Motor, Variable Frequency Drive, Magnetic Coupling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Motor para acionamento de correia transportadora.	20
Figura 2: Sistema fotovoltaico conectado à rede.	21
Figura 3: UPS	21
Figura 4: Inversor PowerFlex 753 Rockwell.....	22
Figura 5: Inversor Sinamics Siemens.	22
Figura 6: Inversor CFW700 WEG.	23
Figura 7: Diagrama de um inversor para motor de indução.	23
Figura 8: Diagrama esquemático de um retificador de seis pulsos.	24
Figura 9: Sinais de entrada e saída de um retificador de seis pulsos.	24
Figura 10: Diagrama de um inversor de seis degraus.....	25
Figura 11: Exemplo de sequência de chaveamento para o inversor de seis degraus.....	26
Figura 12: Sinal de saída da tensão de linha.....	26
Figura 13: Sinal de saída da tensão de fase.	26
Figura 14: Sinais de tensão e corrente de fase em uma carga RL	27
Figura 15: Sinais das ondas moduladoras e referência.....	28
Figura 16: Forma de onda das tensões de fase geradas	30
Figura 17: Espectro do sinal de saída de um inversor trifásico com modulação PWM.....	31
Figura 18: Inversores PowerFlex séries 750.....	31
Figura 19: a) Saída do inversor sem reator, b) saída do inversor com reator.....	32
Figura 20: a) motor de translação com filtro, b) filtro.....	32
Figura 21: Corrente nas frequências PWM de 2 kHz e 4 kHz.	33
Figura 22: Curva V/Hz para controle de uma máquina de indução.	35
Figura 23: Curvas conjugado versus velocidade de um motor de indução.	36
Figura 24: Diagrama vetorial das correntes de estator de uma máquina de indução.	37
Figura 25: Transformada de Clarke.....	38
Figura 26: Transformada de Park.....	38
Figura 27: Logo MagnaDrive.....	40
Figura 28: Modelo de um acoplamento magnético.	41
Figura 29: Acionamento de bomba hidráulica com acoplamento magnético.	41
Figura 30: Acionamento de compressores com acoplamento magnético.	42

Figura 31: Acionamento de correia transportado com acoplamento magnético.	42
Figura 32: Uma estrutura de acoplamento magnético.	43
Figura 33: Conjunto motor, acoplamento e carga mecânica.	43
Figura 34: Topologia acoplamento magnético radial.	44
Figura 35: Topologia acoplamento magnético axial.	45
Figura 36: Acoplamento magnético axial.	45
Figura 37: Acoplamento com rotor com ímãs permanentes e rotor com disco de cobre.	46
Figura 38: Modelo 2D do acoplamento magnético	47
Figura 39: Modelo 2D do acoplamento magnético com	48
Figura 40: Acoplamento submetido a desalinhamento radial.	49
Figura 41: Acoplamento submetido a desalinhamento angular.	49
Figura 42: Bancada de teste de sobrecarga para acoplamento magnético.	50
Figura 43: Acoplamento submetido a torque inferior ao seu valor máximo.	50
Figura 44: Acoplamento submetido a condição de sobrecarga.	51
Figura 45: MagnaDrive ASD	51
Figura 46: Diagrama de blocos metodologia.	57
Figura 47: Inversor Allen Bradley 1336S.	58
Figura 48: Acoplamento MagnaDrive ASD.	58
Figura 49: Acoplamento PAYBACK.	59
Figura 50: Cenários dos testes realizados.	60
Figura 51: Washigton Mutual Tower.	61
Figura 52: Consumo de potência ativa dos equipamentos.	65
Figura 53: Rendimentos dos equipamentos obtidos nos testes.	66
Figura 54: Consumo de potência reativa dos equipamentos.	67
Figura 55: Consumo de potência ativa das bombas.	68
Figura 56: Consumo de energia.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do acoplamentos com rotores com ímãs permanentes.....	46
Tabela 2: Parâmetros do acoplamento com rotor com ímãs permanentes e rotor com disco de cobre.	47
Tabela 3: Equação do torque de saída do acoplamento magnético.	48
Tabela 4: Comparação entre acoplamento magnético e	55
Tabela 5: Equipamentos utilizados nos testes.	58
Tabela 6: Dados de placa do motor utilizado nos testes.....	59
Tabela 7: Informações dos motores.....	61
Tabela 8: Dados operacionais das bombas.....	62
Tabela 9: Resultados do teste com inversor.	63
Tabela 10: Resultado do teste com acoplamento Payback com polia.	64
Tabela 11: Resultados do teste com acoplamento Magnadrive.....	64
Tabela 12: Resultados do teste acoplamento Magnadrive com polia.....	65
Tabela 13: Consumo de potência ativa das bombas.....	69
Tabela 14: Consumo de energia das bombas.....	69
Tabela 15: Ganhos obtidos com os acoplamentos nos estudos de caso.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ASD	<i>Adjustable Speed Drive</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CC	Corrente Contínua
FOC	<i>Field Oriented Control</i>
HVAC	<i>Heating - Ventilation, Air Conditioning</i>
PNNL	<i>Pacific Northwest National Laboratory</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SCR	Retificador Controlado de Silício
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_0	Valor Médio da Tensão de Saída
$V_{m,L-L}$	Amplitude do Sinal de Entrada
α	Ângulo de Disparo.
V_{cc}	Tensão do Barramento CC
V_{frede}	Amplitude da Tensão de Fase da Rede
T	Taxa de Trabalho
ω	Frequência Angular da Rede
V_{A0}, V_{B0} e V_{C0}	Tensões de Fase
V_{AB}, V_{BC} e V_{CA}	Tensão de Linha
i_A	Corrente na Fase A
V_{ref}	Sinal da Referência
V_{port}	Sinal da Portadora
mf	Taxa de Modulação da Frequência
$f_{portadora}$	Frequência da Portadora
$f_{referência}$	Frequência da Referência
m_a	Taxa de Modulação da Amplitude
$V_{m,referência}$	Amplitude da Referência
$V_{m,portadora}$	Amplitude da Portadora
V_1	Amplitude Componente Fundamental do Sinal de Saída
$v_{A,ref}, v_{C,ref}, v_{B,ref}$	Tensões de Referência
ϕ	Fluxo no Núcleo do Motor de Indução
V_M	Tensão Aplicada ao Núcleo
N_P	Número de Espiras de uma Bobina do Estator
I_d	Componente do Fluxo
I_q	Componente do Conjugado
i_α e i_β	Componentes α e β da Transformada de Clark
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro

R_1	Raio Interno dos Ímãs
R_2	Raio Externo dos Ímãs
R_e	Raio Médio dos Ímãs
h	Espessura dos Ímãs
e	Espessura do AirGap
α	Comprimento do Arco dos Ímãs
p	Número de Pares de Pólos
B_r	Remanência dos Ímãs Permanentes
R_m	Raio Médio dos Ímãs
R_0	Raio Interno do Cobre
R_3	Raio Externo do Cobre
L	Comprimento Radial dos Ímãs
H	Comprimento Radial do Cobre
a	Espessura do Disco de Ferro dos Ímãs
b	Espessura dos Ímãs
c	Espessura do <i>AirGap</i>
d	Espessura do Cobre
e	Espessura do Disco de Ferro do Cobre
σ	Condutividade da Placa de Cobre
τ	Passo dos Ímãs
$V_{LL,RMS}$	Valor RMS da Tensão de Linha da Saída

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivos	19
1.3	Organização do Texto	19
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Inversor de frequência	20
2.1.1	Princípio de Funcionamento do Inversor de Frequência.....	23
2.1.2	Saída Modulada Por Largura de Pulso PWM	27
2.1.3	Tipos de Controle dos Inversores.....	34
2.1.3.1	Controle Escalar V/Hz.....	34
2.1.3.2	Controle Vetorial	36
2.1.4	Características do Uso de Inversor de Frequência	39
2.2	Acoplamento Magnético	40
2.2.1	Princípio de Funcionamento.....	42
2.2.2	Topologias de Acoplamento Magnético	44
2.2.3	Acoplamento Magnético Axial	45
2.2.4	Características do Uso do Acoplamento Magnético	52
3	Revisão Bibliográfica	53
4	Comparação entre Inversor de Frequência e Acoplamento Magnético.....	55
5	Metodologia	57
5.1	Literatura 1: Technology Demonstration of Magnetically-Coupled Adjustable Speed Drive Systems, Pacific Northwest National Laboratory, 2002.	57
5.2	Literatura 2: Washington Mutual Tower, MagnaDrive, 2002.	60

6	Resultados dos Estudos de Caso	63
6.1	Resultados Literatura 1	63
6.2	Resultados Literatura 2	68
6.3	Ganhos Obtidos Com os Acoplamentos	70
7	Conclusão.....	71
	Referências Bibliográficas.....	72

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução tratam-se de máquinas elétricas amplamente utilizadas nas indústrias de diversos segmentos, e são empregados em uma grande diversidade de aplicações. O uso desse tipo de máquina quando comparadas as de corrente contínua, possui grandes benefícios, pois tratam-se de equipamentos com um tamanho reduzido, preço de aquisição mais baixo e menor custo de manutenção (MARQUES, 2014).

Por se tratarem de máquinas que não possuem nenhum tipo de controle eletrônico, em muitos casos, é necessário um sistema capaz de atuar no controle do acionamento e velocidade de rotação da máquina tornando possível a sua utilização em aplicações que exigem um controle maior do processo (UMANS,2014). Dentre a grande variedade de aplicações, pode-se destacar o uso de inversores no controle de bombas, sistemas de ventilação, correias transportadoras, translação de máquinas e pontes rolantes, que são aplicações comumente presentes nas indústrias.

O avanço nos estudos da eletrônica de potência, possibilitado pelo uso dos semicondutores na década de 60, foi fundamental para o desenvolvimento de equipamentos com a finalidade de realizar o controle de máquinas elétricas, dentre os quais destaca-se o inversor de frequência (HART, 2011). Este equipamento é capaz de controlar e monitorar um grande número de variáveis da máquina, tais como: tensão, corrente, velocidade de rotação, torque no eixo, entre outras (MARQUES, 2014). Em relação às desvantagens do uso deste equipamento, pode-se enfatizar o seu alto custo de aquisição e o inevitável desgaste dos seus componentes eletrônicos o que ocasiona um custo de manutenção ao longo da sua vida útil.

Uma tecnologia conhecida como acoplamento magnético, apresentada em 1999 e pouco difundida, vem sendo cada vez mais aplicada em substituição aos inversores de frequência, e se tornando umas das principais formas de acionamento e controle de máquinas de indução em muitas aplicações as quais o uso de inversores está consolidado (MAGNADRIVE, 2015).

O acoplamento magnético trata-se de um tipo de acoplamento utilizando dois rotores, um que possui ímãs permanentes e outro de estrutura igual ou constituído de uma placa de cobre. Um deslocamento angular entre esses dois componentes é capaz realizar a transferência de movimento entre os rotores sem que haja contato físico entre as partes. O uso desse tipo de acoplamento possui vantagens quando comparados aos acoplamentos mecânicos, pois

possibilitam partida suave da máquina por meio do escorregamento entre os rotores, proteção contra sobrecargas, além de tornar o sistema menos propício a desalinhamentos e transferência de vibrações. Outra importante vantagem da ausência do contato físico é o emprego desse tipo de acoplamento no acionamento de cargas isoladas presentes em ambientes críticos como tanques de alta pressão e bombas seladas, os quais exigem um alto grau de segurança (MATSUMOTO, 2015). Os benefícios dessa tecnologia, atrelados ao seu baixo custo de manutenção e longa vida útil, uma vez que não utiliza componentes eletrônicos, está fazendo com que seja utilizada no lugar dos inversores em muitas aplicações industriais.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de demonstrar a viabilidade do uso do acoplamento magnético em substituição aos inversores em certas aplicações, tomando como referência os resultados obtidos por dois estudos de caso nos quais abordam essa tecnologia.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com o avanço da indústria e processos cada vez mais complexos, a busca por equipamentos para controle do motor de indução se tornou cada vez maior. Em virtude disso, durante muitos anos, a indústria adotou o uso inversores como a melhor solução para aplicações que exigem um controle preciso de torque e velocidade. Nos dias atuais, diversos fabricantes disponibilizam no mercado modelos com uma enorme capacidade de processamento e diferentes níveis de tensão e potência, capazes de atender os mais exigentes requisitos. Esses equipamentos também estão presentes em universidades, e abordados nos cursos de Engenharia Elétrica e já foram objetos de muitas pesquisas em âmbito nacional.

O acoplamento magnético é uma tecnologia que visa substituir os inversores em muitas aplicações e trazer inúmeros benefícios para as indústrias. Mesmo após alguns anos após seu surgimento, ainda é não é muito conhecida nacionalmente, e poucos estudos e pesquisas nacionais contemplam o tema pelo fato que essa tecnologia não se encontra amplamente difundida em ambientes acadêmicos.

Tendo em vista que acoplamento magnético trata-se de um equipamento que possui uma nova abordagem para o acionamento de motores, com grande perspectiva de aumento de sua participação no mercado, este trabalho tem como motivação apresentar essa tecnologia e seus benefícios.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise da viabilidade do uso da tecnologia do acoplamento magnético em substituição ao inversor de frequência no acionamento de motores de indução.

Os seguintes objetivos específicos devem ser cumpridos para alcançar o objetivo geral:

- Comparar as duas tecnologias por meio de uma tabela contendo os critérios mais determinantes a serem analisados na decisão de qual tecnologia utilizar;
- Verificar por meio da avaliação dos critérios especificados na tabela de comparação, que o acoplamento magnético oferece maiores ganhos operacionais em aplicações que não requerem controle preciso de torque e velocidade;
- Realizar uma análise nos dados obtidos em dois estudos de caso para comprovar a viabilidade e os benefícios da utilização do acoplamento magnético frente aos inversores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos, dos quais este é a introdução, e os demais são descritos a seguir.

No capítulo 2 será apresentada uma fundamentação teórica sobre as tecnologias do inversor de frequência e o acoplamento magnético.

No capítulo 3, será apresentada a revisão bibliográfica com trabalhos que abordam as tecnologias do acoplamento magnético e inversor de frequência.

No capítulo 4, uma comparação entre as duas tecnologias é realizada com base nos critérios mais relevantes que devem ser verificados na tomada de decisão de qual tecnologia utilizar.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada, tomando como base dois estudos de caso desenvolvidos sobre o tema, para validação do objetivo geral deste trabalho.

No capítulo 6 serão apresentados e analisados os resultados dos estudos de caso.

No capítulo 7 serão apresentadas as conclusões do trabalho.

Por último serão apresentadas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência consiste em um equipamento capaz de realizar a conversão de tensão contínua para alternada, com amplitude e frequência variáveis, a partir de uma única fonte contínua disponível. Esse tipo de equipamento é amplamente utilizado em diversas aplicações, com grande relevância em: acionamento de motores de indução com ajuste de rotação em bombas, sistemas fotovoltaicos conectados à rede e fontes de energia ininterrupta (UPS) (HART, 2011). As aplicações citadas podem ser vistas nas Figuras 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura 1: Motor para acionamento de correia transportadora.



Fonte: Autor.

Figura 2: Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: Pinto (2018).

Figura 3: UPS



Fonte: APC (2019).

Nos dias atuais, de acordo com WEG (2009), os inversores de frequência são os equipamentos mais utilizados para o acionamento de motores de indução de baixa tensão em aplicações industriais que necessitam controle de velocidade. Nas Figuras 4, 5 e 6 pode-se observar modelos de inversores de frequência dos fabricantes Rockwell, Siemens e WEG, respectivamente.

Figura 4: Inversor PowerFlex 753 Rockwell.



Fonte: KVC (2019).

Figura 5: Inversor Sinamics Siemens.



Fonte: Bernard & Companys (2019).

Figura 6: Inversor CFW700 WEG.

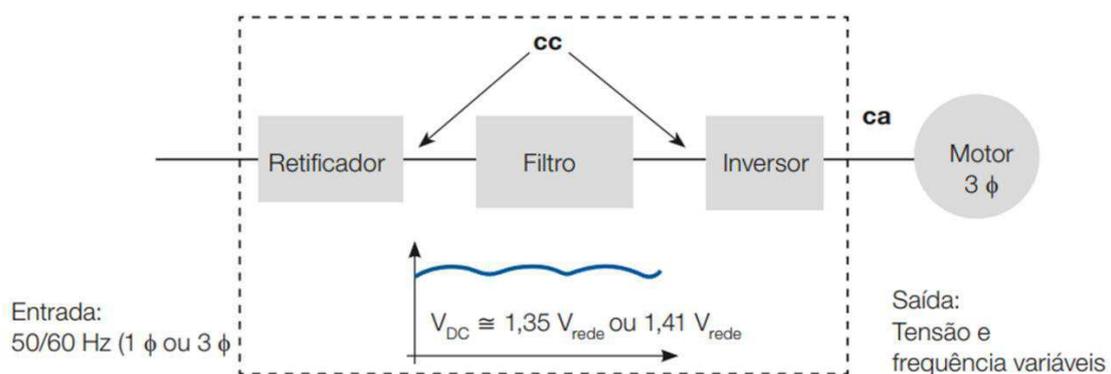


Fonte: WEG (2019).

2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Para gerar um sinal com amplitude e frequência variável, os inversores de frequência contam com uma estrutura formada, fundamentalmente, por três blocos (também chamados de estágios) funcionais: retificador, filtro e inversor. Na Figura 7 ilustra-se um diagrama de um inversor utilizado para o acionamento de um motor de indução.

Figura 7: Diagrama de um inversor para motor de indução.

