



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

VITOR FERNANDO MACHADO LINS

**APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA COMO UMA
ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE ELEVAÇÃO DE CARGA DO
TIPO PONTES ROLANTES**

Campina Grande, Paraíba
11 de Julho de 2019

VITOR FERNANDO MACHADO LINS

APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA COMO UMA
ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE ELEVAÇÃO DE CARGA DO
TIPO PONTES ROLANTES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de 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: Acionamento de Máquinas Elétricas e Eletrônica Industrial

Orientador:

Professor Luis Reyes Rosales Montero, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
11 de Julho de 2019

VITOR FERNANDO MACHADO LINS

APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA COMO UMA
ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE ELEVAÇÃO DE CARGA DO
TIPO PONTES ROLANTES

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de 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: Acionamento de Máquinas Elétricas e Eletrônica Industrial

Aprovado em 11 / 07 / 2019

Prof. Luis Reyes Rosales Montero, D.Sc, UFCG
Orientador

Roberto Silva de Siqueira
Avaliador

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial aos meus pais, Fernando e Alcione Lins, que sempre me deram o apoio necessário para chegar até aqui, sem medir qualquer esforço para me ajudar nos momentos que mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e a força que me deu para atravessar momentos difíceis e a calma para seguir em frente diante as adversidades.

Agradeço aos meus pais, Fernando Machado Lins e Alcione Lins por estarem sempre ao meu lado, me dando o apoio que precisava e sabendo me encorajar para que eu me dedicasse a este momento. Sou grato também à minha irmã, Larissa Lins, que sempre foi para mim como uma segunda mãe, com todo o seu zelo e cuidado. Agradeço também aos meus familiares por fazerem parte da minha vida. Sendo amigos para todas a horas e que sempre torceram por mim. Agradeço a minha namorada, Laryssa de Araujo, por ser meu suporte, minha amiga e companheira ao longo desse tempo.

Agradeço ao Professor Luís Reyes Rosales Montero por sua paciência e confiança a mim entregue. Agradeço também a todos os meus companheiros de estágio na Usina Trapiche, local onde pude aprender bastante e me desenvolver como engenheiro.

Agradeço a todos os meus colegas de turma, por inúmeras noites de estudo, aos meus amigos pessoais, aos amigos que tive a honra de estar próximo. À coordenação do curso, Adail Paz, Tchai Oliveira e Mário Filho por todo o carinho e auxílio, e à Universidade Federal de Campina Grande, juntamente com a cidade de Campina Grande, por terem sido meu lar por anos de minha vida.

RESUMO

Neste trabalho aborda-se um estudo sobre a utilização de Inversores de Frequência em sistemas de carregamento de carga, como Pontes Rolantes e guindastes. Nele será abordado a história da utilização de motores elétricos em sistemas de elevação de carga, seis tipos e formas de acionamento, bem como a evolução da eletrônica de potência pôde gerar uma atualização nesses sistemas de transporte. Também será descrito a utilização de motores elétricos para o caso específico em pontes rolantes, em que se faz necessário um torque de partida elevado para movimentação da carga, e como o banco de resistores era o método mais utilizado para tal controle. Apresenta-se ainda, um breve estudo de parametrização de inversores de frequência com motores de indução, em que é imprescindível o torque sobre a carga.

Palavras-chave: Inversor de Frequência, Máquina assíncrona, Rotor Bobinado, Rotor Gaiola de Esquilo, Banco de Resistores. Ponte Rolante, Elevação de Carga.

ABSTRACT

In this paper a study about the replacement of wound-rotor motor for squirrel-cage rotor, operating through electronic motor drives such as variable-frequency drive and soft-starter for application in overhead crane is approached. It also outlines the basic concepts about the operation of power electronics equipment, in a way to explain its use for torque, starting current and speed control. It will also describe the use of electric machines for overhead crane, where it is necessary a high starting torque for moving the load, and how resistive load banks were widely used, along with wound-rotor motor, to reach a reasonable torque control. Also, a brief historic evolution about the usage of electric machines for industrial purposes is shown, more specifically in cases where it is necessary a good speed and torque control over the load, showing how the electronic advance can increase the efficiency, lower the costs maintenance-related, and operate with a refined and precise control over the load. It also shows a brief study about VFD parameters with induction motors, where it is necessary the speed or torque control over the load.