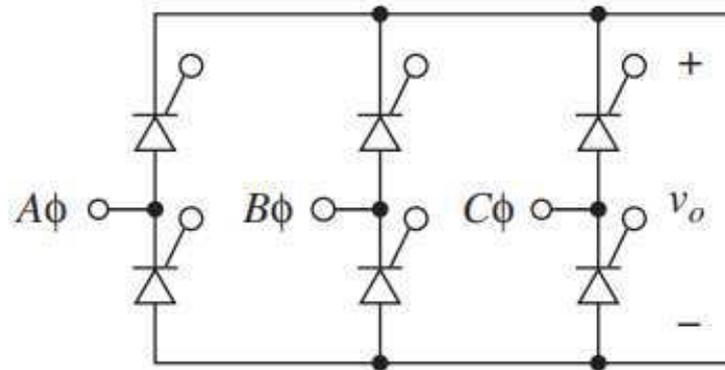


Fonte: Adaptado de WEG (2009).

O primeiro bloco é composto por semicondutores formando um circuito retificador trifásico, e é responsável por converter a tensão alternada da rede em tensão contínua. Nesta etapa, pode-se fazer uso de retificadores controlado de silício (SCR) para variar o valor médio da tensão de corrente contínua (CC) no barramento, a partir do controle do ângulo de disparo

das chaves. Na Figura 8 ilustra-se um circuito retificador trifásico controlado de seis pulsos que pode ser aplicado nesta etapa.

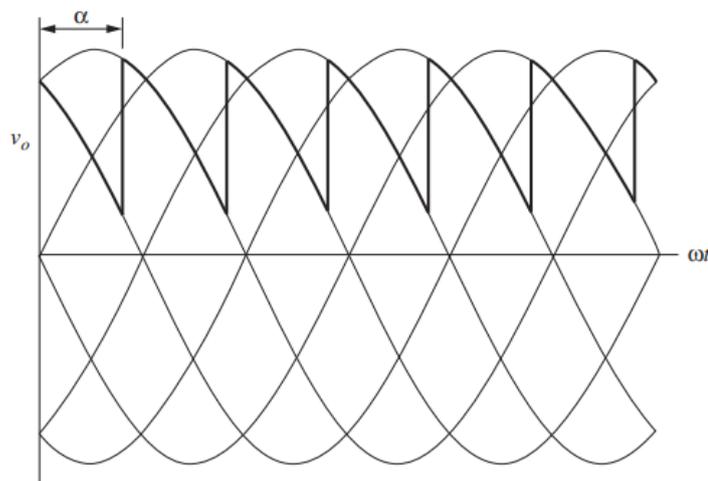
Figura 8: Diagrama esquemático de um retificador de seis pulsos.



Fonte: HART (2011).

Como exemplo, na Figura 9 exibe-se os sinais de entrada (fase a, b e c) e o sinal de saída controlado pelo ângulo de disparo do SCR que neste exemplo foi de 45 graus.

Figura 9: Sinais de entrada e saída de um retificador de seis pulsos.



Fonte: Hart (2011).

O valor médio da tensão na saída pode ser calculado pela Equação (1). É possível notar que o valor médio depende diretamente do ângulo de disparo utilizado.

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha, \quad (1)$$

em que V_0 representa o valor médio da tensão de saída; $V_{m,L-L}$ é a amplitude do sinal de entrada, α é o ângulo de disparo e ω é a frequência angular da rede.

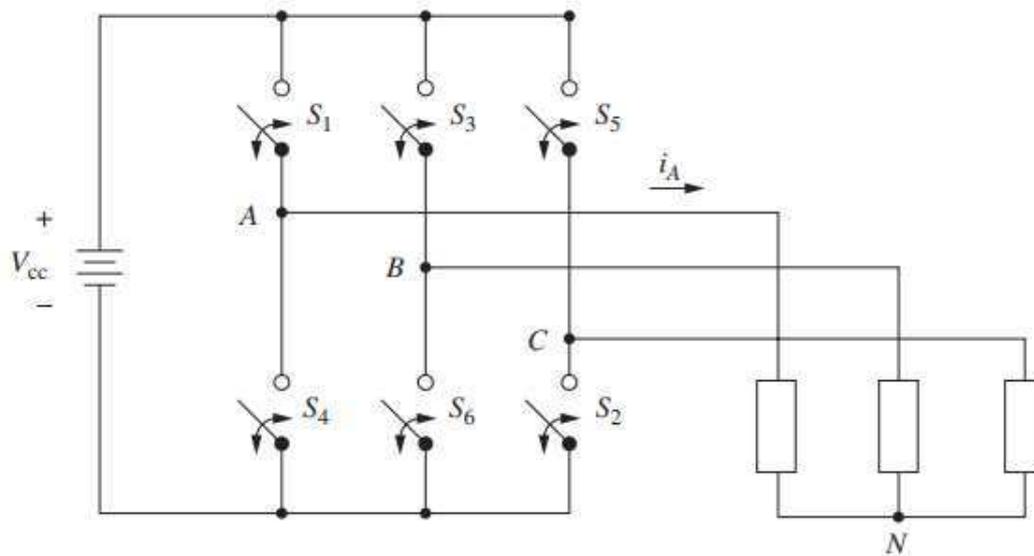
A segunda etapa de filtro, composta por indutores e/ou capacitores, é responsável por reduzir o *ripple* da tensão contínua e entregar um sinal com poucas oscilações ao terceiro bloco. Para um inversor trifásico, a tensão do barramento CC é calculada pela Equação (2).

$$V_{cc} = \sqrt{3} \times V_{frede}, \quad (2)$$

em que V_{cc} é a tensão do barramento CC e V_{frede} é amplitude da tensão de fase da rede.

Por fim, o bloco inversor, composto por chaves sólidas executa a tarefa de transformar o sinal contínuo em um alternado com amplitude e frequência variáveis. Nesta etapa podem ser empregadas várias topologias de inversores, e a escolha depende dos critérios estabelecidos em projeto. A topologia de seis degraus é uma das mais utilizadas no mercado e está presente nos inversores comerciais PowerFlex 7000 da fabricante Rockwell (ROCKWELL, 2013). Na Figura 10 ilustra-se o diagrama elétrico dessa topologia cuja principal aplicação é no controle de velocidade de motores de indução por meio do controle da frequência da tensão de saída (HART, 2011).

Figura 10: Diagrama esquemático de um inversor de seis degraus.

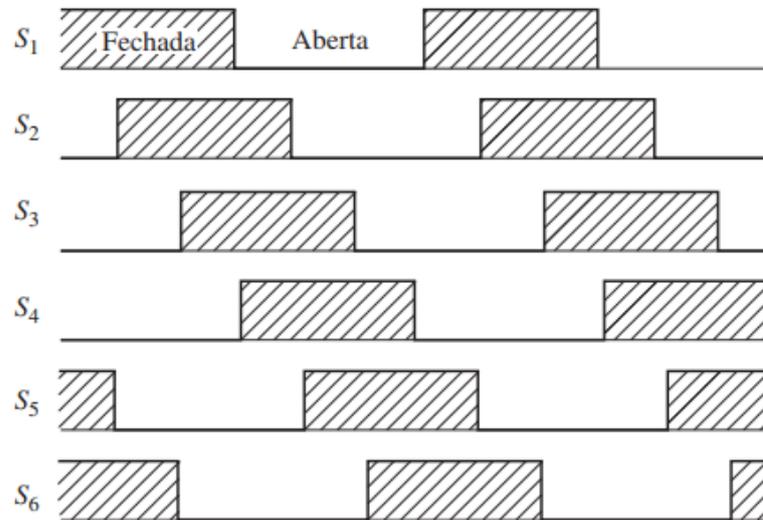


Fonte: Hart (2011).

Um dispositivo microprocessado é o responsável por controlar a abertura e fechamento das chaves do circuito da Figura 10. Essa ação é feita de tal forma que as chaves dos pares (S1,S4), (S2,S5), e (S3,S6) não sejam fechadas ao mesmo tempo, o que ocasionaria um curto circuito na fonte. Neste tipo de inversor, a taxa de trabalho (T) de cada chave é de 50% e o chaveamento acontece em intervalos de T/6 ou com ângulos de 60° (HART, 2011). Desta forma, as tensões instantâneas V_{A0} , V_{B0} e V_{C0} só podem assumir os valores de $+V_{cc}$ ou 0. As tensões de linhas V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} podem ser $+V_{cc}$, 0 ou $-V_{cc}$. Um exemplo de sequência de chaveamento

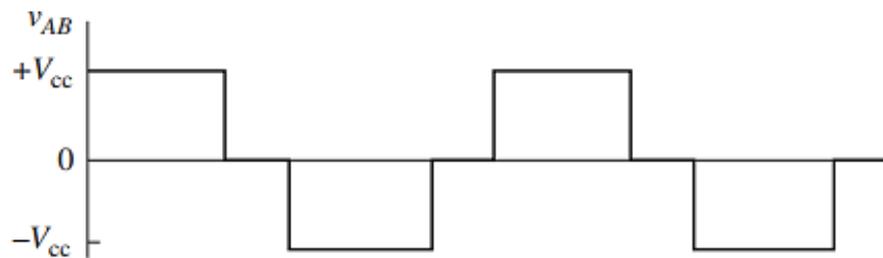
está ilustrado na Figura 11. Nas Figuras 12 e 13 ilustram-se os sinais gerados para as tensões de linha, e fase, respectivamente.

Figura 11: Exemplo de sequência de chaveamento para o inversor de seis degraus.



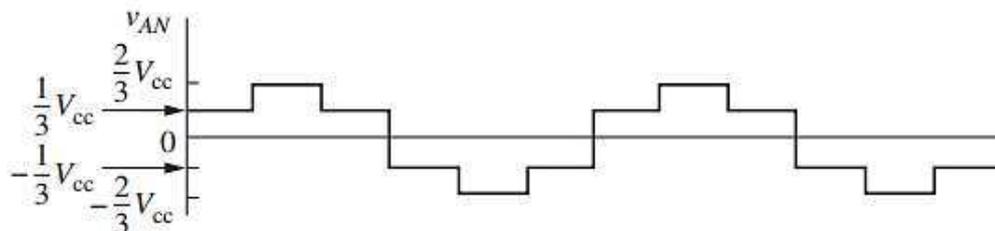
Fonte: Hart (2011).

Figura 12: Sinal de saída da tensão de linha.



Fonte: Hart (2011).

Figura 13: Sinal de saída da tensão de fase.



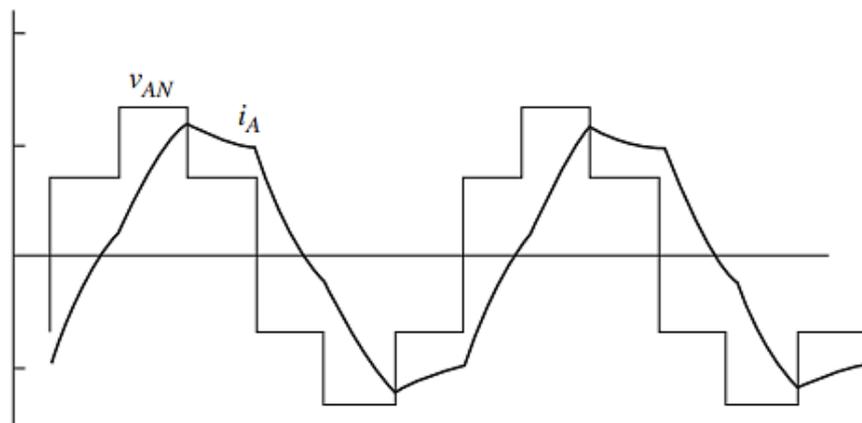
Fonte: Hart (2011).

É possível variar a frequência da tensão de saída alterando a frequência do sinal de controle da sequência de chaveamento. De forma semelhante, a magnitude da saída depende do

valor da tensão do barramento CC, sendo assim, basta ajustar a entrada para alterar a amplitude da saída (HART, 2011).

A tensão de fase da saída aplicada numa carga RL em estrela, caracterizando um motor de indução, e sua respectiva corrente de fase i_A , pode ser observada na Figura 14. Nota-se que a corrente possui deformações devido um sinal não senoidal na saída do inversor.

Figura 14: Sinais de tensão e corrente de fase em uma carga RL alimentada por um inversor de seis degraus.



Fonte: Hart (2011).

Para aplicação com motores de indução é necessário que circule na máquina um sinal de corrente mais próximo possível de uma senóide, não podendo conter uma deformação ilustrada na Figura 14. Desta forma, podem ser empregados filtros passa baixa na saída do inversor para a atenuação das harmônicas de alta frequência, o que implica em aumento no custo do projeto.

Uma boa alternativa para contornar a necessidade do uso de filtros, e que é empregada nos inversores comerciais, trata-se da modulação por largura de pulso (PWM) (WEG, 2016).

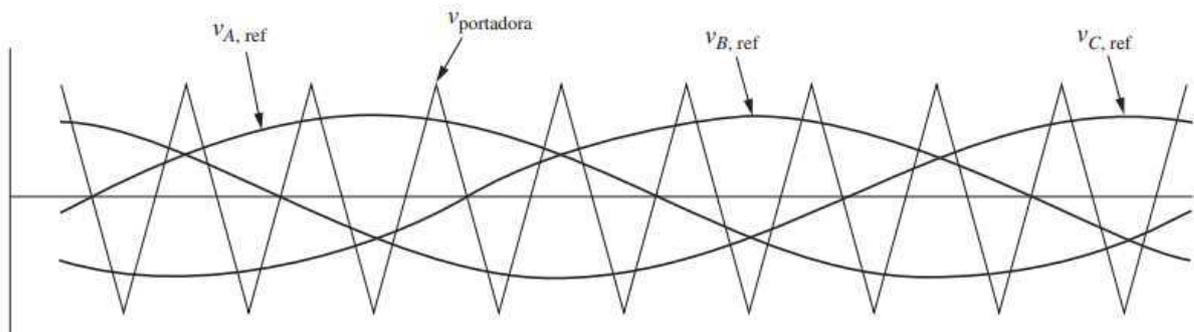
2.1.2 SAÍDA MODULADA POR LARGURA DE PULSO PWM

A PWM trata-se de uma técnica muito empregada no controle de inversores e possibilita algumas vantagens quando comparadas com um esquema de chaveamento em onda quadrada.

O uso dessa técnica proporciona um controle da amplitude da tensão de saída e uma significativa redução nos requisitos dos filtros utilizados na eliminação de harmônicas. Em contra partida, é necessário o uso de circuitos de controle mais sofisticados e ocorre um aumento nas perdas ocasionado pelo aumento da frequência de chaveamento (HART, 2011).

Nesta técnica, o sinal de controle das chaves é obtido a partir da comparação de dois sinais conhecidos como referência e portadora. A referência (V_{ref}) consiste em uma senóide enquanto que a portadora (V_{port}) em uma triangular. Para um inversor trifásico, cada uma das fases possui sua própria referência sendo que entre elas há um defasamento de 120° elétricos com objetivo de produzir uma saída trifásica equilibrada (MOHAN *et al.*, 1995). Na Figura 15 ilustra-se o sinal da portadora e as referências em cada fase.

Figura 15: Sinais das ondas moduladoras e referência.



Fonte: Hart (2011).

3.1.2.1 TAXAS DE MODULAÇÃO

Na técnica de modulação por PWM, dois índices relevantes devem ser definidos.

- Taxa de Modulação da Frequência

É definida como sendo a razão entre as frequências das ondas portadora e referência, conforme a Equação (3).

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{referência}}, \quad (3)$$

em que m_f é a taxa de modulação, $f_{portadora}$ é a frequência da portadora e $f_{referência}$ é a frequência da referência.

A frequência da portadora equivale a de chaveamento utilizada no circuito do inversor, enquanto que a frequência da referência corresponde a da componente fundamental do sinal de saída.

- Taxa de Modulação da Amplitude

É definida como sendo a razão entre as amplitudes das ondas de referência e portadora, conforme a Equação (4).

$$m_a = \frac{V_{m,referência}}{V_{m,portadora}}, \quad (4)$$

em que m_a é a taxa de modulação da amplitude, $V_{m,referência}$ é a amplitude da referência e $V_{m,portadora}$ é a amplitude da portadora.

Para taxa de modulações em que $m_a \leq 1$, pode-se afirmar que a amplitude da componente fundamental do sinal de saída é linearmente proporcional a m_a , como descrita na Equação (5).

$$V_1 = m_a V_{CC}, \quad (5)$$

em que V_1 é a amplitude componente fundamental do sinal de saída e V_{CC} é a tensão do barramento CC.

Com base na Equação (5), verifica-se que é possível controlar a amplitude da saída V_1 por meio da variação de m_a . Essa relação é de grande importância, pois o valor de m_a pode ser alterado para compensar oscilações da tensão de entrada CC, com o objetivo de manter constante a amplitude da saída. Para taxa de modulações $m_a > 1$, a amplitude da saída continua diretamente proporcional m_a , porém com um comportamento não linear.

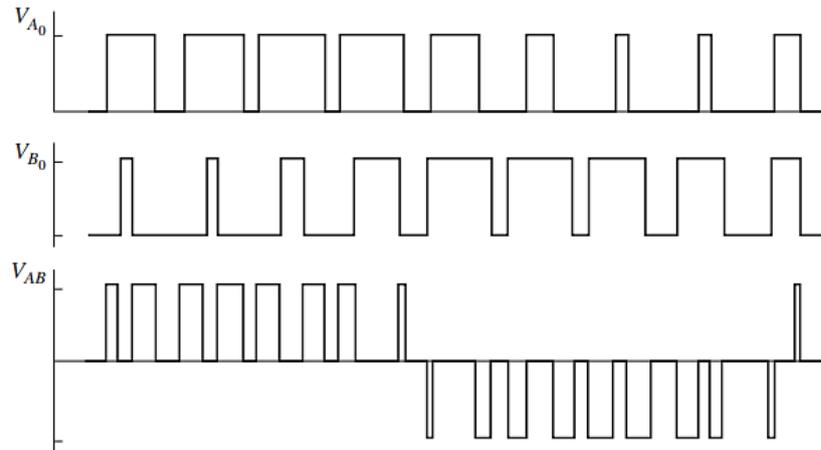
3.1.2.2 SINAL DE SAÍDA DA MODULAÇÃO PWM

O controle das chaves da Figura 10, em uma modulação PWM, é realizado segundo as seguintes condições:

- S_1 é ligada quando $v_{A,ref} > v_{portadora}$;
- S_2 é ligada quando $v_{C,ref} > v_{portadora}$;
- S_3 é ligada quando $v_{B,ref} > v_{portadora}$;
- S_4 é ligada quando $v_{A,ref} < v_{portadora}$;
- S_5 é ligada quando $v_{C,ref} < v_{portadora}$;
- S_6 é ligada quando $v_{B,ref} < v_{portadora}$.

Na Figura 16 observa-se as formas de onda das tensões de fase V_{A_0} , V_{B_0} , e de linha V_{AB} geradas, segundo as condições citadas de chaveamento.

Figura 16: Forma de onda das tensões de fase geradas com a modulação PWM em um inversor trifásico.



Fonte: Hart (2011).

Analisando a tensão de fase V_{A_0} da Figura 16, a amplitude da sua componente fundamental pode ser calculada de acordo com a Equação (6).

$$V_{A_0} = m_a \cdot V_{CC} \quad (6)$$

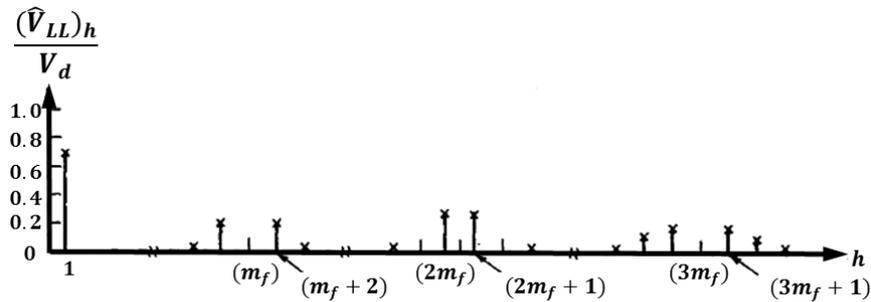
Por se tratar de um circuito balanceado, as componentes fundamentais das tensões de fase possuem amplitudes iguais e estão defasadas uma das outras de 120° elétricos. O valor quadrático médio (RMS) da tensão de linha da saída pode ser calculado a partir de uma tensão de fase, como mostra a Equação (7). (MOHAN *et al.*, 1995)

$$\begin{aligned} V_{LL,RMS} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{A_0} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{CC} \\ &= 0,612 m_a V_{CC} \quad (m_a \leq 1), \end{aligned} \quad (7)$$

em que $V_{LL,RMS}$ é o valor RMS da tensão de linha da saída.

Para o controle de motores com inversores, é importante ressaltar que a máquina será submetida a uma tensão PWM e com isso também sofrerá os efeitos das tensões harmônicas provenientes da modulação. Na Figura 17 é possível observar o espectro do sinal de saída de um inversor trifásico PWM. Percebe-se que além da componente fundamental, existem harmônicas com amplitudes significantes no sinal PWM.

Figura 17: Espectro do sinal de saída de um inversor trifásico com modulação PWM.



Fonte: Adaptado de MOHAN *et al* (1995).

A presença de harmônicas na alimentação dos motores, segundo Marques (2014), acarreta alguns efeitos indesejados que são prejudiciais ao equipamento, dentre eles pode-se citar:

- Aumento dos níveis de vibração;
- Emissão de ruídos;
- Aumento de temperatura;
- Perda de rendimento.

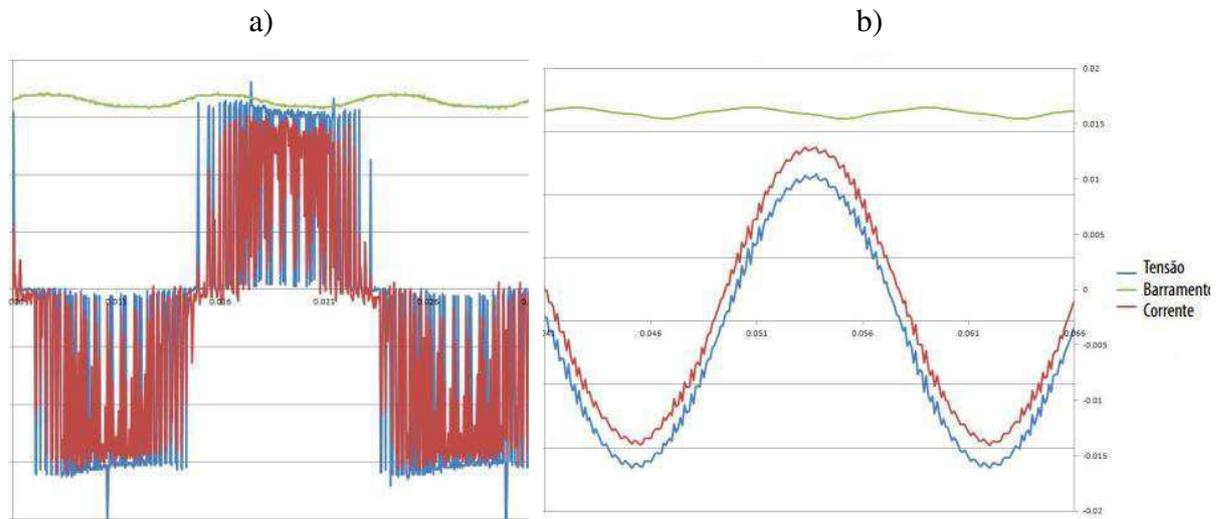
A influência das harmônicas vai depender do tipo de modulação PWM utilizada pelo inversor e para corrigir o sinal de saída podem ser instalados no circuito reatores em série com a carga, ou filtros senoidais (ROCKWELL, 2013). Para ilustrar um exemplo real, pode-se fazer uso das informações contidas no manual dos inversores PowerFlex série 755, Figura 18, da fabricante Rockwell. Na Figura 19, extraída do manual, é possível observar a tensão de saída do inversor alimentando uma carga resistiva sem uso de um reator na saída e depois com o reator adicionado.

Figura 18: Inversores PowerFlex séries 750.



Fonte: EECO (2019).

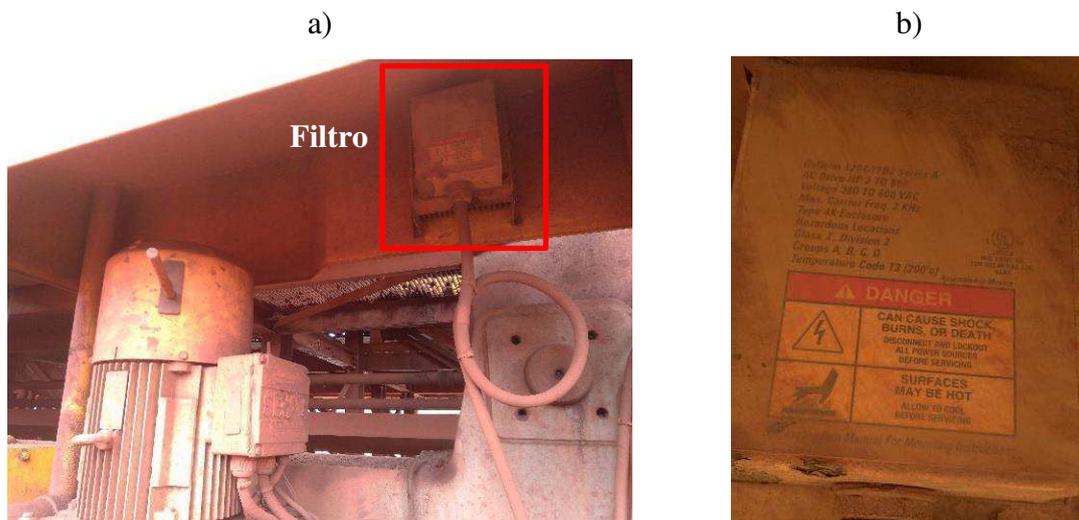
Figura 19: a) Saída do inversor sem reator, b) saída do inversor com reator.



Fonte: Rockwell (2013).

Quando os motores se encontram distantes dos inversores e são utilizados um elevado comprimento de cabo para controlá-los, é necessário o uso dos filtros. Como exemplo pode-se citar os motores de translação de descarregadores de navio, onde estão instalados na parte inferior, próximas aos trilhos, muito distantes dos inversores localizados nas salas elétricas na parte superior da máquina. Na Figura 20 ilustra-se um motor de translação e os filtros instalados.

Figura 20: a) motor de translação com filtro, b) filtro.



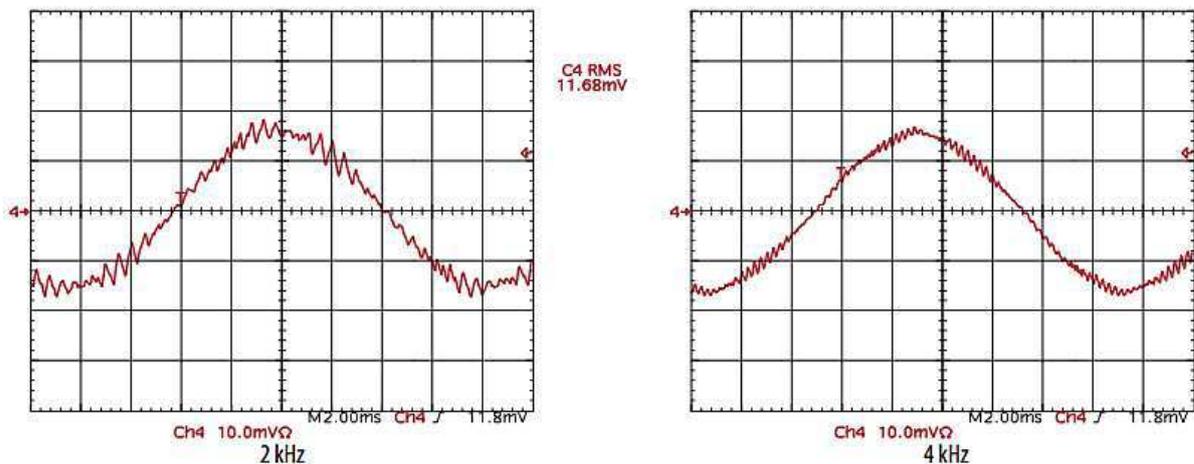
Fonte: Autor.

Aumentando a frequência da portadora da modulação, o que implica em elevar o valor de m_f , as harmônicas irão possuir uma alta frequência no espectro, como ilustrado na Figura

17. Isso traz uma grande vantagem, pois as componentes harmônicas da corrente que circulam na máquina possuem uma alta frequência e são fortemente atenuadas pela própria indutância interna do motor. Como a componente fundamental possui baixa frequência, sua atenuação pode ser desconsiderada, e quando somadas todas as componentes, o sinal resultante da corrente será aproximadamente ao da fundamental, bem próximo a uma senóide, dispensando o uso de filtros.

Quanto mais elevada for a frequência da portadora, mais suave será o sinal da corrente, diminuindo os efeitos das harmônicas sobre o motor. Em contrapartida, as chaves eletrônicas passam a aquecer mais, o que contribui para diminuição da sua vida útil. Como exemplo, nos inversores PowerFlex 750, os valores padrões de frequência adotados para a portadora são de 2 kHz e 4 kHz, porém eles podem ser ajustados dependendo da necessidade da aplicação (ROCKWELL, 2013). Na Figura 21 apresentam-se as formas de onda da corrente de saída para esse inversor com a frequência da portadora ajustada em 2 kHz e 4 kHz.

Figura 21: Corrente nas frequências PWM de 2 kHz e 4 kHz.



Fonte: Rockwell (2013).

Um outro problema associado com harmônicas é que o conjunto inversor e carga é visto pela rede de alimentação como uma carga não linear e que possui diversas componentes em sua corrente de entrada, levando a efeitos indesejados como:

- Distorções na tensão do barramento que alimenta o inversor e outros equipamentos;
- Baixo fator de potência;

- Sobreaquecimento em outros componentes da rede (cabos, transformadores, motores e banco de capacitores), aumentando as perdas elétricas nas instalações.

Como forma de reduzir a influência das harmônicas na rede e melhorar o fator de potência do conjunto, pode fazer uso de indutâncias (funcionando como filtros) tanto na entrada (rede de alimentação) do inversor como no seu barramento CC (WEG, 2009).

2.1.3 TIPOS DE CONTROLE DOS INVERSORES

Os inversores de frequência PWM mais comuns no mercado são capazes de realizar o controle de motores de indução a partir das estratégias de controle escalar e vetorial, nas quais empregam-se as seguintes técnicas:

- Controle Escalar
 - V/Hz
- Controle Vetorial
 - *Field Oriented Control* (FOC)

2.1.3.1 CONTROLE ESCALAR V/Hz

Na técnica V/Hz de controle escalar, o inversor atua diretamente no controle do fluxo no núcleo do motor, fazendo-o permanecer aproximadamente constante, enquanto varia a velocidade de rotação. Um fluxo constante é obtido quando o inversor mantém constante a relação V/f nos terminais da máquina com o objetivo de possibilitar um funcionamento sem riscos. Como o motor de indução consiste em um transformador em rotação, para compreender a necessidade de a relação V/f constante, considere o fluxo no núcleo da máquina por meio da Equação (8) (CHAPMAN, 2013).

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_P} \cos(\omega t), \quad (8)$$

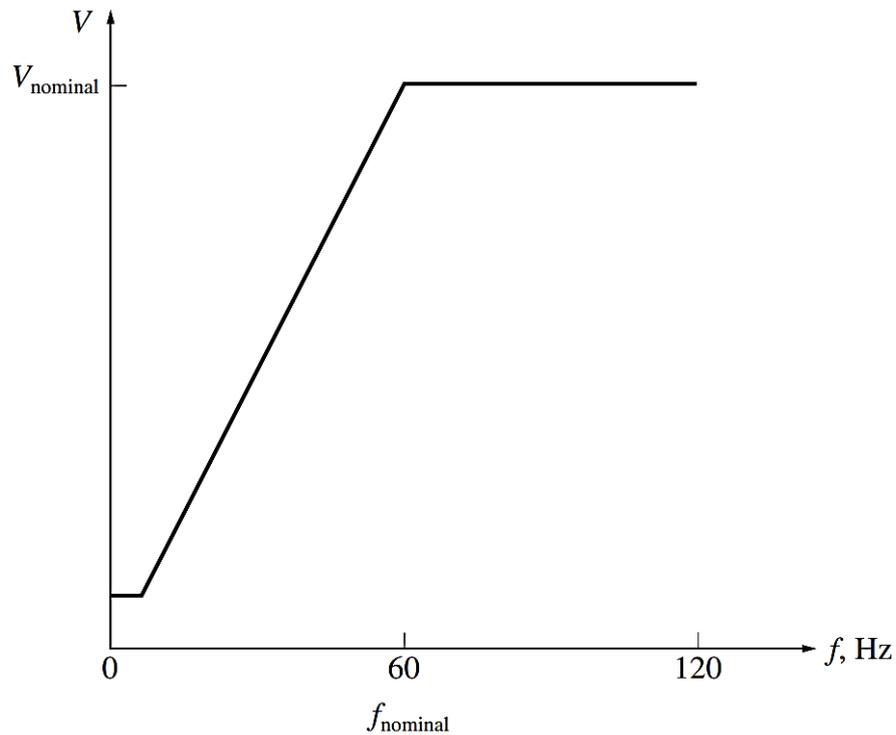
em que ϕ é o fluxo no núcleo do motor de indução, V_M é a tensão aplicada ao núcleo e N_P o número de espiras de uma bobina do estator.

É possível concluir pela Equação (8) que caso a tensão aplicada ao estator for variada, a frequência no denominador precisa mudar na mesma proporção e sentido para manter o fluxo constante. Caso isso não seja respeitado e ocorra um aumento do fluxo resultante, o núcleo do

sofrerá saturação e passarão a circular na máquina correntes excessivas de magnetização (CHAPMAN, 2013).

Um padrão do controle da relação V/Hz, que pode ser empregado numa máquina, é visto na curva de tensão *versus* frequência, da Figura 22.

Figura 22: Curva V/Hz para controle de uma máquina de indução.

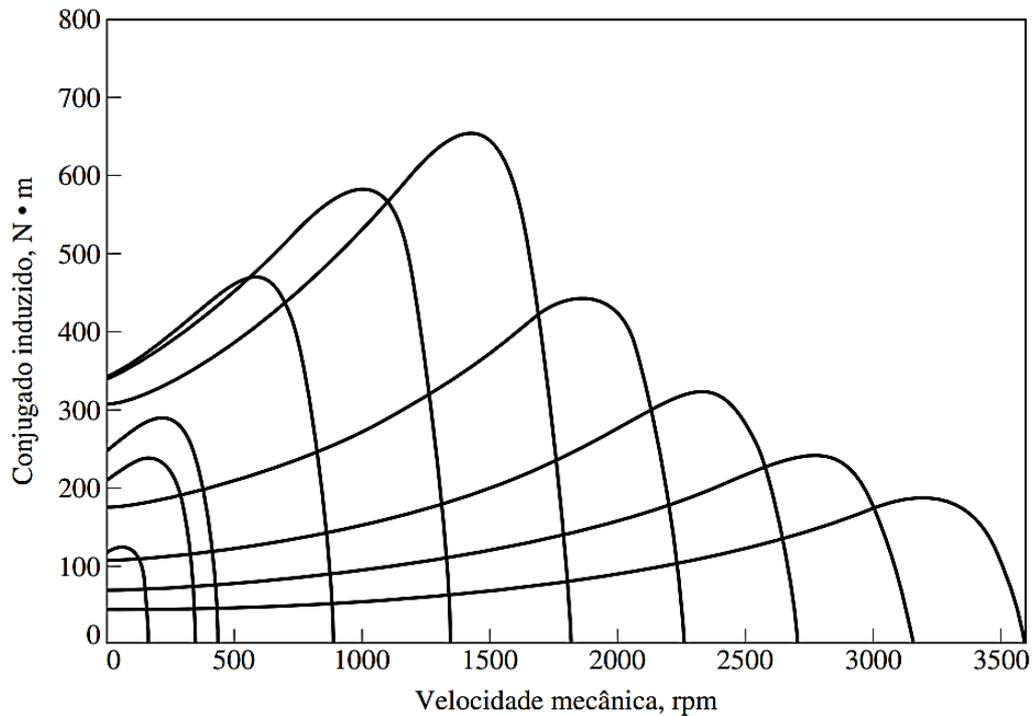


Fonte: Chapman (2013).