Keywords: Variable-Frequency Drive, Soft-Starter, Asynchronous Machines, Wound-Rotor Motor, Squirrel-Rotor Motor, Resistive Load Bank, Overhead Crane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - UNIVERSO TECNOLÓGICO EM MOTORES ELÉTRICOS [2].	17
FIGURA 2 - (A) ROTOR BOBINADO PARA MOTOR DE INDUÇÃO; (B) ROTOR GAIOLA DE ESQUILO. [6]	18
FIGURA 3 - MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO GAIOLA DE ESQUILO.[5].	20
FIGURA 4 - MOTOR ASSÍNCRONO DE ROTOR DE ANÉIS. [2]	21
FIGURA 5 - ESQUEMA ELÉTRICO DE ACIONAMENTO DE UM MITRB.[13]	22
FIGURA 6 - CURVA TÍPICA DE CONJUGADO <i>VERSUS</i> VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO OPERANDO COM TENSÃO E FREQUÊNCIA CONSTANTES [1].	23
FIGURA 7 - CIRCUITOS EQUIVALENTES DO MOTOR DE INDUÇÃO, SIMPLIFICADOS PELO TEOREMA DE THÉVENIN.[1]	24
FIGURA 8 - CURVAS DE CONJUGADO <i>VERSUS</i> ESCORREGAMENTO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO SOBRE EFEITO DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CIRCUITO DO ROTOR [1].	24
FIGURA 9 - CURVAS CONJUGADO X VELOCIDADE, DAS DIFERENTES CATEGORIAS [6].	26
FIGURA 10 - COMPONENTES DE UMA PONTE ROLANTE. [14]	28
FIGURA 11 - PONTE ROLANTE UNIVIGA DA ABUS. <i>FONTE: CATÁLOGO UNIVIGA.</i>	29
FIGURA 12 - PONTE ROLANTE BIVIGA SUSPensa. <i>FONTE: CATÁLOGO PONTE ROLANTE BIVIGA DUREN</i>	30
FIGURA 13 - SINAIS DE REFERÊNCIA(VERMELHO) E DA PORTADORA(AZUL). SINAL PWM(ROSA).	32
FIGURA 14 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA.[2]	32
FIGURA 15 - CIRCUITO RETIFICADOR TRIFÁSICO SEMI-CONTROLADO [8]	33
FIGURA 16 - CIRCUITO RETIFICADOR TRIFÁSICO NÃO-CONTROLADO.[8]	33
FIGURA 17 - (A) TENSÃO TRIFÁSICA DA REDE NA ENTRADA DO INVERSOR (B) TENSÃO RETIFICADA NA SAÍDA DO INVERSOR [18]	34
FIGURA 18 - ESQUEMÁTICO DE UM ESTATOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.[2]	36
FIGURA 19 - GRÁFICO CORRENTE/TENSÃO X FREQUÊNCIA. [2]	38
FIGURA 20 - PONTE ROLANTE CASA DE CANA COBERTA.	42
FIGURA 21 - BANCO DE RESISTORES PARA ACIONAMENTO DE MOTORES.	43
FIGURA 22 - MOTOR DE ROTOR BOBINADO DA TALHA ELÉTRICA.	44
FIGURA 23 - MOTOR DE ROTOR BOBINADO DA MOVIMENTAÇÃO LONGITUDINAL.	45
FIGURA 24 - ANTIGO CÚBICULO DE CONTROLE DOS MOTORES.	45
FIGURA 25 - NOVO QUADRO ELÉTRICO PARA A PONTE ROLANTE.	48
FIGURA 26 - SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO LONGITUDINAL DE PONTE ROLANTE.	50
FIGURA 27 - SISTEMA DE IÇAMENTO DE CARGA DA TALHA ELÉTRICA.	50
FIGURA 28 - SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DO CARRO.	51
FIGURA 29 - SAPATAS SUBSTITUIDAS DA PONTE ROLANTE.	52
FIGURA 30 - PONTE ROLANTE EM FUNCIONAMENTO PLENO NA USINA TRAPICHE.	53
FIGURA 31 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG CFW-11.[14]	56
FIGURA 32 - BLOCODIAGRAMA DO CFW-11.[14].	56
FIGURA 33 - CONEXÕES DE POTÊNCIA E ATERRAMENTO. [14]	57
FIGURA 34 - CONEXÕES DE POTÊNCIA E ATERRAMENTO. MECÂNICA F E G.[14]	58
FIGURA 35 - MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL DE CARGA. [13]	59
FIGURA 36 - MOVIMENTAÇÃO VERTICAL DE CARGA.[14]	59
FIGURA 37 - SISTEMA SUPERVISÓRIO WLP.	62
FIGURA 38 - ASSISTENTE DE CONFIGURAÇÃO WLP.	63
FIGURA 39 - CONFIGURAÇÃO DE RAMPA DE ACELERAÇÃO/DESACELERAÇÃO WLP.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

kW - Kilowatt

MIT – Motor de Indução Trifásico.

MITRB – Motor de Indução Trifásico de Rotor Bobinado.

MITGE – Motor de Indução Trifásico de rotor Gaiola de Esquilo.

WLP – WEG Ladder Program.

cv – Cavalo Vapor

I – Corrente Elétrica

f – Frequência

rpm – Rotações por Minuto

s – Escorregamento

Hz – Hertz

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

V – Volts

CPU – Unidade Central de Processamento

IHM – Interface Homem Máquina

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

PWM – Pulse Width Modulation

I_s – Corrente no Estator

I_r – Corrente no motor

I_m – Corrente de Magnetização.

CLP – Controlador Lógico Programável

I_n – Corrente Nominal

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Ilustrações	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
Sumário	x
1 Introdução	12
1.1 Objetivos	13
1.2 Motivação	14
1.3 Organização textual	14
2 Capítulo 1 - Revisão Bibliográfica	16
2.1 Motores Elétricos	16
2.1.1 Tipos de Motores	16
2.1.2 O Motor Elétrico de Indução	18
2.1.3 Relação Torque X Velocidade	22
2.1.4 Categorias de Motores	25
2.2 Pontes Rolantes	27
2.2.1 Tipos de ponte rolante	29
2.3 Inversores de Frequência	31
2.3.1 Diagrama de Blocos e Funcionamento	32
2.3.2 Algoritmos de controle dos inversores de frequência	35
2.3.3 Controle Escalar	35
2.3.4 Controle Vetorial	38
3 Capítulo 2 – Material e Métodos	41
3.1 Ponte Rolante da Usina Trapiche	42
3.1.1 O projeto	46
3.1.2 A instalação	49
3.1.3 Testes	51
3.2 Resultados	53
3.3 Inversores de Frequência para elevação de carga	54
3.3.1 O Inversor WEG CFW-11	55
3.3.2 Sistemas de acionamento com capacidade regenerativa	57
3.4 Movimentação de Carga	59

3.5	Parametrização de Inversor.....	60
3.5.1	Resistor de frenagem	60
3.5.2	WEG Ladder Programmer	62
4	Conclusão.....	64
1	Bibliografia	66

1 INTRODUÇÃO

Desde o seu advento, motores elétricos têm sido de fundamental importância em processos industriais, utilizando sua capacidade de conversão de energia elétrica em energia motriz de forma mais eficiente, de modo a substituir gradativamente o uso de turbinas a vapor e outros demais métodos, para tal efeito. Nesse contexto, motores de indução trifásicos têm sido amplamente utilizados devido a sua robustez e menor custo perante os motores síncronos. As máquinas de indução são robustas construtivamente, apresentando elevado rendimento e custo inicial baixo.

Durante muitas décadas, motores de indução com rotor bobinado foram o tipo de motor mais utilizado para elevação de cargas, devido a sua característica de controle de torque de partida, facilitando a quebra da inércia da carga. O controle do torque é efetuado através da adição de resistores conectados ao rotor, deslocando assim a curva de torque característica do motor. Este acionamento se mostrava uma forma bastante limitada de tecnologia, entregando um controle pouco sensível, de baixa eficiência, e com a necessidade de manutenção frequente nos componentes empregados. Os motores de rotor bobinado, também chamado de motor de anéis, possui a mesma característica construtiva de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo, mas o seu rotor é bobinado com um enrolamento trifásico, acessível através de anéis com escovas coletoras no eixo.

Com a chegada de novos dispositivos semicondutores, equipamentos eletrônicos foram sendo estudados e desenvolvidos no mercado, como novos métodos de acionamento de máquinas elétricas. Equipamentos como os Inversores Estáticos de Frequência foram apresentados como um sistema mais moderno para aplicações precisas, utilizando formas mais eficientes de controle. Esses novos sistemas vieram a aumentar consideravelmente a eficiência e estão gradativamente substituindo sistemas de acionamento menos robustos na indústria. O acionamento de motores elétricos por inversores de frequência é uma solução relativamente nova, porém sua utilização na indústria nacional vem crescendo exponencialmente. Assim sendo, muitas industriais estão em processo de modernização e aos poucos, o uso de instrumentos eletrônicos para acionamento de motores vem sobrepondo-se ao sistema de partida anterior a ele.

Neste contexto, esse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem por finalidade estudar a aplicação de inversores de frequência em equipamentos de sistemas de elevação e transporte de cargas, tais como Pontes Rolantes e Guindastes. Ponte rolante é uma máquina de elevação do tipo guindaste a qual é utilizada na indústria para movimentação de grandes cargas. Pontes rolantes convencionais utilizam motor de indução de anéis, conectando o rotor a banco de resistores externos chaveados por contactores, sistema que apresenta inúmeras desvantagens operacionais. Atualmente, esses sistemas são substituídos por inversores de frequência controlando motores gaiola de esquilo.