Pode-se notar na curva da Figura 22 que acima da frequência nominal, a tensão é mantida constante no seu valor nominal para não comprometer a isolamento dos enrolamentos da máquina. Além disso, para frequências baixas, a tensão também é mantida constante num valor mínimo para garantir um torque maior na partida mesmo que com um aumento na corrente de magnetização.

O controle escalar, por meio da relação V/Hz constante, basicamente altera a curva de conjugado *versus* velocidade do motor, fazendo-o operar em diferentes curvas, dependendo da frequência que está sendo aplicada no momento. Na Figura 23, é possível observar diversas curvas que o motor pode operar neste tipo de controle.

Figura 23: Curvas conjugado versus velocidade de um motor de indução.



Fonte: Chapman (2013).

O controle escalar V/Hz é bastante eficiente e trata-se de uma técnica simples presente nos inversores comerciais. Como características principais, pode-se citar:

- Controle em malha aberta;
- Utilizado apenas em aplicações que não requerem alta precisão no controle de torque e velocidade;
- Não possibilita um alto torque na partida;
- Precisão na faixa de 0,5% da rotação nominal sem que a carga seja variada, e de 3% a 5% em caso de variação na carga;
- A precisão da velocidade depende do escorregamento da máquina;
- Possibilidade de controlar vários motores em paralelo;
- Menor custo (LUGLI *et al.*, 2019).

2.1.3.2 CONTROLE VETORIAL

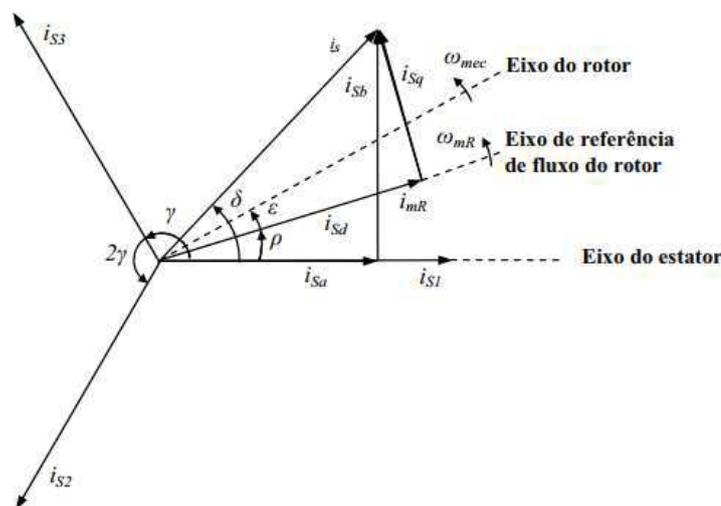
O controle vetorial consiste em uma estratégia para máquinas de indução trifásicas. Com ela pode-se obter uma elevada precisão no controle do torque e velocidade do motor, a partir

de um controle independente do torque e fluxo, garantindo alta performance de operação durante os transitórios e regime permanente (ARIPRIHARTA *et al.*, 2011).

Proposta no ano de 1972 por Blaschke, consiste em realizar uma transformação (partir do uso das transformadas de Clarke e Park) do sistema trifásico em um sistema de duas coordenadas (d e q), ilustrado na Figura 24, tornando possível transformar o modelo do motor de indução em um semelhante ao de uma máquina corrente contínua (QUEIROZ, 2008). Nessa estratégia, é realizado desacoplamento entre conjugado e fluxo, decompondo as três correntes que circulam no estator em duas componentes vetoriais ortogonais:

- I_d : Componente do fluxo.
- I_q : Componente do conjugado.

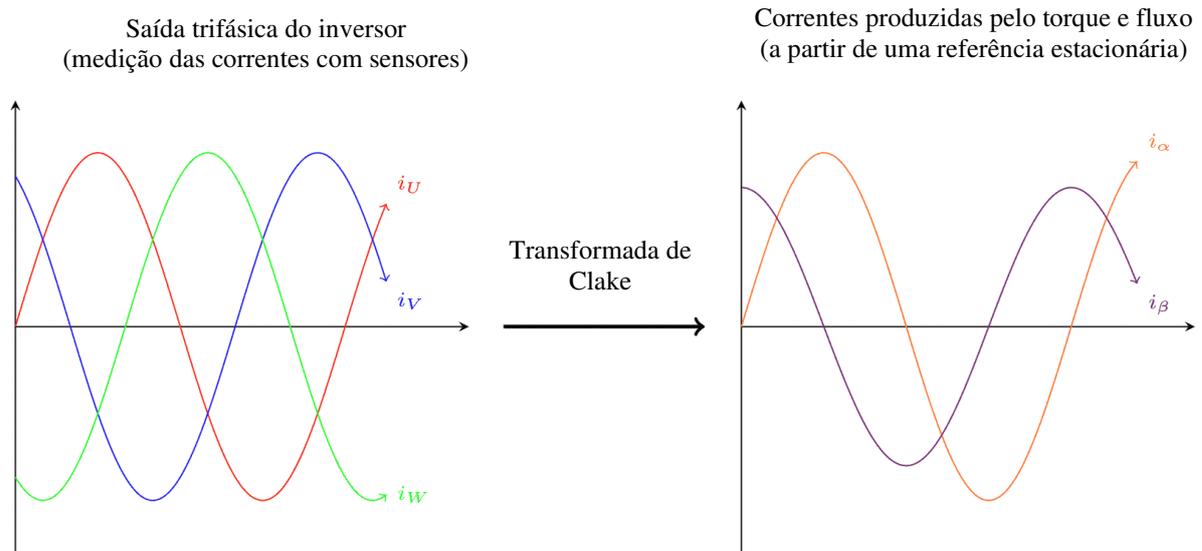
Figura 24: Diagrama vetorial das correntes de estator de uma máquina de indução.



Fonte: Queiroz (2008).

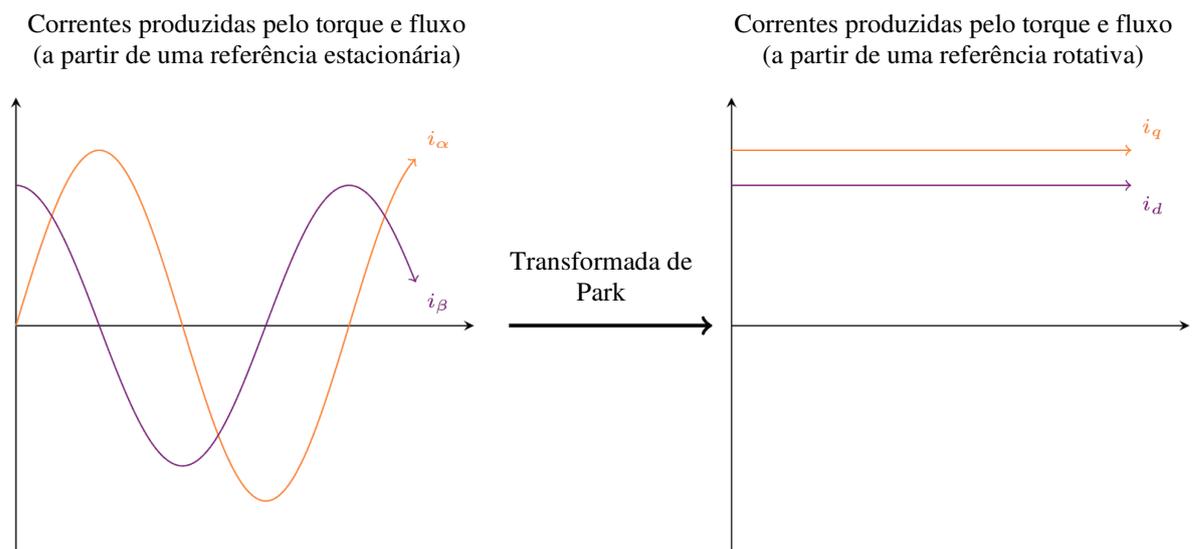
No processo de decomposição das correntes, primeiro é utilizada a transformada de Clarke, transformando as três correntes do estator em duas componentes i_α e i_β . Em seguida, a transformada de Park converte as correntes senoidais nas componentes I_d e I_q , as quais são utilizadas no controlador. As duas etapas do processo podem ser vistas nas Figuras 25 e 26, as quais ilustram as transformações de Clarke e Park, respectivamente.

Figura 25: Transformada de Clarke.



Fonte: Adaptado de Solbakken (2017).

Figura 26: Transformada de Park.



Fonte: Adaptado de Solbakken (2017).

Os valores das magnitudes de I_d e I_q são utilizados em uma malha de controle para calcular a saída que o inversor deve gerar para alcançar a condição de torque e velocidade desejada. Além disso, é necessário que o inversor conheça os parâmetros do motor que está controlando, o que pode ser obtido por meio do teste denominado *auto tune* realizado no início da configuração do equipamento (MARQUES, 2014).

No controle vetorial, o principal requisito para sua aplicação é a informação do valor exato da magnitude e posição do campo girante do estator. Tal informação poderia ser obtida por meio de sensores instalados na máquina, entretanto essa solução não é muito aplicada

devido ao custo e grau de dificuldade de instalá-los (QUEIROZ, 2008). Para contornar a situação, algoritmos são utilizados para realizar essa estimativa a partir de medições feitas nos terminais da máquina. Isso faz com que o controle vetorial gere um grande volume de processamento, sendo necessário dispositivos microprocessados de alto desempenho na sua aplicação (SENAI, 2019).

O controle vetorial FOC é bem mais eficiente que o escalar V/Hz, suas principais características são:

- Controle pode ser implementado em malha fechada;
- Permite respostas rápidas de torque quando submetido a mudanças na carga;
- Possibilita um alto torque de partida;
- Erro de 0,1% no de controle de velocidade;
- Apenas um motor pode ser controlado pelo inversor no modo de controle vetorial;
- Maior custo de implementação (LUGLI *et al.*, 2019).

O controle vetorial é bem mais completo e eficiente que o escalar para utilização em aplicações industriais que requerem um alto grau de precisão e confiabilidade. Por se tratarem de sistemas complexos e que demandam processamento em tempo real, nos dias atuais, uma grande quantidade de estudos e pesquisas científico-tecnológicas a seu respeito estão em desenvolvimento (SENAI, 2019).

2.1.4 CARACTERÍSTICAS DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência é um equipamento consolidado na indústria e sua utilização traz inúmeros benefícios. Sua eletrônica refinada em conjunto com dispositivos microcontrolados embarcados, permitem diversos recursos de monitoramento e controle da máquina. As principais características relacionadas ao seu uso são:

- Monitoramento de variáveis da máquina, tais como: corrente, tensão, velocidade, torque, fator de potência, tensão de barramento de entrada, entre outras;
- Controle das variáveis de tensão, corrente, velocidade de rotação, torque no eixo, entre outras;

- Alta precisão no controle de velocidade e torque com a estratégia de controle vetorial (permite partida suave com torque alto);
- Recursos de proteções, tais como: corrente alta devido à sobrecarga mecânica, falta de fase, baixa tensão de entrada, falha de comunicação, sobre temperatura, entre outras;
- Vida útil não muito alta e afetada pelo desgaste dos componentes eletrônicos;
- Alto custo de aquisição;
- Injeção de harmônicas na rede, sendo necessário o uso de filtros na entrada;
- Filtros na saída caso o motor se encontre posicionado a uma grande distância;
- Custo de manutenção devido ao desgaste dos capacitores e chaves eletrônicas;
- Diagnóstico de falhas mais complexo, sendo necessário uma mão de obra mais especializada. Em muitos casos, um técnico do fabricante é solicitado;
- Não podem ser submetidos a ambientes de elevada temperatura.

2.2 ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

Em 1999, a empresa americana MagnaDrive, Figura 27, introduziu ao mundo a tecnologia do acoplamento magnético, a qual trata-se de um tipo de acoplamento que utiliza as propriedades dos ímãs permanentes com a finalidade de transmitir torque entre dois rotores, sem contato físico entre as partes. Na Figura 28 ilustra-se um modelo de acoplamento magnético.

Figura 27: Logo MagnaDrive.



Fonte: MagnaDrive (2015).

Figura 28: Modelo de um acoplamento magnético.



Fonte: MagnaDrive (2015).

O uso dessa tecnologia possibilita algumas vantagens quando comparados aos acoplamentos mecânicos, sobretudo pela ausência de contato entre a unidade motriz e carga, e do ponto de vista elétrico, podem substituir o uso de inversores para acionamento de motores em aplicações que não exijam um controle preciso de torque na carga. Como exemplo de aplicações que já utilizam esta tecnologia, pode-se citar as bombas hidráulicas, compressores e acionamento de correias de transportadoras, representadas nas Figuras 29, 30 e 31, respectivamente.

Figura 29: Acionamento de bomba hidráulica com acoplamento magnético.



Fonte: Matsumoto (2015).

Figura 30: Acionamento de compressores com acoplamento magnético.



Fonte: Matsumoto (2015).

Figura 31: Acionamento de correia transportado com acoplamento magnético.



Fonte: Matsumoto (2015).

2.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para transmitir torque entre máquina elétrica e carga mecânica, o acoplamento magnético faz uso de uma estrutura na qual consiste basicamente de dois rotores: um que possui ímãs permanentes e outro de estrutura igual ou constituído de uma placa de cobre. Os magnetos são feitos de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), que consiste de um material compacto e leve, o que torna possível uma elevada transmissão de torque com ímãs de pequenas dimensões. Ademais, detém uma vida útil média de 2000 anos e ainda podem suportar temperaturas de até 176° C (MAGNADRIVE, 2015). Um exemplo de estrutura de acoplamento magnético está ilustrado na Figura 32.

Figura 32: Uma estrutura de acoplamento magnético.



Fonte: Magnetic Technologies (2019).

Um dos rotores é ligado diretamente ao eixo da máquina enquanto que o outro à carga mecânica a ser acionado, e são denominados de eixo condutor e eixo conduzido, respectivamente. Na Figura 33, é possível observar o conjunto motor, acoplamento e carga mecânica.

Figura 33: Conjunto motor, acoplamento e carga mecânica.



Fonte: Matsumoto (2015).

Quando parados, os rotores se encontram em uma posição estável, e um deles ao ser submetido a qualquer deslocamento angular, fará com que um torque seja induzido, através de uma camada de ar, no outro devido as forças de atração e repulsão dos ímãs, de tal forma a restabelecer a posição inicial do conjunto.

A isolamento mecânica entre os rotores impede a propagação de vibrações que são responsáveis por cerca de 80% das falhas em equipamentos rotativos (MAGNADRIVE, 2015). Sua estrutura física permite instalação em acionamentos de cargas isoladas presentes em ambientes críticos como tanques de alta pressão e bombas seladas (MATSUMOTO, 2015). Em sua fabricação, com o uso de materiais anticorrosivos, revestimento e galvanização, esses

equipamentos possuem uma vida útil de 20 anos, independente de manutenção (MAGNADRIVE, 2015).

2.2.2 TOPOLOGIAS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

Na Literatura é possível encontrar várias topologias existentes para acoplamentos magnéticos, as quais pode-se citar as duas mais comuns (FURLANI, 2001):

- Radial;
- Axial.

Na radial, os rotores possuem forma cilíndrica com raios de diferentes dimensões, estando um inserido no interior do outro, com uma determinada distância, conforme ilustrado na Figura 34. Neles estão presentes diversos ímãs adjacentes com sentidos de magnetização distintos, o que faz com que a força entre eles atue na direção radial ao longo de todo eixo, e a força axial seja nula. Essa configuração possui uma alta sensibilidade a desalinhamentos, já que um pequeno desvio lateral entre os rotores faz com que alguns magnetos fiquem mais próximos e outros mais afastados ao longo do eixo, gerando um desequilíbrio nas forças do sistema.

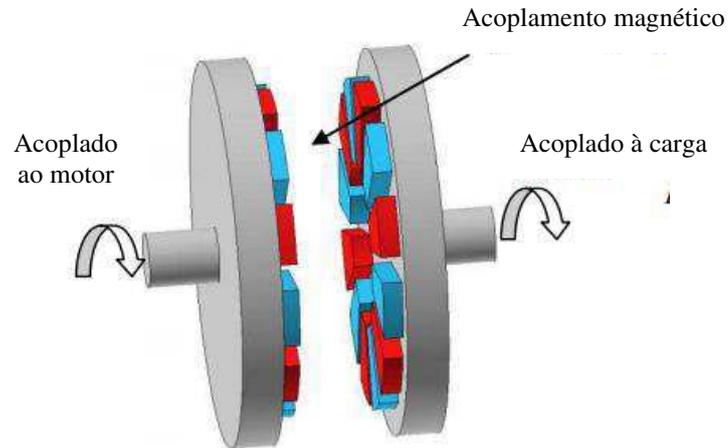
Figura 34: Topologia acoplamento magnético radial.



Fonte: Magnetic Technologies (2019).

Na axial, apresentada na Figura 35, os rotores possuem formato de discos, espaçados a uma determinada distância. Esta configuração possui elevada força axial entre as partes e alta tolerância a desalinhamentos, sendo a topologia utilizada nos acoplamentos comerciais.

Figura 35: Topologia acoplamento magnético axial.