O foco desse estudo está na apresentação de um estudo de substituição de um sistema de acionamento obsoleto por um sistema moderno, mostrando as vantagens obtidas no investimento na substituição do sistema. Pretende-se com este estudo uma melhora, principalmente na diminuição de gastos com a manutenção do sistema, com controle da carga e diminuição do consumo de energia.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo sobre a utilização de inversores de frequência para acionamento de cargas de elevação com guindaste e pontes rolantes, comparando o uso de inversores e motor gaiola de esquilo com o motor de indução rotor bobinado com resistência externa.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar um embasamento teórico englobando temas como acionamentos elétricos obsoletos do motor de indução rotor bobinado em pontes rolantes de movimentação de cargas.
- Discutir a parametrização de inversor WEG CFW-09 para casos de elevação de cargas, bem como o método de controle necessário para tal finalidade.
- Apresentar uma visão global sobre os benefícios vindouros do uso de tais métodos de acionamento de máquinas elétricas em pontes rolantes.
- Discutir as limitações na implementação.

1.2 MOTIVAÇÃO

Sistemas de elevação de cargas do tipo ponte rolante são amplamente utilizados na indústria, sendo de extrema importância para o processo. Com o auxílio deles, a movimentação e transporte de instrumentos e produtos faz-se possível sem a necessidade de grande esforço humano, aumentando grandemente a produtividade industrial. A função específica do equipamento é o içamento de cargas, sendo a capacidade de carga definida de acordo com a necessidade da área industrial. Como um efeito de sua importância vem a necessidade manter o sistema sempre em funcionamento e gerando menos custos e paradas para manutenção.

Acionamentos elétricos convencionais, com o uso de contactores de potência, são bastante limitados para a finalidade de movimentação e acionamento de cargas. Apresentam pouco ou nenhum controle sobre a velocidade da movimentação, bem como depara-se com bastante problemas devido ao regime de operação rígido. Tal regime causa grande desgaste nos contatos fixos e móveis do contactor, sendo necessário uma manutenção e troca periódica dos mesmos.

A ideia para esse trabalho surgiu durante o meu estágio na empresa Usina Trapiche S/A. Durante meu estágio eu aprofundi os conhecimentos sobre a orientação do Professor Luis Reyes Rosales Montero em uma área de grande interesse industrial, voltada para o acionamento de máquinas elétricas.

1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

O desenvolvimento deste trabalho está estruturado em dois grandes capítulos, onde abrangem os principais elementos necessários para o projeto.

No Capítulo 1 será apresentado uma revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados no projeto: Máquinas Elétricas (com ênfase em MIT), inversores de frequência e, por último, sistemas de elevação de cargas. A ideia deste capítulo é reforçar os conhecimentos nas áreas mencionadas de forma a garantir um entendimento do projeto.

No Capítulo 2, denominado Materiais e Métodos, será apresentado um estudo de caso de um projeto aplicado na empresa Usina Trapiche, comentando detalhes e materiais utilizados. Será apresentado posteriormente ideias de utilização de inversores de

frequência como acionamento de elevação de cargas, mais precisamente pontes rolantes, onde será discutido a importância da atualização, parâmetros e métodos necessários.

2 CAPÍTULO 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES ELÉTRICOS

Um motor elétrico é um componente eletromecânico de conversão de energia elétrica em mecânica, de forma bidirecional, através das alterações de fluxo concatenado decorrentes do movimento mecânico do seu eixo. A conversão de energia ocorrentes no motor elétrico é dada através da presença de enrolamentos de campo e enrolamento de armadura e sua aplicação é nas mais variadas áreas, sendo elas industriais ou não.

O ano de 1866 pode ser considerado, em termos práticos, como o ano de nascimento da máquina elétrica, pois foi nesta data que o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto induzido. Entretanto, deve-se mencionar que esta máquina elétrica, que revolucionou o mundo em poucos anos, foi o último estágio de um processo de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas, durante quase três séculos [2].

Mesmo após o invento das máquinas elétricas, o seu processo de aperfeiçoamento nunca cessou. Desde então, diversos outros tipos de máquinas foram surgindo e hoje as máquinas elétricas rotativas assumem diversas formas e são conhecidas por diversos nomes, como: CC, síncronas, de ímã permanente, de indução, de relutância variável, de histerese, sem escovas e assim por diante. Embora apresentando diferenças, todas essas máquinas atuam de forma similar.

Neste tópico será abordado uma revisão bibliográfica sobre máquinas elétricas rotativas, com uma maior ênfase em máquinas de indução trifásicas, motores esses que são os mais utilizados nos dias atuais, apresentando menores custos e maior facilidade de aplicação. Além disso, motores de indução trifásicos (MIT) serão peças fundamentais para a aplicação do projeto a ser mencionado no capítulo 2 deste trabalho.

2.1.1 TIPOS DE MOTORES

Embora possamos utilizar o termo motor elétrico para se referir a todos os equipamentos relacionados a área, há uma subdivisão que relaciona os tipos de motores

elétricos com a suas características construtivas. A fabricante brasileira WEG nos apresenta o universo tecnológico dos motores conforme a Figura 1.

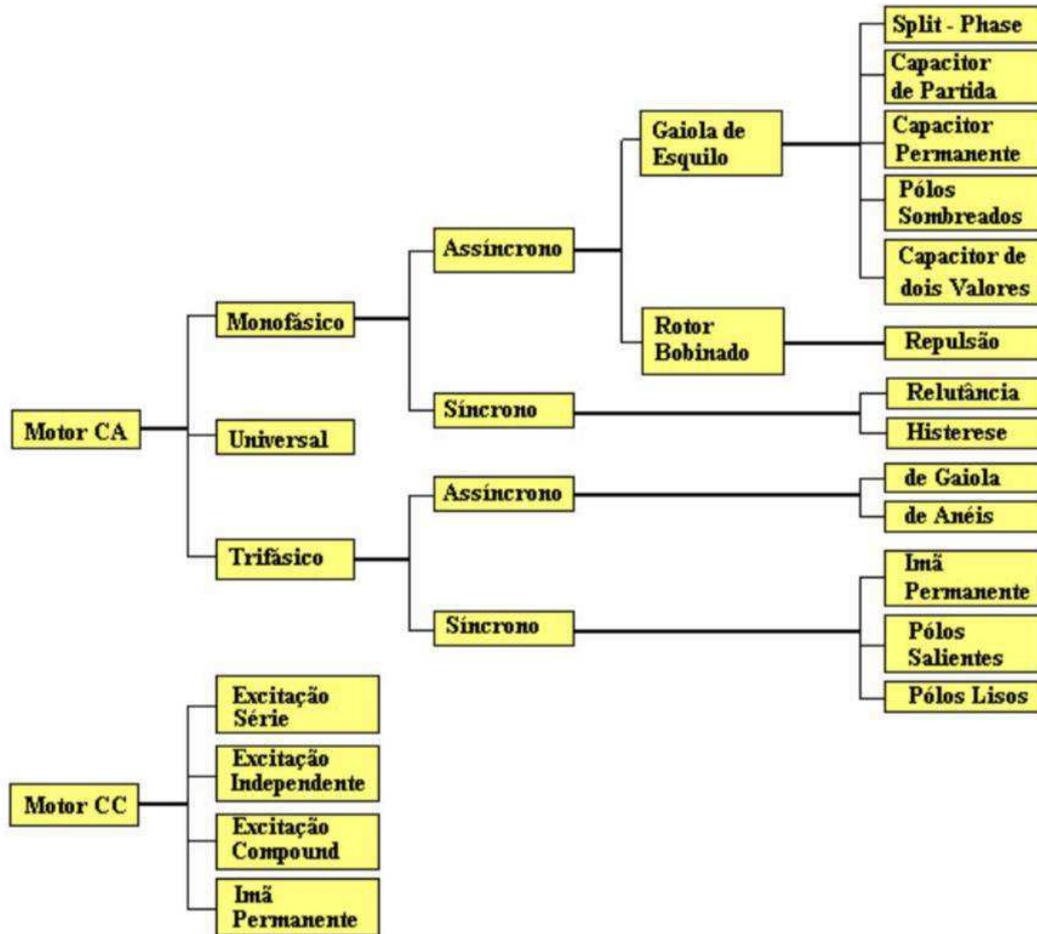


Figura 1 - Universo tecnológico em Motores Elétricos [2].

Os motores mais utilizados no mercado são os de corrente alternada, haja vista que a distribuição de energia elétrica é feita normalmente por meio de corrente alternada. Os principais tipos de motores CA são: Motores síncronos e motores de indução.

Devido ao seu alto custo para motores menores, os motores síncronos são utilizados apenas para aplicações de grandes potências e específicas, sempre funcionando com velocidade fixa. Já motores de indução são máquinas com excitação induzida por ação da indução a partir dos enrolamentos do estator, sendo máquinas robustas e de baixo custo, principalmente quando falamos de motores com rotor gaiola de esquilo ou Bobinado.

2.1.2 O MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO

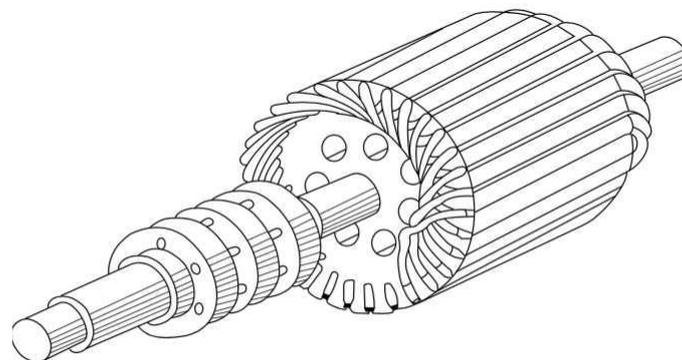
Também chamado de motor assíncrono, o motor de indução é utilizado em mais de 90% dos acionamentos industriais [2]. Estes motores apresentam vantagens como menor custo de aquisição, bom rendimento, baixo custo de manutenção (em especial os motores com rotor do tipo gaiola de esquilo), entre outros. Ele possui apenas o seu estator ligado à rede elétrica, e seu rotor não possui nenhum tipo de alimentação e as correntes que nele circulam são oriundas da indução eletromagnética do estator, por isso o nome de motor de indução.