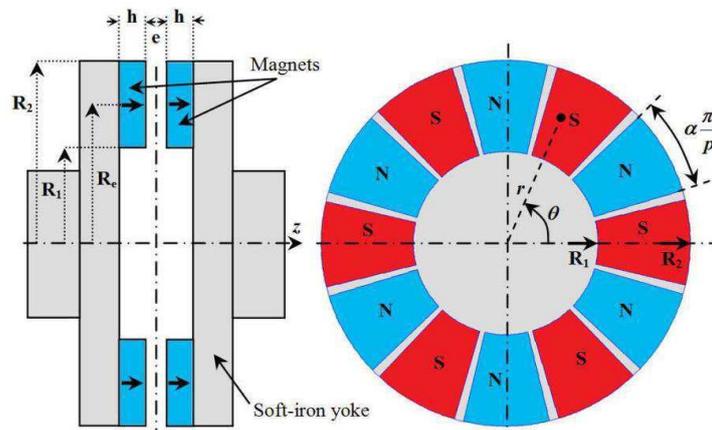
Fonte: Adaptado de Dolisy *et al.* (2014).

Neste trabalho será feito um estudo mais detalhado apenas da topologia axial, por ser mais comumente utilizada nos acoplamentos magnéticos comerciais.

2.2.3 ACOPLAMENTO MAGNÉTICO AXIAL

Um acoplamento magnético axial possui estrutura composta de dois discos equipados com ímãs permanentes espaçados por uma pequena distância, conforme modelo ilustrado na Figura 36. Os ímãs são axialmente magnetizados e alocados de maneira que se obtenha, de forma alternada, pólos norte e sul. Pequenas barras de ferros são inseridas entre os espaços vazios entre os ímãs com o objetivo de melhorar a permeabilidade magnética, facilitando a passagem do fluxo. (LUBIN *et al.*, 2014). Os parâmetros do modelo estão descritos na Tabela 1.

Figura 36: Acoplamento magnético axial.



Fonte: Lubin *et al.* (2014).

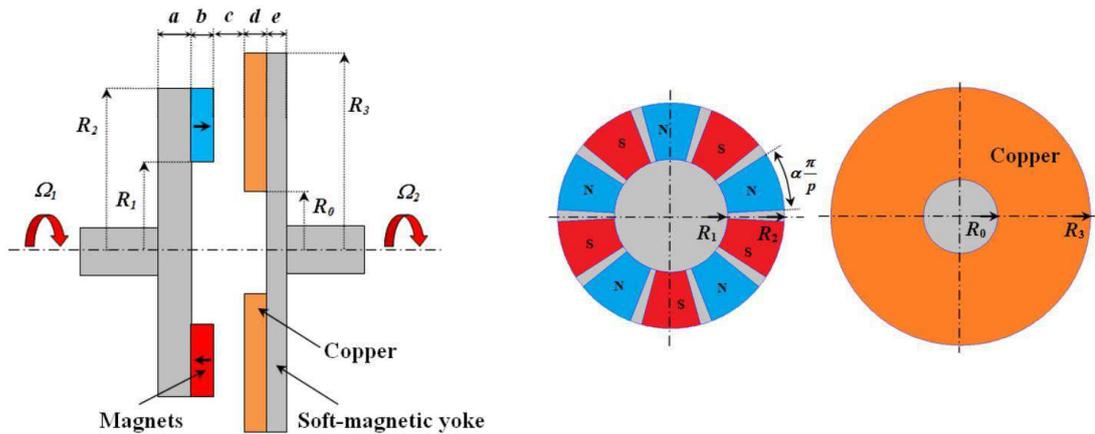
Tabela 1: Parâmetros do acoplamentos com rotores com ímãs permanentes.

Parâmetros do Modelo	
Símbolo	Significado
R_1	Raio interno dos ímãs
R_2	Raio externo dos ímãs
R_e	Raio médio dos ímãs
h	Espessura dos ímãs
e	Espessura do AirGap
α	Comprimento do arco dos ímãs
p	Número de pares de pólos
B_r	Remanência dos ímãs permanentes

Fonte: Adaptado de Lubin *et al.* (2014).

Outro tipo de acoplamento axial consiste de um rotor com ímãs permanentes e o outro sendo um disco metálico, geralmente cobre (LUBIN *et al.*, 2015). Nesta estrutura, o disco sofre efeitos da corrente induzida pelos ímãs, gerando torque para a carga. Essa é a forma como os acoplamentos da MagnaDrive são construídos (MAGNADRIVE, 2015). A Figura 37, apresenta-se um modelo de acoplamento e seus parâmetros estão descritos na Tabela 2.

Figura 37: Acoplamento com rotor com ímãs permanentes e rotor com disco de cobre.



Fonte: Lubin *et al.* (2015).

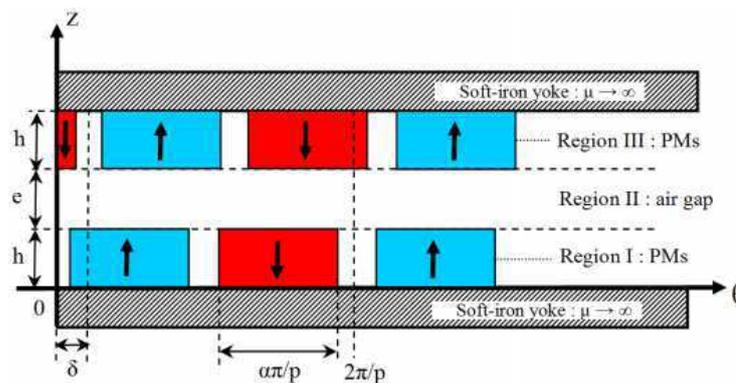
Tabela 2: Parâmetros do acoplamento com rotor com ímãs permanentes e rotor com disco de cobre.

Parâmetros do Modelo	
Símbolo	Significado
R_1	Raio interno dos ímãs.
R_2	Raio externo dos ímãs.
R_m	Raio médio dos ímãs.
R_0	Raio interno do cobre.
R_3	Raio externo do cobre.
L	Comprimento radial dos ímãs ($R_2 - R_1$).
H	Comprimento radial do cobre ($R_3 - R_0$).
a	Espessura do disco de ferro dos ímãs.
b	Espessura dos ímãs.
c	Espessura do <i>AirGap</i>
d	Espessura do cobre.
e	Espessura do disco de ferro do cobre.
α	Comprimento do arco dos ímãs
p	Número de pares de pólos
B_r	Remanência dos ímãs permanentes
σ	Condutividade da placa de cobre.
τ	Passo dos ímãs.

Fonte: Lubin *et al.* (2015).

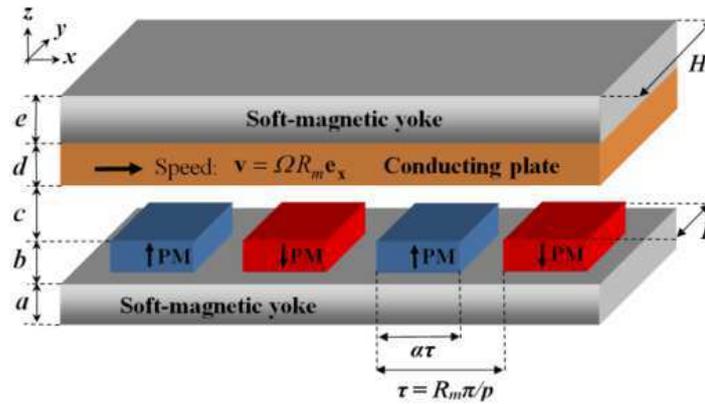
As análises acerca da operação em regime e resposta transitória dos acoplamentos magnéticos axiais, assim como seu desempenho para as condições de desalinhamento e sobrecarga, podem ser realizadas por meio da aproximação dos modelos 3D das Figuras 36 e 37, para modelos 2D, ilustrados nas Figuras 38 e 39 (LUBIN *et al.*, 2014).

Figura 38: Modelo 2D do acoplamento magnético com rotores com ímãs permanentes.



Fonte: Lubin *et al.* (2014).

Figura 39: Modelo 2D do acoplamento magnético com rotor com ímãs permanentes e rotor com disco de cobre.



Fonte: Lubin *et al.* (2015).

Os torques de saída dos modelos de acoplamentos magnéticos axiais, em função dos seus parâmetros geométricos, são calculados conforme a Tabela 3 (LUBIN *et al.*, 2014; LUBIN *et al.*, 2015).

Tabela 3: Equação do torque de saída do acoplamento magnético.

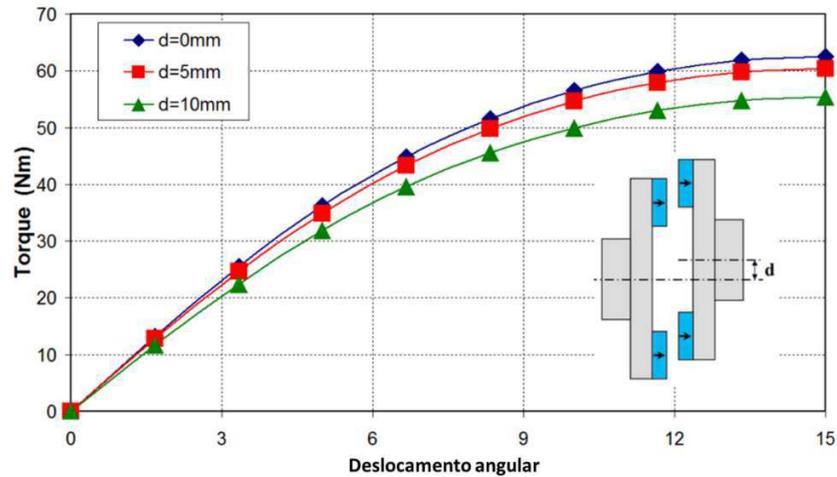
Torque de Saída	
Tipo de Acoplamento Axial	Equação
Rotores com ímãs permanentes	$T_e = T_{max} \sin p\delta$ $T_{max} = kc \left(\frac{16 B_r^2}{3\pi \mu_0} R_2^3 \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 \right) \sin^2 \left(\alpha \frac{\pi}{2} \right) \frac{\sinh^2(a)}{\sinh(2(1+v)a)} \right) \quad (9)$ <p style="text-align: center;">$kc \approx 0,75$</p>
Rotor com ímãs permanentes e rotor com disco de cobre.	$T_e = \frac{1}{2} \mu_0 p^2 \tau H \Re \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} jk \frac{M_{nk}^2}{\alpha_{nk}} \bar{r} \sinh(\alpha_{nk} b) \right\} \quad (10)$ <p>n e k são números ímpares, e \bar{r} é calculado conforme Lubin <i>et al.</i> (2015).</p>

Fonte: Adaptado de Lubin *et al.* (2014); Lubin *et al.* (2015).

Pelas Equações da Tabela 3, é possível concluir que o torque depende exclusivamente das características construtivas do dispositivo, não sendo possível controlá-lo, ao contrário dos inversores que possuem a capacidade de aumentar ou diminuir o torque que entregam para a máquina. Em aplicações sujeitas a grandes variações de torque, o acoplamento magnético pode não ser a melhor escolha.

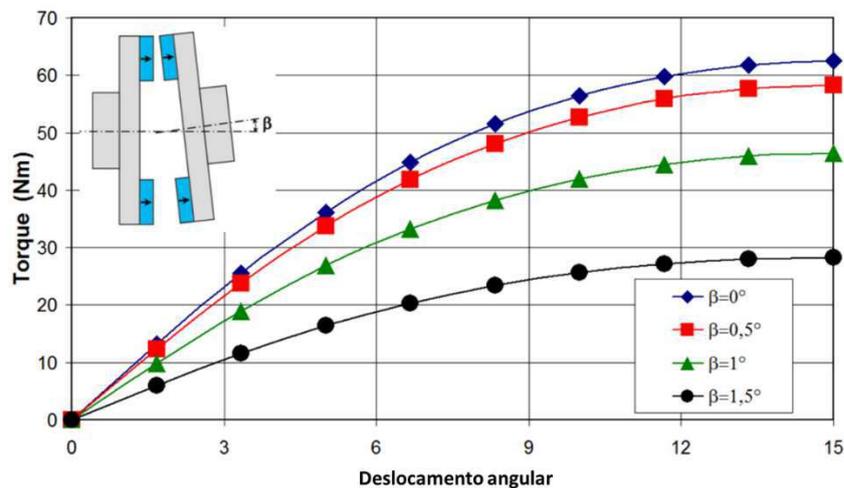
Segundo Lubin *et al.* (2014), a influência de diferentes valores de desalinhamentos (radial e angular) sobre o torque de saída do acoplamento magnético no modelo da Figura 36, pode ser avaliada a partir de uma análise por elementos 3D finitos. Para um determinado modelo estudado por Lubin *et al.* (2014), os efeitos dos desalinhamentos podem ser vistos nas Figuras 40 e 41.

Figura 40: Acoplamento submetido a desalinhamento radial.



Fonte: Adaptado de Lubin *et al.* (2014)

Figura 41: Acoplamento submetido a desalinhamento angular.



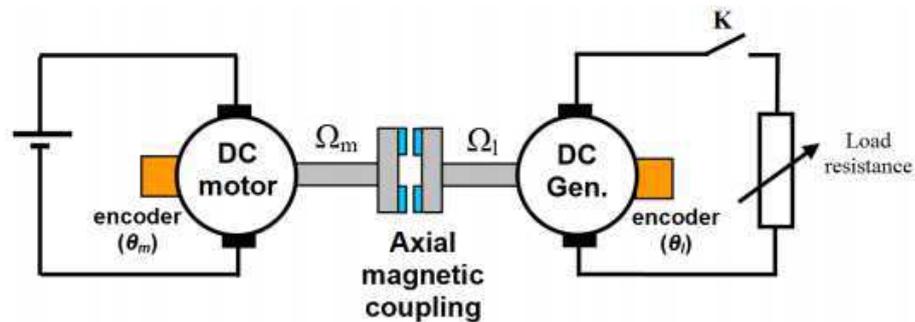
Fonte: Adaptado de Lubin *et al.* (2014)

Os resultados obtidos por Lubin *et al.* (2014) demonstram que esse tipo de acoplamento é altamente tolerante a desalinhamentos radial e mais sensível aos angulares. Com isso é possível concluir que condições de pequenos desalinhamentos não interferem de forma significativa no seu funcionamento. O mesmo se aplica aos acoplamentos que possuem um rotor com disco de cobre.

Uma outra condição de interesse para ser examinada é a de sobrecarga. Quando o acoplamento magnético precisa transferir um torque acima seu valor máximo definido pelas expressões da Tabela 3, ocorre uma perda de sincronia entre os rotores, fazendo o motor girar em vazio, garantindo assim uma importante proteção de sobrecarga a máquina. (MATSUMOTO, 2015). Para avaliar essa condição, Lubin *et al.* (2014) fez uso de uma

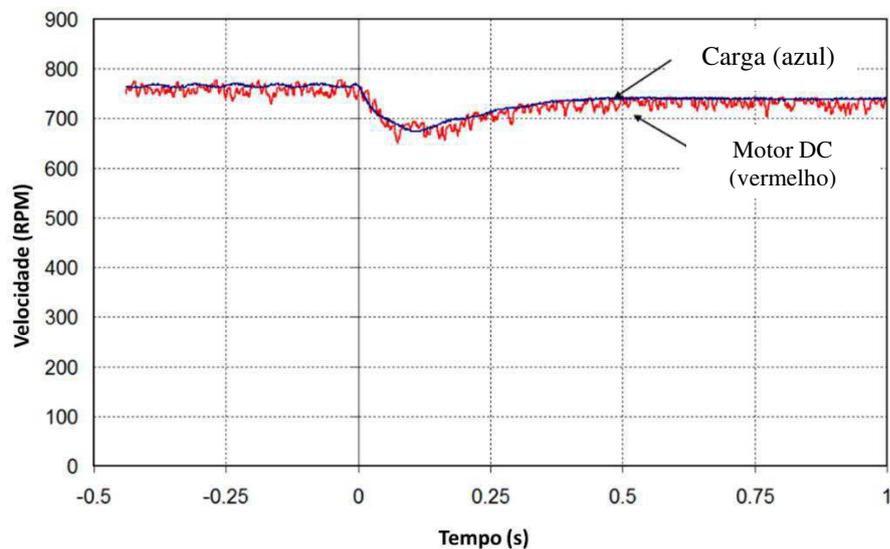
bancada, ilustrada na Figura 42, composta de um motor e gerador CC conectados por um acoplamento magnético, e uma resistência variável. Variando a corrente no gerador, por meio da resistência, controla-se o torque transmitido pelo acoplamento. Na Figura 43, para um determinado modelo, observa-se o comportamento para uma condição de torque inferior ao valor máximo, enquanto que a Figura 44, representa uma condição de sobrecarga onde ocorre a perda de sincronismo.

Figura 42: Bancada de teste de sobrecarga para acoplamento magnético.



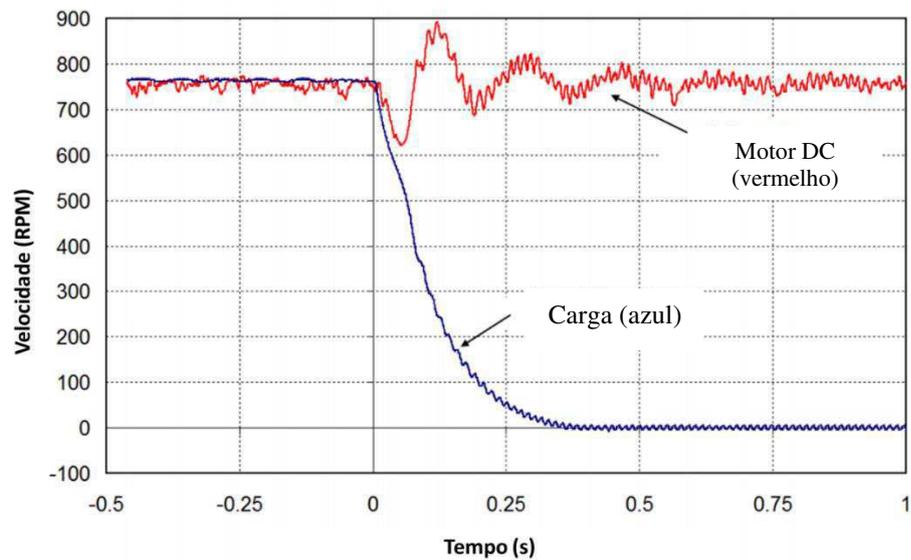
Fonte: Lubin *et al.* (2014)

Figura 43: Acoplamento submetido a torque inferior ao seu valor máximo.