Sua velocidade é praticamente constante, sofrendo variação conforme a carga mecânica aplicada no seu eixo. Atualmente, com o auxílio de inversores de frequência, tema a ser mencionado ainda nesse trabalho, é possível controlar a velocidade de rotação dos MIT, fazendo o controle da frequência e tensão de sua alimentação.

Os motores assíncronos podem ser divididos em:

- Motor de Rotor Bobinado;
- Motor Rotor Gaiola de Esquilo.

A diferença estrutural dos tipos de rotores pode ser vista na Figura 2.



(a)

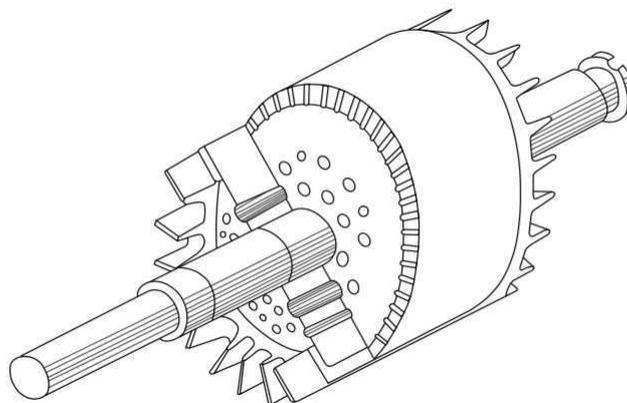


Figura 2 - (a) Rotor bobinado para motor de indução; (b) rotor Gaiola de Esquilo. [6]

Os MIT possuem construção simplificada, onde se destacam duas partes principais: o estator e o rotor. Sendo o estator a parte fixa do motor, composto por chapas ferromagnéticas empilhadas e soladas eletricamente entre si. As bobinas ou enrolamentos, são ligadas no estator, e recebem a tensão trifásica da rede elétrica, produzindo um campo magnético girante com velocidade dependente da frequência da rede e do número de par de polos do MIT, denominada velocidade síncrona, conforme indicado pela equação (1)

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Onde:

n_1 é a velocidade síncrona [rpm];

f_1 é a frequência da tensão estórica [Hz];

p é o número de par de polos.

Outra parte importante é o rotor, que possui um núcleo ferromagnético onde se localiza um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos. O rotor fica inerso no campo girante produzido pelas correntes que circulam nas bobinas do estator e seus condutores paralelos são cortados pelas linhas de força desse campo. Essa interação induz uma diferença de potencial e conseqüentemente uma corrente induzida que produz um torque eletromagnético que faz com que o rotor gire [4].

Uma característica inerente aos MIT é a presença de uma diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, chamada de escorregamento.

Quanto maior a carga a ser acionada pelo motor, maior terá que ser o seu conjugado, para isso a diferença de velocidade entre o campo girante e o rotor terá que ser maior para que as correntes induzidas e o campo magnético produzido sejam maiores. Na proporção que a carga aumenta, temos a diminuição da rotação do motor. [4] A equação (2) apresenta o cálculo do escorregamento em porcentagem.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

s é o escorregamento;

n_1 é a velocidade síncrona[rpm];

n é a velocidade do rotor[rpm].

Motor trifásico assíncrono de rotor gaiola de esquilo

Um motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo se caracteriza por ter um enrolamento primário fixo (estator), semelhante ao de um motor síncrono, e por um enrolamento secundário girante (rotor), constituído por barras de material condutor (cobre ou alumínio) curto circuitadas nos dois extremos mediante aros expressos.[5].