Fonte: Lubin *et al.* (2014)

Figura 44: Acoplamento submetido a condição de sobrecarga.

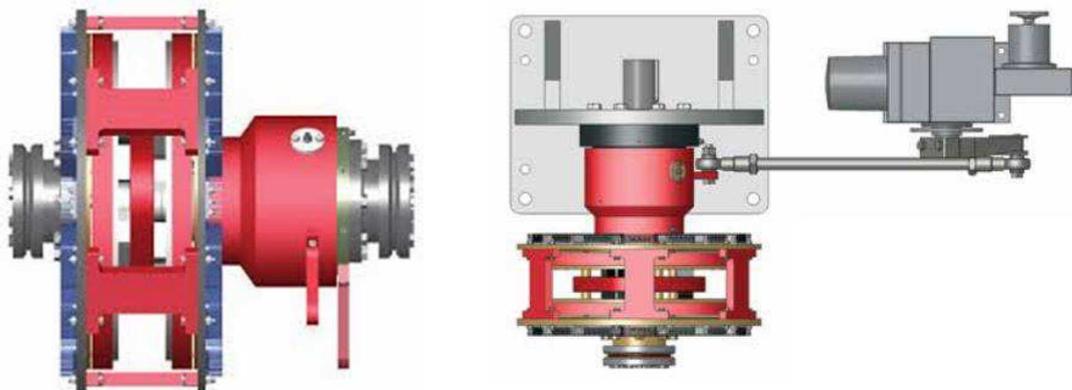


Fonte: Lubin *et al.* (2014)

Uma outra importante característica do acoplamento magnético axial, consequente da sua forma construtiva, permite uma redução da corrente de partida do motor por meio do escorregamento transitório entre os rotores durante o acionamento da máquina. Desta forma, o torque é transmitido aos poucos entre as partes, fazendo com que o motor sinta os efeitos da carga de forma gradual, possibilitando uma partida suave (MAGNADRIVE, 2015).

Para aplicações que demandam controle da velocidade de rotação, pode-se utilizar acoplamentos magnéticos que permitem variar a distância entre os rotores, possibilitando aumentar o escorregamento do eixo conduzido, diminuindo a sua velocidade. Esses modelos são denominados *Adjustable Speed Drive (ASD)*. Um modelo de ASD da MagnaDrive está ilustrado na Figura 45.

Figura 45: MagnaDrive ASD



Fonte: MagnaDrive (2015).

Um atuador elétrico é utilizado para variar a distância entre os rotores, resultando no controle da velocidade. Atualmente, o ASD é o principal concorrente do inversor para aplicações com velocidade variável.

2.2.4 CARACTERÍSTICAS DO USO DO ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

O uso do acoplamento magnético possui grandes vantagens comparado com o inversor de frequência, e vem fazendo com que essa tecnologia aumente sua participação no mercado. Por consistirem de rotores isolados e que não requerem alimentação para funcionar, grandes empresas estão investindo em projetos de substituição de inversores por acoplamentos magnéticos visando diminuir o custo com manutenção, melhorar a eficiência energética e aumentar a confiabilidade da aplicação. As principais características relacionadas ao seu uso são:

- Partida suave da carga;
- Não transmite vibrações entre o acionamento e carga;
- Alta tolerância a desalinhamentos radial e angular;
- Proteção contra sobrecargas;
- Maior vida útil do equipamento comparado com inversores;
- Menor custo de manutenção;
- Não possibilita um controle preciso de torque e velocidade;
- Necessidade de sensores para monitoramento da máquina;
- Funciona em qualquer motor;
- Não insere harmônicas na rede elétrica;
- Alta eficiência energética, próximo de 98% para velocidade nominal (MAGNADRIVE, 2015).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados estudos referentes ao uso das tecnologias do acoplamento magnético e inversor de frequência para o acionamento de motores de indução.

No livro de Hart (2011) são estudadas diversas topologias de circuitos de inversores de frequência. O autor apresenta as expressões para os cálculos dos valores instantâneos e médios das grandezas de corrente e tensão sobre a carga para inversores monofásicos e trifásicos, além de realizar uma análise dessas grandezas por meio das séries de Fourier. Na obra é abordada a topologia do inversor de seis degraus, a qual é comumente utilizada em inversores comerciais para o acionamento de motores de indução com ajuste de rotação. Ainda, o autor disserta sobre a modulação PWM, e destaca que a redução dos requisitos de filtros para harmônicas, e um melhor controle nas amplitudes da tensão de saída, são as principais vantagens do uso dessa técnica.

Lubin e outros (2013) desenvolveram um estudo teórico e experimental do acoplamento magnético axial, analisando seu comportamento transitório e em regime permanente. Os autores adotaram um modelo 3D de acoplamento com discos iguais os quais encontravam-se alojados ímãs permanentes. A partir de uma aproximação para um modelo em duas dimensões, foram derivadas expressões para o torque de saída e rigidez torcional do acoplamento em função dos seus parâmetros geométricos. Os autores constataram por meio de simulações e testes experimentais, as vantagens do dispositivo no que se refere a proteção contra sobrecarga e alta tolerância a desalinhamentos axial e radial.

Marques (2014) realizou uma revisão na literatura sobre inversores de frequência, na qual abordou seu princípio de funcionamento, características, classificações, finalidades, vantagens e desvantagens. No trabalho é apresentado as estratégias de controle escalar e vetorial que podem ser encontradas nos inversores comerciais mais comuns. Ademais, o trabalho apresenta uma série de experimentos para serem desenvolvidos com um modelo comercial de inversor. No trabalho, o inversor não foi comparado com outros tipos de acionamentos.

No trabalho de Matsumoto (2015), foi apresentado o princípio de funcionamento do acoplamento magnético a ímãs permanentes, suas vantagens e principais aplicações. Além disso, o autor realizou um estudo para caracterizar as perdas nesse dispositivo, quando alguma barreira se encontra entre os seus rotores. A metodologia desenvolvida no trabalho, se mostrou bastante útil para o dimensionamento de acoplamentos em aplicações industriais.

Lubin e Rezzoug (2015) realizam um estudo do acoplamento magnético que possui um rotor com ímãs permanentes e outro sendo um disco de cobre. A partir da análise do modelo em três dimensões, foram derivadas fórmulas para o cálculo do torque de saída do acoplamento. Os autores analisaram o comportamento do escorregamento do dispositivo em diferentes velocidades, assim como a influência dos parâmetros geométricos sobre o torque de saída. O trabalho possui uma importante contribuição de demonstrar que variações nos parâmetros dos ímãs e do disco de cobre, podem causar um considerável aumento no torque máximo transmitido entre os rotores.

Em Lugli e outros (2018), é feito um estudo comparativo das técnicas de controle vetorial e escalar empregadas em um inversor de frequência, o qual é utilizado em uma máquina para fabricação de massas. São apresentados os princípios de funcionamento das duas técnicas, suas vantagens, desvantagens e limitações. Os autores por meio de testes, compararam os resultados obtidos utilizando as duas técnicas, e demonstraram que o controle vetorial possibilita um controle de velocidade mais preciso. O trabalho demonstrou a alta capacidade do inversor para controle de velocidade da máquina de indução por meio da estratégia do controle vetorial. Os autores não realizam um estudo na máquina empregando com outros tipos de acionamentos como o acoplamento magnético de velocidade variável.

As referências bibliográficas citadas, abordam de forma individual, um tipo de tecnologia para o acionamento de motores de indução. Foi constatado que existem poucos trabalhos a nível nacional que contemplam o acoplamento magnético.

4 COMPARAÇÃO ENTRE INVERSOR DE FREQUÊNCIA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO.

Em um projeto industrial, a escolha da melhor tecnologia para ser utilizada vai depender dos requisitos impostos pela aplicação em questão, e muitas vezes, do orçamento disponível. Aplicações que exigem uma alta precisão de torque e velocidade, necessariamente irão ter que fazer uso do inversor de frequência, toda via, quando esse requisito não é obrigatório, o acoplamento magnético pode vir a ser a melhor opção. Diante disso, diversos critérios devem ser analisados para assegurar que a escolha final entregue o melhor resultado possível em termos de qualidade de operação e custo de manutenção.

Na Tabela 4 reúne-se informações e compara as duas tecnologias com base em importantes critérios que devem ser analisados antes da execução do projeto.

Tabela 4: Comparação entre acoplamento magnético e inversor de frequência com base em importantes critérios.

Critério	Tecnologia de acionamento	
	Inversor de Frequência	Acoplamento Magnético
Partida da Máquina	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilita partida suave controlada e com alto torque. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partida suave sem controle de torque.
Conexão Motor e Carga	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência de vibrações e desalinhamentos. • Aumento do desgaste de rolamentos. • Diminui a vida útil da máquina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tolerância a desalinhamentos radial e axial. • Elimina vibrações prejudiciais. • Maior vida útil da máquina.
Eficiência e economia de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de energia devido a aquecimento de componentes (chaves eletrônicas, capacitores, transformadores, filtros). • Maior eficiência com velocidades abaixo de 80% da nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência próxima de 98% para velocidade nominal. • Maior eficiência com velocidade acima de 80% da nominal.
Proteções elétricas	<ul style="list-style-type: none"> • Possui inúmeras proteções elétricas devido ao seu sistema microcontrolado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possui apenas proteção contra sobrecarga devido à perda de sincronismo dos rotores.
Custo de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de manutenção com reposição de componentes. • Necessário técnico especializado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo. • Praticamente não há desgaste dos componentes. • A manutenção pode ser feita sem a necessidade de um técnico especializado.
Sensibilidade à temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes sensíveis a temperaturas altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de resistir a temperaturas de 176° C.

Injeção de Harmônicos	<ul style="list-style-type: none"> • Inserção de harmônicos na rede, necessitando a utilização de filtros. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não insere harmônicos na rede.
Monitoramento da máquina	<ul style="list-style-type: none"> • Inúmeros recursos de monitoramento de velocidade, corrente, tensão, torque, entre outras variáveis. • Possui total integração com controlador lógico programável (CLP). 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de instalação de sensores para monitoramento.
Controle da máquina	<ul style="list-style-type: none"> • Possui técnicas de controle altamente eficientes como o controle vetorial FOC 	<ul style="list-style-type: none"> • O controle de velocidade é em função do escorregamento da máquina.
Instalação e requisitos especiais	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de infraestrutura como gavetas, cabos elétricos e sistemas de refrigeração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pouca infraestrutura. • Pode ser instalado em ambientes desfavoráveis.
Tipo de motor	<ul style="list-style-type: none"> • Motores especiais para inversores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Funciona com qualquer motor.
Vida útil	<ul style="list-style-type: none"> • Em média de 7 a 12 anos com necessidade de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • 20 anos de vida útil sem necessidade de manutenção para os acoplamentos MagnaDrive (MagnaDrive, 2015).
Correção do fator de potência	<ul style="list-style-type: none"> • Não podem ser usados capacitores de correção de fator de potência com inversores PWM (PNNL, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitores de baixo custo para correção de fator de potência podem ser usados.

Fonte: Autor; PNNL (2002); Matsumoto (2015); Lubin *et al.* (2015); MagnaDrive (2015).

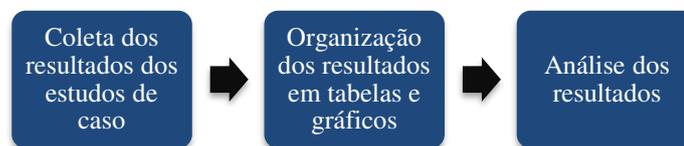
As informações contidas na Tabela 4 demonstram que os acoplamentos são preferíveis em relação aos inversores na maioria dos critérios analisados, com destaque para seu menor custo de manutenção, alta vida útil, menor número de requisitos para instalação e não inserção de harmônicos. Por outro lado, os inversores possibilitam uma integração com CLP's (fator importante numa planta industrial), oferecem maior número de proteções elétricas à máquina, e permitem a utilização da técnica de controle vetorial à qual viabiliza a partida suave com alto torque.

Na Tabela 4 evidencia-se que em aplicações que não exigem alta precisão no controle de velocidade e torque (necessidade do controle vetorial), o uso do acoplamento magnético oferece maiores ganhos operacionais.

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi baseada em análises de dois estudos de caso desenvolvidos nos Estados Unidos que contemplam a tecnologia do acoplamento magnético. Foram seguidos os procedimentos: coleta dos resultados dos estudos de caso, organização dos resultados por meio da construção de tabelas e gráficos, e análise dos resultados, como representado no diagrama de blocos da Figura 46.

Figura 46: Diagrama de blocos metodologia.



Fonte: Autor.

Neste capítulo, serão apresentados os dois estudos e suas respectivas metodologias. No capítulo seguinte, os resultados dos dois estudos serão discutidos.

5.1 LITERATURA 1: TECHNOLOGY DEMONSTRATION OF MAGNETICALLY-COUPLED ADJUSTABLE SPEED DRIVE SYSTEMS, PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, 2002.

Testes foram desenvolvidos pelo *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), na Universidade de Oregon, EUA, para o Departamento de Energia dos Estados Unidos, com o objetivo de avaliar a eficiência de diferentes acionamentos de velocidade variável. Foram utilizados modelos comerciais, consistindo de um inversor de frequência da Allen Bradley e dois acoplamentos magnéticos, um MagnaDrive, e outro PAYBACK, ilustrados nas Figuras 47, 48 e 49, respectivamente. Os dados dos equipamentos estão contidos na Tabela 5. O perfil da carga escolhido foi de um ventilador de fluxo variável comumente encontrado em sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC).

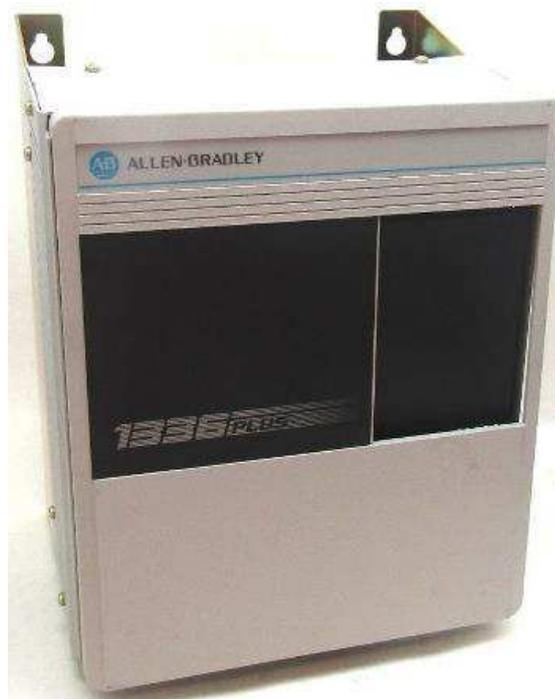
Tabela 5: Equipamentos utilizados nos testes.

Equipamento	Fabricante	Modelo	Preço (US\$)*
Inversor de Frequência	Allen Bradley	1336S	8.582
Acoplamento MagnaDrive ASD	MagnaDrive	14.5H	11.147
Acoplamento PAYBACK	Coyote Electronics	Easy-5XE-9.0	4.900

*Preço para o ano de 2002.

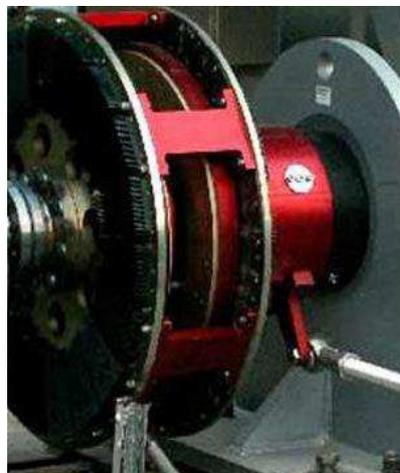
Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

Figura 47: Inversor Allen Bradley 1336S



Fonte: Industrial Parts R US (2019).

Figura 48: Acoplamento MagnaDrive ASD.



Fonte: MagnaDrive (2019).

Figura 49: Acoplamento PAYBACK.



Fonte: PAYBACK (2006).

Para todos os equipamentos testados, foi utilizado um motor de 50 hp para o acionamento da carga. Os principais dados de placa do motor estão registrados na Tabela 6.

Tabela 6: Dados de placa do motor utilizado nos testes.

Fabricante	US Electric Motors/Emerson
Modelo	R159A
Número de catálogo	8P50P2C
Número de fases	3
Peso	610 lb
Potência (HP)	50
Velocidade Nominal (RPM)	1775
Fator de Serviço	1,15
Frequência (Hz)	60
Tensão (V)	460
Corrente (A)	57,5
Fator de Potência	0,885

Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

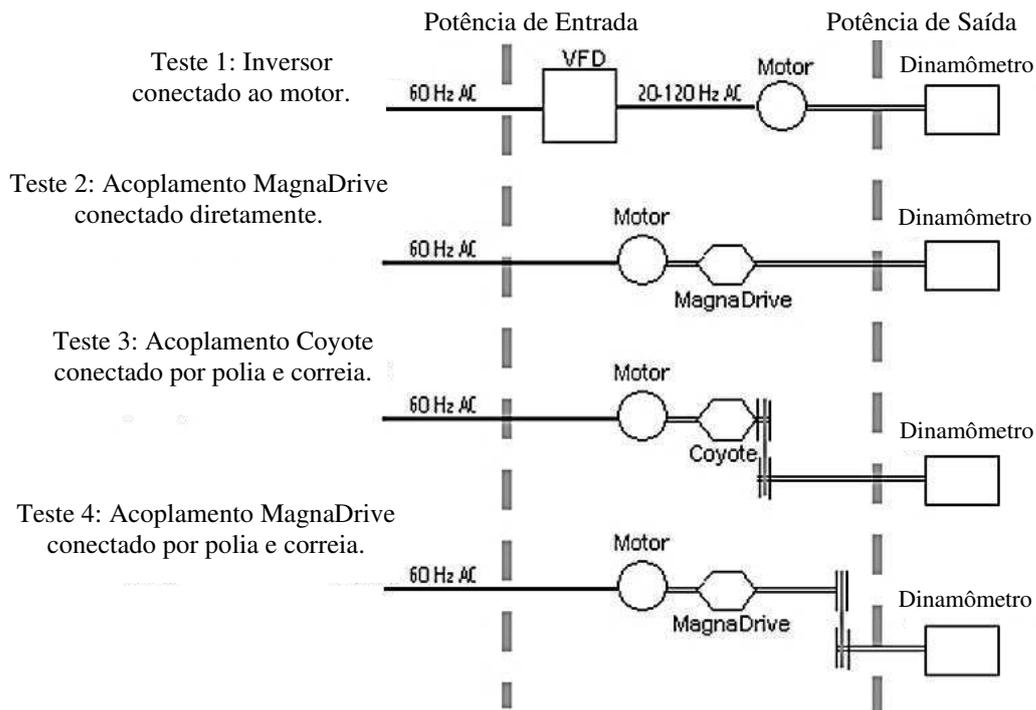
Foram realizados quatro testes em diferentes cenários e um dinamômetro foi utilizado para representar o perfil da carga do ventilador de fluxo variável. Com o inversor e acoplamento MagnaDrive, a conexão à carga foi feita de forma direta, entretanto, para o PAYBACK, foi necessário o uso de polia e correias para acoplá-lo à carga. Os testes foram montados da seguinte maneira:

- Teste 1: Inversor ligado diretamente ao motor.
- Teste 2: Acoplamento MagnaDrive ligado diretamente à carga.
- Teste 3: Acoplamento PAYBACK ligado indiretamente à carga por polia e correia. Para este teste foi feito uso de uma relação de polia de 1:1 para fazer uso da curva original da carga.

- Teste 4: Acoplamento MagnaDrive ligado indiretamente à carga por polia e correia. Para este teste também foi feito uso de uma relação de polia de 1:1.

O esquema contendo os quatro cenários dos testes realizados, pode ser observado na Figura 50.

Figura 50: Cenários dos testes realizados.



Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

Para cada teste foram realizadas medições de 14 pontos ao longo da curva de resposta da carga, referentes às grandezas de torque de saída, velocidade de saída, potência ativa de entrada, potência reativa, fator de potência, eficiência e potência no eixo da máquina. Os dados referentes aos resultados dos testes foram coletados para análise.

5.2 LITERATURA 2: WASHINGTON MUTUAL TOWER, MAGNADrive, 2002.

A MagnaDrive desenvolveu um estudo de caso no sistema de HVAC do edifício Washington Mutual Tower, ilustrado na Figura 51, que consiste em um dos principais arranha-céus do mundo, com 235 m de altura, situado na cidade de Seattle, Estados Unidos. O sistema

é utilizado para manter em temperaturas mais baixas o ar interno da torre em épocas de calor durante o ano.

Figura 51: Washigton Mutual Tower.



Fonte: The Skycraper Center (2019).

A MagnaDrive identificou no sistema dois motores que possuíam nenhum tipo de controle e que poderiam ser aplicados acoplamentos magnéticos ASD. As máquinas em questão foram duas bombas, uma de água do condensador, e outra de água gelada. Na Tabela 7 estão contidas as informações dos motores. Também foi constatado que o sistema opera 8 horas por dia, durante 100 dias do ano, referente a época mais quente. Nos demais intervalos, devido a vantagem do clima frio da cidade, 100% do ar que circula na torre é proveniente do ambiente externo e o sistema fica desligado.

Tabela 7: Informações dos motores.

Motor Bomba	Funcionalidade	Potência Nominal (HP)	Velocidade Nominal (RPM)
1	Água do condensador	75	1800
2	Água gelada	125	1800

Fonte: Adaptado de MagnaDrive (2019).

Durante a operação, as bombas operavam continuamente na velocidade máxima e o controle dos fluxos de água eram realizados por meio de válvulas nas tubulações. Nessa

configuração a eficiência era bastante baixa devido as máquinas operarem na velocidade máxima independente do fluxo requisitado. Além dessa ineficiência, vibrações estavam causando problemas nas bombas e válvulas, e eram necessários *soft-startes* para amenizar a corrente de partida das bombas. Foram levantadas as características operacionais das bombas que estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8: Dados operacionais das bombas.

Motor Bomba	Tipo de Controle	Quantidade de horas de operação por ano	Potência Consumida (kW)	Tipo de Partida
1	Uma válvula manual é utilizada para controlar o fluxo.	800	38	Soft-starter
2	Em cada andar da torre, um termostato e uma válvula de controle regulam o fluxo.	800	65	Soft-starter

Fonte: Adaptado de MagnaDrive (2019).

Este tipo de aplicação não requer um controle preciso de torque e velocidade, possibilitando o uso de um inversor de frequência, entretanto a equipe do edifício optou pela instalação dos acoplamentos MagnaDrive ASD. Os seguintes critérios foram analisados para a decisão:

- Maior facilidade na instalação;
- Menor custo de instalação;
- O espaço da sala de máquinas era reduzido, o que dificultava a instalação física de um inversor;
- Menor custo com manutenção, eliminando as vibrações.

Dois acoplamentos MagnaDrive ASD foram instalados nas duas bombas. Em adição a isso, sensores de temperatura foram utilizados para enviar um sinal de controle para o atuador dos ASD's, como forma de obter uma regulagem precisa de fluxo.

6 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos dois estudos de caso descritos no capítulo anterior.

6.1 RESULTADOS LITERATURA 1

Os resultados obtidos nos quatro testes realizados com os diferentes acionamentos estão contidos nas Tabelas 9, 10, 11 e 12. Em cada tabela estão contidos os dados obtidos nos testes descritos na Figura 50.

Tabela 9: Resultados do teste com inversor.

Torque de saída (Nm)	Velocidade de saída (rpm)	Potência Ativa Entrada (kW)	Potência Reativa (kVAR)	Fator de Potência	Eficiência (%)	Potência ativa no eixo (kW)
4,70	230	0,58	1,03	0,49	0,20	0,11
7,40	311	0,73	1,26	0,50	0,33	0,24
9,90	368	0,91	1,52	0,51	0,42	0,38
16,40	490	1,44	2,19	0,55	0,59	0,84
25,70	628	2,35	3,25	0,59	0,72	1,69
36,60	758	3,67	4,67	0,62	0,79	2,91
49,90	892	5,55	6,51	0,65	0,84	4,66
65,50	1018	8,14	9,04	0,67	0,86	6,98
81,80	1152	11,24	11,60	0,70	0,88	9,87
99,80	1269	14,88	14,55	0,72	0,89	13,26
123,30	1399	20,11	18,28	0,74	0,90	18,06
143,80	1533	25,48	20,91	0,77	0,91	23,08
168,70	1659	32,11	23,16	0,81	0,91	29,31
197,90	1799	41,33	25,07	0,86	0,90	37,28

Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

Tabela 10: Resultado do teste com acoplamento Payback com polia.

Torque de saída (Nm)	Velocidade de saída (rpm)	Potência Ativa Entrada (kW)	Potência Reativa (kVAR)	Fator de Potência	Eficiência (%)	Potência ativa no eixo (kW)
4,80	230	2,34	10,91	0,21	4,95	0,12
8,30	311	3,16	10,97	0,28	8,55	0,27
9,90	371	3,56	11,00	0,31	10,80	0,38
16,20	491	4,80	11,08	0,40	17,34	0,83
25,70	629	6,61	11,19	0,51	25,61	1,69
38,10	758	9,04	11,49	0,62	33,45	3,02
50,10	890	11,29	11,69	0,70	41,36	4,67
64,60	1019	13,88	12,14	0,75	49,66	6,89
81,30	1150	17,37	12,63	0,81	56,37	9,79
99,09	1271	20,83	13,51	0,84	63,32	13,19
119,50	1398	24,74	14,40	0,87	70,71	17,49
142,30	1530	29,11	15,61	0,88	78,32	22,8
176,90	1706	36,30	18,31	0,89	87,06	31,6
193,20	1702	39,66	19,71	0,90	86,82	34,43

Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

Tabela 11: Resultados do teste com acoplamento Magnadrive.

Torque de saída (Nm)	Velocidade de saída (rpm)	Potência Ativa Entrada (kW)	Potência Reativa (kVAR)	Fator de Potência	Eficiência (%)	Potência ativa no eixo (kW)
8,90	230	4,75	11,01	0,40	4,51	0,214
9,00	310	4,76	11,04	0,40	6,13	0,292
10,60	370	5,03	11,03	0,42	8,16	0,411
16,20	490	6,17	11,13	0,49	13,46	0,831
25,50	629	7,88	11,27	0,57	21,32	1.680
36,60	759	10,40	11,52	0,67	27,98	2.909
50,30	890	12,60	11,83	0,73	37,20	4.688
65,70	1020	15,57	12,29	0,79	45,08	7.018
81,80	1150	18,70	12,91	0,82	52,69	9.851
99,40	1270	22,10	13,70	0,85	59,82	13.220
123,80	1400	26,75	14,87	0,87	67,85	18.151
143,60	1530	30,65	16,04	0,89	75,07	23.008
177,80	1705	37,64	18,55	0,90	84,34	31.747
197,30	1728	41,76	20,34	0,90	85,50	35.704

Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

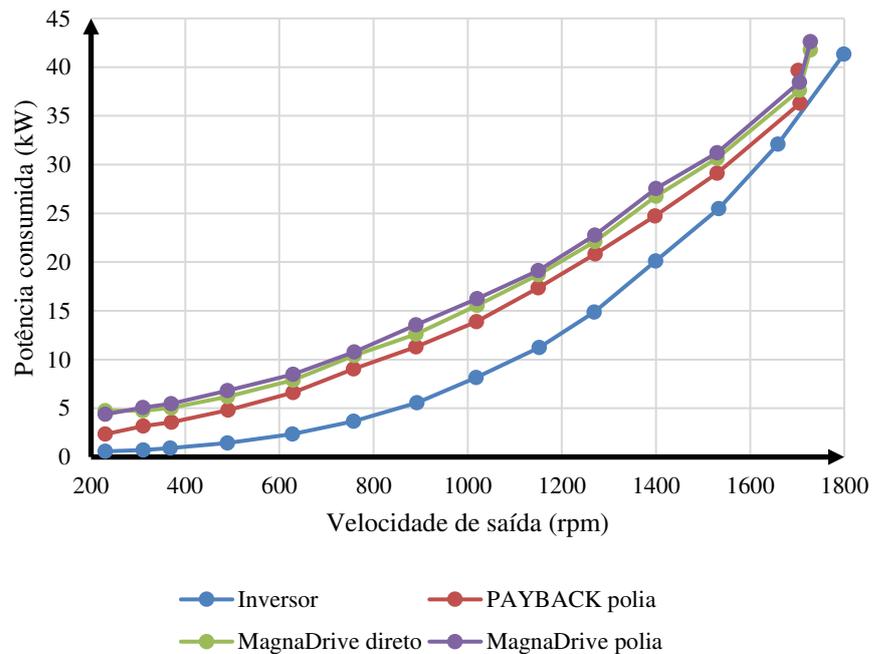
Tabela 12: Resultados do teste acoplamento Magnadrive com polia.

Torque de saída (Nm)	Velocidade de saída (rpm)	Potência Ativa Entrada (kW)	Potência Reativa (kVAR)	Fator de Potência	Eficiência (%)	Potência ativa no eixo (kW)
4,50	230	4,38	11,04	0,37	2,47	0,108
7,70	310	5,07	11,09	0,42	4,93	0,25
9,80	370	5,48	11,12	0,44	6,93	0,38
16,70	490	6,82	11,22	0,52	12,57	0,857
25,60	629	8,48	11,40	0,60	19,88	1.686
37,00	759	10,76	11,63	0,68	27,33	2.941
51,90	890	13,55	11,99	0,75	35,70	4.837
65,90	1020	16,25	12,40	0,80	43,31	7.039
81,40	1150	19,11	12,94	0,83	51,30	9.803
99,40	1270	22,75	13,80	0,86	58,11	13.220
123,30	1400	27,53	15,08	0,88	65,66	18.077
143,60	1530	31,22	16,25	0,89	73,70	23.008
178,00	1705	38,44	18,94	0,90	82,68	31.781
197,70	1728	42,60	20,87	0,90	83,98	35.775

Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

A partir dos resultados coletados, pode-se analisar o consumo de potência a partir das curvas de consumo de potência ativa de cada acionamento, como pode ser visto na Figura 52. De acordo com as curvas, constata-se que o inversor consumiu uma quantidade menor de potência ativa que os acoplamentos magnéticos em todas as velocidades de operação.

Figura 52: Consumo de potência ativa dos equipamentos.

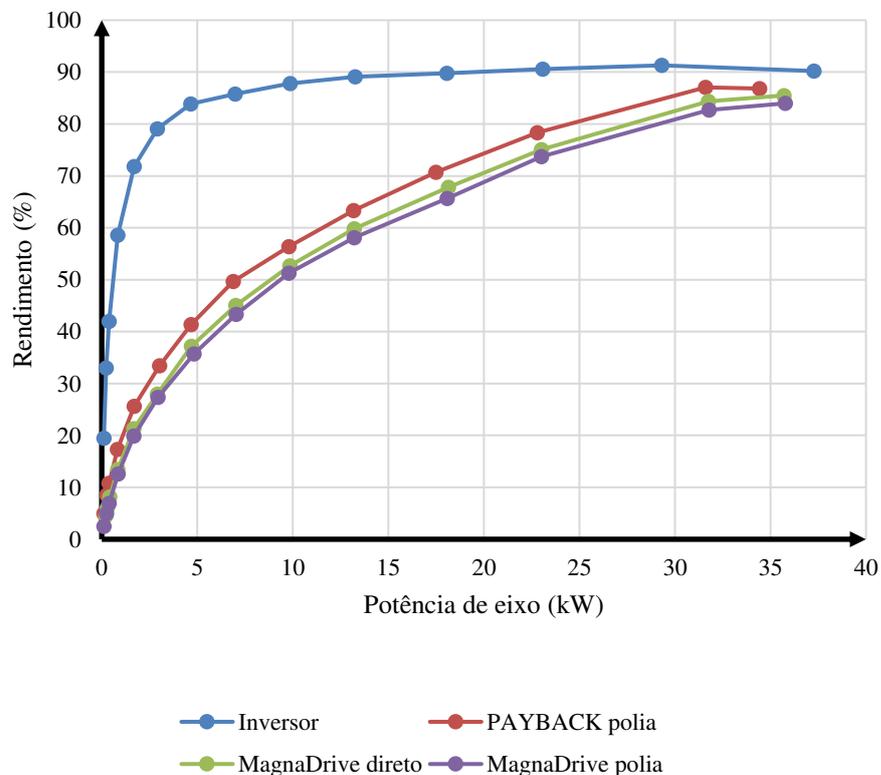


Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

Nos pontos próximos da velocidade nominal, a diferença entre os equipamentos é bem pequena, o que comprova que o acoplamento magnético é muito eficiente em altas velocidades. Em aplicações nas quais o motor opera a velocidade nominal, o acoplamento magnético torna-se mais viável devido às vantagens únicas oferecidas pela sua tecnologia, apesar do consumo um pouco maior que o inversor. Além disso, fica evidente que em baixas velocidades o inversor foi mais eficiente, sendo seu consumo em 230 RPM igual a 0,58 kW, quatro vezes menor que o menor valor obtido com os acoplamentos testados.

Outra análise importante se refere-se ao rendimento dos equipamentos em função da carga acoplada ao eixo, à qual é diretamente proporcional à velocidade do ventilador. Na Figura 53 é possível observar as curvas de rendimento dos três equipamentos. Na Figura 53 observa-se que o inversor opera com um rendimento próximo de 90% na maior parte da faixa de potência da carga. Para baixas velocidades, seu rendimento cai para um valor próximo de 35%, entretanto ainda continua mais eficiente que os acoplamentos magnéticos. À medida que a velocidade aumenta, exigindo mais potência do motor, os acoplamentos apresentam melhor desempenho, ficando bem próximos ao inversor como pode ser observado para valores acima de 30 kW.

Figura 53: Rendimentos dos equipamentos obtidos nos testes.

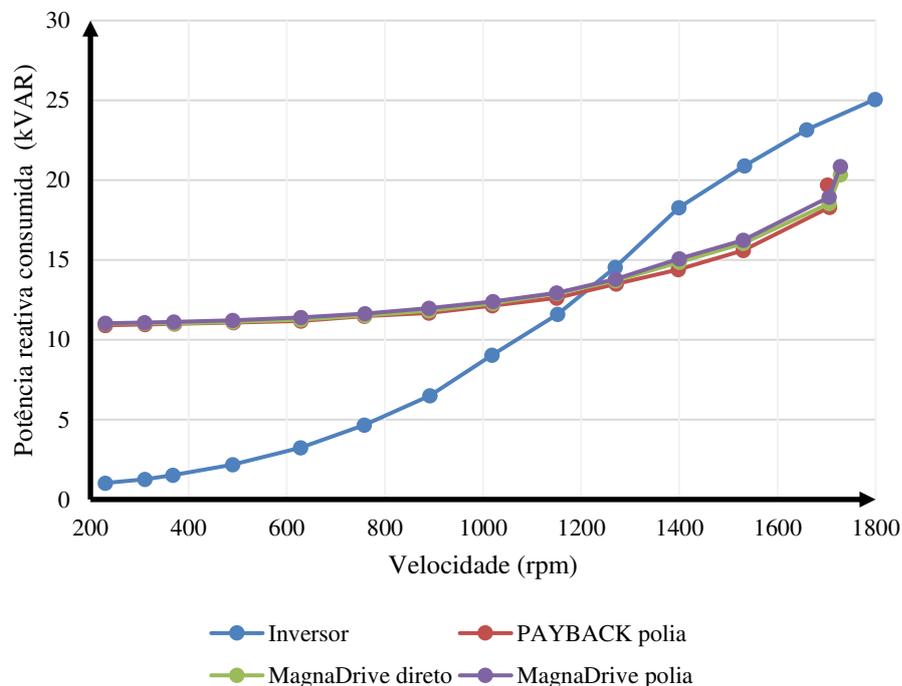


Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

Com o avanço da tecnologia dos acoplamentos magnéticos nos últimos anos, é possível que testes com modelos mais recentes possam vir a ter resultados de rendimento superior aos obtidos por esse estudo do PNNL.