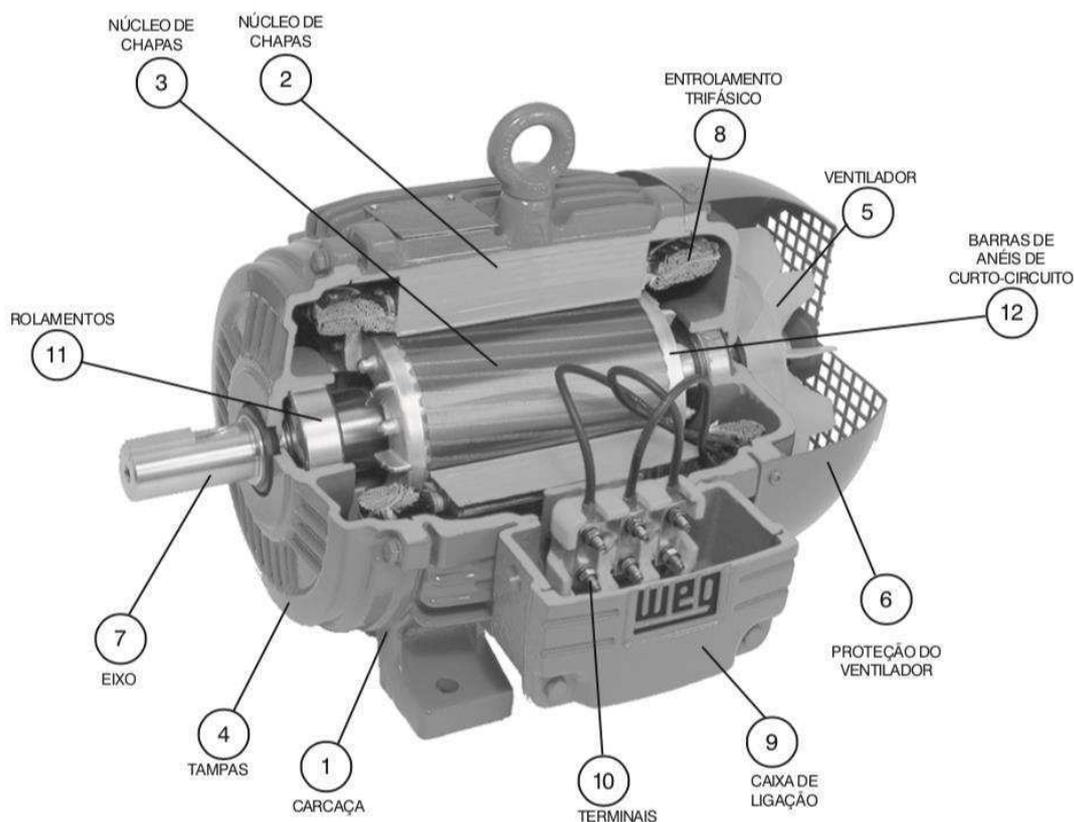


Figura 3 - Motor de indução trifásico gaiola de esquilo.[5]

A estrutura do motor de indução é dividida da seguinte maneira:

- **Estator:** Carcaça (1), Núcleo de Chapas (2), Enrolamento Trifásico (8);
- **Rotor:** Eixo (7), Núcleo de chapas (3), barras e anéis de curto circuito (12);
- **Outras partes:** Tampas (4), Ventilador (5), Proteção do ventilador (6), Caixa de ligação (9), Terminais (10), Rolamentos (11).

Cada uma das partes é um elemento de um sistema que têm suas funções definidas da seguinte maneira:

- **Circuito magnético estático:** Possui uma construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas para a refrigeração;
- **Estator:** Chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si;

- **Carcaça:** Suporte do conjunto;
- **Bobinas:** Localizadas em cavas abertas no estator e alimentadas pela rede;
- **Rotor:** Formado por um núcleo ferromagnético, também laminado, sobre o qual se encontra um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos, nos quais são induzidas correntes provocadas pela corrente alternada das bobinas do estator.

Motor trifásico assíncrono de rotor bobinado

Motor composto de um rotor de ferro laminado, com ranhuras onde se alojam condutores de cobre isolados entre si formando um enrolamento trifásico semelhante ao do estator. Seus terminais encontram-se ligados a um coletor de anéis que contacta com a parte estática através de um conjunto de escovas de carvão grafito[6]. Em outras palavras, o motor de indução trifásico de rotor bobinado (MITRB) possui as mesmas características construtivas de um motor de indução trifásico gaiola de esquilo(MITGE) em relação ao seu estator. A diferença entre ambos está apresentada no rotor, cujo enrolamentos são acessíveis através de anéis com escovas coletoras no eixo.

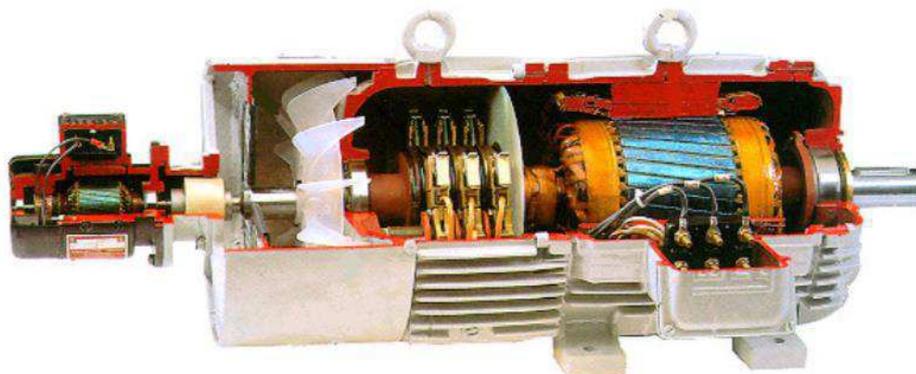


Figura 4 - Motor assíncrono de rotor de anéis. [2]

Um diagrama elétrico simplificado das conexões de acionamento de um MITRB é apresentado na Figura 5.