Outra análise importante entre as tecnologias é referente a quantidade de potência reativa consumida. Na Figura 54 ilustra-se o consumo de reativos dos quatro equipamentos. A quantidade de reativos consumidos pelo inversor operando a plena carga é consideravelmente superior aos acoplamentos magnéticos, toda via, para velocidade baixas, seu consumo é bem inferior.

Figura 54: Consumo de potência reativa dos equipamentos.



Fonte: Adaptado de PNNL (2002).

O baixo fator de potência apresentado pelos inversores em altas velocidades é devido as harmônicas geradas pelos seus circuitos eletrônicos de chaveamento. Como esse tipo de equipamento funciona com modulação PWM, não se pode facilmente realizar a correção do fator de potência por meio do uso de bancos de capacitores. Em contrapartida, os reativos consumidos com o acoplamento magnético são oriundos da característica indutiva do motor, sendo assim, possível ser compensados com a utilização de bancos de capacitores (PNNL, 2002).

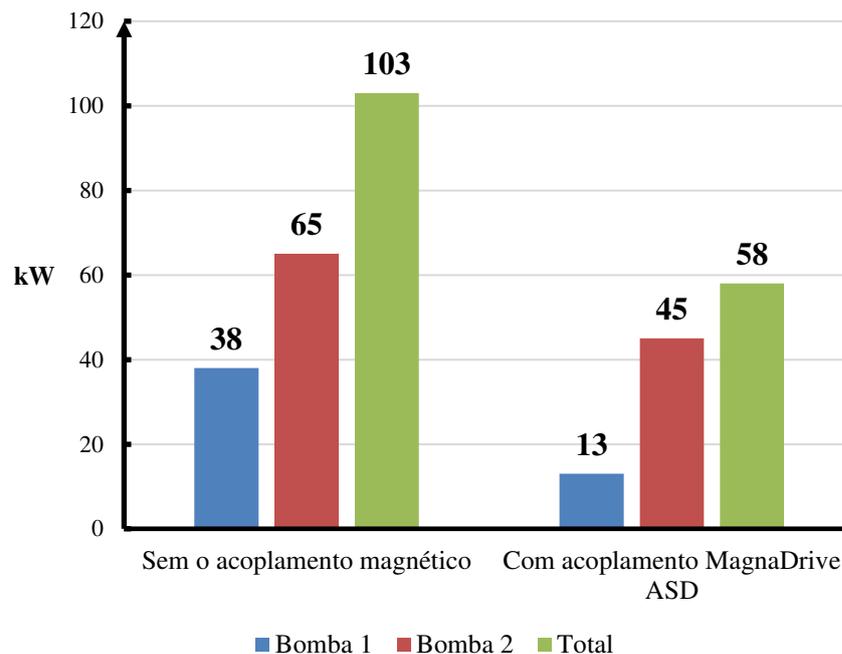
Este estudo comprovou que o acoplamento apresenta um alto rendimento em velocidades altas, possibilitando ser utilizada no lugar dos inversores em um grande número de

aplicações, onde os motores trabalham com sua rotação nominal. Além disso, os reativos consumidos podem ser facilmente compensados com capacitores.

6.2 RESULTADOS LITERATURA 2

A instalação dos acoplamentos magnéticos, resultou em grandes vantagens para o sistema de refrigeração. A eliminação de vibrações e ausência de manutenções, foram dois resultados obtidos imediatamente após a instalação. O controle de velocidade passou a ser realizado via controle dos atuadores dos ASD's, variando a velocidade da carga, o que reduziu de drasticamente os consumos de energia das duas bombas, conforme o gráfico construído com os consumos, ilustrado na Figura 55.

Figura 55: Consumo de potência ativa das bombas.



Fonte: Adaptado de MagnaDrive (2019).

Analisando os valores presentes na Figura 55, observa-se que o consumo da bomba 1 diminuiu para 13 kW, enquanto a 2 reduziu para 45 kW. Na Tabela 13 estão registrados os dados dos resultados obtidos.

Tabela 13: Consumo de potência ativa das bombas.

Motor Bomba	Potência Consumida (kW)		Redução (%)
	Sem acoplamento magnético	Acoplamento MagnaDrive ASD	
1	38	13	31
2	65	45	66
Total	103	58	45

Fonte: Autor.

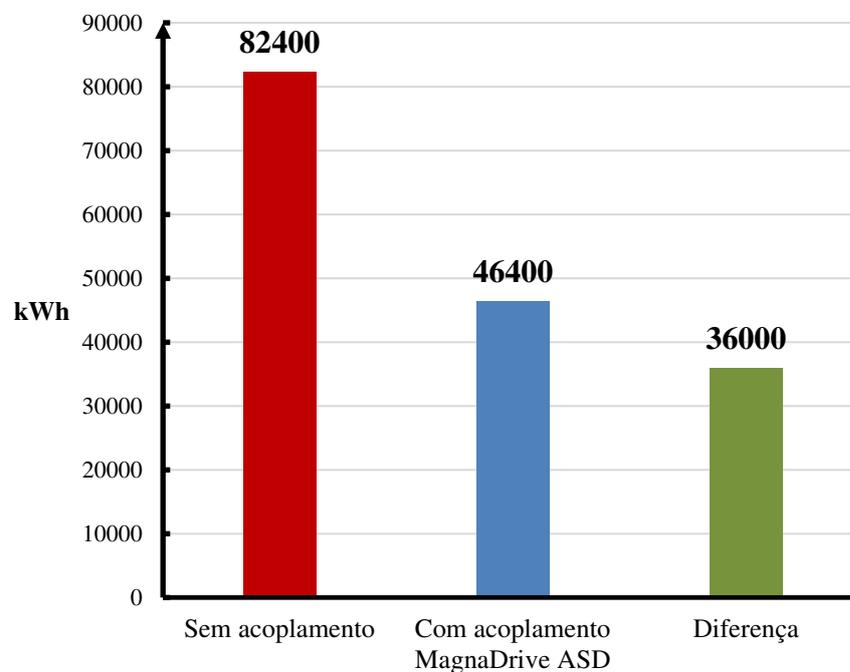
Com os acoplamentos foi possível obter uma redução de 45 kW, cerca de 45%, na potência consumida pelos motores. Em termos de consumo energia anual, a Tabela 14 contém os cálculos para a quantidade de kWh economizados com o projeto. Na Figura 56 observa-se a diferença entre os dois cenários.

Tabela 14: Consumo de energia das bombas.

Motor Bomba	Quantidade de horas de operação por ano	Energia Consumida por ano (kWh)		Diferença de Energia Consumida
		Sem acoplamento magnético	Acoplamento MagnaDrive ASD	
1	800	30400	10400	20000
2	800	52000	36000	16000
Total	800	82400	46400	36000

Fonte: Adaptado de MagnaDrive (2019).

Figura 56: Consumo de energia.



Fonte: Adaptado de MagnaDrive (2019).

O projeto resultou em uma economia de 36.000 kWh por ano e poderia ser maior caso o sistema operasse durante outras épocas. Os clientes fizeram as seguintes afirmações após a finalização do projeto:

“O controle é muito melhor que qualquer inversor. Não é necessário espaço grande e as harmônicas não são um problema. Não precisamos substituir os acoplamentos anualmente e lidar com problemas de alinhamento das bombas e motores. O barulho desapareceu assim que o sistema foi ligado...!”

Este estudo de caso comprovou que esse dispositivo pode ser empregado em projetos de eficiência e os benefícios devido à não transmissão de vibrações, bem como o menor custo de instalação e manutenção, fez com que o edifício optasse por essa tecnologia em lugar dos tradicionais inversores.

6.3 GANHOS OBTIDOS COM OS ACOPLAMENTOS

Os dois estudos de caso discutidos, comprovaram que o uso dos acoplamentos magnéticos proporcionou vários ganhos em relação aos inversores de frequência. Na Tabela 15 estão reunidos os ganhos evidenciados pelos dois estudos.

Tabela 15: Ganhos obtidos com os acoplamentos nos estudos de caso.

Ganhos	
Estudo de caso 1	Estudo de caso 2
<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de potência ativa próximo ao inversor para velocidades altas; • Baixo consumo de reativos; • Menor custo de investimento inicial; • Maior fator de potência; • Redução das componentes harmônicas; • Alto rendimento para velocidades altas; • Facilidade para troca do tipo de acionamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Economia de 36.000 kWh. • Eliminação da necessidade de <i>soft-starter</i> para partida das bombas. • Eliminação de ruídos gerados pelas vibrações. • Eliminação dos problemas devido à desalinhamentos. • Não foram relatados mais problemas com harmônicos. • Instalação dos acoplamentos em espaço limitado. • Eliminação da substituição anual dos acoplamentos das bombas.

Fonte: Autor.

Apesar dos dois estudos abordarem o acoplamento de forma diferente, um realiza testes em laboratório, enquanto o outro trata sua instalação em bombas de um sistema real, ambos evidenciaram ganhos importantes que são determinantes para a escolha da tecnologia do acoplamento magnético.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado uma análise de estudos de caso nos quais são abordados a aplicação do acoplamento magnético no acionamento de motores de indução, com o objetivo verificar sua viabilidade frente ao consolidado inversor de frequência.

A transmissão de torque entre dois rotores isolados fisicamente, faz com que o acoplamento proporcione excelentes vantagens como a não transmissão de vibrações, tolerância a desalinhamentos, partida suave, não geração de harmônicas e possibilidade de uso em acionamentos críticos. Em aplicações que não requerem de controle preciso de torque e velocidade, esse produto é uma ótima opção para substituir o inversor.

Além do mais, sua vida útil estimada de 20 anos, independente de manutenção, torna esse dispositivo muito atraente frente aos inversores que, em média, exigem manutenções corretivas após seis anos de operação.

Nas análises dos estudos de caso ficou evidenciado que o acoplamento magnético pode apresentar rendimento semelhante aos inversores, assim como consumir menor quantidade de reativos, além de não requerem complexa infraestrutura para instalação, tornando possível de serem aplicados em projetos de eficiência energética. No projeto abordado na segunda análise, a instalação dos dispositivos gerou uma economia de 36.000 kWh por ano, resultando em significantes ganhos operacionais para o edifício.

Na construção deste trabalho foram utilizados conhecimentos em diversas disciplinas e seus respectivos laboratórios, com maior relevância para as de Instalações Elétricas, Eletrônica de Potência, Dispositivos Eletrônicos e Máquinas Elétricas

Como sugestão para trabalho futuros, pode ser realizada uma análise econômica e de desempenho, comparando modelos recentes de acoplamentos magnéticos e inversores de frequência, avaliando o consumo de energia dos acionamentos, precisão no controle de velocidade e tempo de retorno do investimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APC. **No-break inteligente RT da APC, 1500 VA e 120V, Brasil.** Disponível em: <https://www.apc.com/shop/br/pt/products/No-break-inteligente-RT-da-APC-1500-VA-e-120V-Brasil/P-SURTA1500XL-BR>. Acesso em: 10 nov. 2019.

ARIPRIHARTA; HASANAH, R. N. **Sensorless Flux Vector Control of Induction Motor for Driving Centrifugal Pump.** In: Seminar on Electrical Engineering, Informatics, and its Education, 1., 2011, Malang, Indonesia. Conference [...].

BABYAK, R. **Diffrente way to Drive.** Disponível em: <http://www.magnadrive.com/wp-content/uploads/2018/07/Appliance-Manufacturer-10-11.pdf>. Acesso em: 13 out. 2019.

BERNARD & COMPANYS. **Siemens Enhances Sinamics G120 Drive Platform with Industrial Ethernet Connectivity.** Disponível em: <https://bernardandcompany.wordpress.com/2013/05/30/siemens-enhances-sinamics-g120-drive-platform-with-industrial-ethernet-connectivity/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COYOTE ELETRONICS, INC. **Magnetic Coupled Variable Speed Belt Drive.** Fort Worth: 2006.

DOLISY, B.; LUBIN, T.; MEZANI, S.; LÉVÊQUE, J. **Three-Dimensional Analytical Model for an Axial-Field Magnetic Coupling Three-Dimensional Analytical Model for an Axial-Field Magnetic Coupling,** v. 35, 2014.

EECO. **PowerFlex 750-Series Maintenance and Troubleshooting.** Disponível em: <https://eecoonline.com/event/powerflex-750-series-maintenance-troubleshooting/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

INDUSTRIAL PARTS R US. **Allen Bradley 1336S-BRF100-AN-FR4 Ser D 1336 Plus AC Drive 10Hp Speed Control** Disponível em: <https://industrialpartsrus.com/allen-bradley-1336s-brf100-an-fr4-ser-d-1336plus-ac-drive/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

FURLANI, E. P. **Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analysis and Applications**. 1st ed. San Diego: Academic Press, 2001. 518 p.

GUEDES, S. D. **Projeto de Inversor Trifásico Aplicado ao Acionamento de Motor De Indução**. 2015. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e projetos de circuitos**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

KVC. **POWERFLEX 755 AC PACKAGED DRIVE**. Disponível: <https://www.kvc.com.my/kvcproducts/Automation-and-Control/Contactor-and-Motor-Starter/Motor-Starter/Variable-speed-drive/ROCKWELL-AUTOMATION-POWERFLEX-755-AC-PACKAGED-DRIVE-20G1ANC140AA0NNNNN-2206488/>. Acesso em: 10 out. 2019.

LUBIN, T.; REZZOUG, A. Three-dimensional Analytical Model for Axial-Flux Eddy-Current Couplings and Brakes under Steady-State Conditions. **IEEE Transactions on Magnetics**, v 51, 2015.

LUBIN, T.; MEZANI, S.; REZZOUG, A. Experimental and Theoretical Analysis of Axial Magnetic Coupling under Steady-State and Transient Operation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, 2014.

LUGLI, A. B.; ARAÚJO, F. M.; FLORIANO, G. H. F.; SILVA, J. P.; HENRIQUES, J. P.; VOLPATO, R. M.; MASSELI, Y. M. C. **Controle Vetorial e Escalar para Motores De Indução Trifásicos**. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/59740173/control-e-vetorial-e-escalar-para-motores-de-inducao-trifasicos>. Acesso em: 10 out. 2019.

MARQUES, L. E. V. P. **Estudo sobre Inversores de Frequência e Elaboração de Guias Experimentais para Acionamento de Motor de Indução**. 2014. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

NARDI, C. **Inversor PWM Trifásico para Sistemas de Backup de Energia**. 2013. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

MATSUMOTO, T. R. **Estudo e Caracterização das Perdas em Acoplamentos Magnéticos devido à Presença de Barreiras com Alta Condutividade Elétrica**. 2015. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MAGNADRIVE. **Acoplamentos e Variadores de Velocidade de Magnetos Permanentes**. Woodinville, EUA: 2015.

MAGNADRIVE. **MagnaDrive Corporation**. Disponível em: <http://www.magnadrive.com/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

MAGNADRIVE. **Energy Savings**. Disponível em: <http://www.magnadrive.com/benefits/energy-savings/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

MAGNETIC TECHNOLOGIES. **Magnetic Couplings**. Disponível em: <https://www.magnetictech.com/magnetic-couplings> 5. Acesso em: 10 nov. 2019.

MOHAN, Ned; UNDELAND, TORE M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1995.802 p.

PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY. **Technology Demonstration of Magnetically-Coupled Adjustable Speed Drive Systems**. Richland: 2002.

PAYBACK. **The World's Most Reliable Electromagnetic Variable Speed Drives, 2006**. Disponível em: <http://www.payback.biz/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

QUEIROZ, F. C. H. **Controle Vetorial de Velocidade de um Motor de Indução Trifásico com Estimação Neural de Fluxo**. 2008. 71 f. Tese de Mestrado (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ROCKWELL AUTOMATION. **Inversores PowerFlex Série 750**: Manual de referência. São Paulo: 2013.

ROCKWELL AUTOMATION. **PowerFlex 755 AC Drives**. Disponível em: <https://ab.rockwellautomation.com/Drives/PowerFlex-755>. Acesso em: 5 nov. 2019.

SENAI. **Filosofia de Controle Vetorial**. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/conversores-de-frequencia-filosofia-de-controle-vetorial/4717424/>. Acesso em: 10 ago. 2019.

SOLBAKKEN, Y. **Vector Control for Dummies, 2017**. Disponível em: <https://www.switchcraft.org/learning/2016/12/16/vector-control-for-dummies>. Acesso em: 6 ago. 2019.

THE SKYCRAPER CENTER. **1201 Third Avenue Tower**. Disponível em: <http://www.skyscrapercenter.com/building/1201-third-avenue-tower/1045>. Acesso em: 10 nov. 2019.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul: 2016.

WEG. **INVERSOR CFW700A03P6T4DB20**. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt>. Acesso em: 10 nov. 2019.

YOUSEF, A. Y.; ABDELMAKSoud, S. M. **Review on Field Oriented Control of Induction Motor**. Disponível em : https://www.researchgate.net/publication/282859207_Review_on_Field_Oriented_Control_of_Induction_Motor. Acesso em: 10 out. 2019.

PINTO, L. A. W. **O que é e como instalar um inversor de energia solar?** Disponível em: <http://hccengenharia.com.br/inversor-de-energia-solar/>. Acesso em: 10 out. 2019.