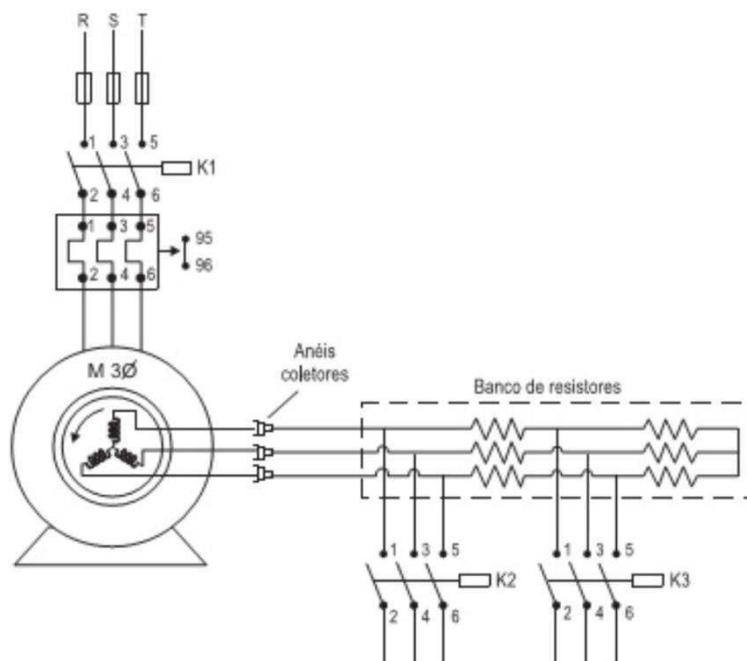


Figura 5 - Esquema elétrico de acionamento de um MITRB.[13]

Esses motores são utilizados nos acionamentos de sistema de elevada inércia, devido a sua característica de ajuste da curva de conjugado x rotação em função do aumento da resistência rotórica, e no caso em que o conjugado resistente em baixa rotações seja alto, comparado ao conjugado nominal.

Os motores de anéis são particularmente empregados em frenagem elétricas, controlando adequadamente a movimentação de cargas verticais em baixas velocidades como por exemplo pontes rolantes. Para isso, usa-se um sistema combinado de frenagem sobressíncrona ou subsíncrona com inversão das fases de alimentação. Esta aplicação para esse tipo de motor é discutida em detalhe neste projeto, pois ela é bastante utilizada na movimentação de cargas por guindastes.

2.1.3 RELAÇÃO TORQUE X VELOCIDADE

O motor de indução tem conjugado igual a zero na velocidade síncrona. À medida que a carga aumenta, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor. A Figura 6 nos mostra a curva conjugado x rotação [2].

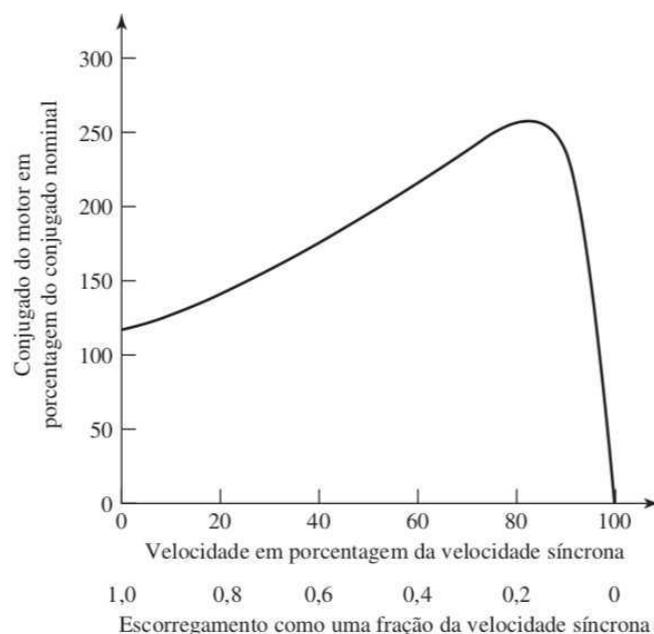


Figura 6 - Curva típica de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução operando com tensão e frequência constantes [1].

Quando um motor rotor gaiola de esquilo é operado em frequência constante ele funciona basicamente como um motor de velocidade constante, o qual apresenta uma queda de velocidade de cerca de 10% ou menos ao passar da condição de vazio para a de plena carga. Para o caso de motores com rotor bobinado, a variação da velocidade é obtida inserindo uma resistência externa no circuito do rotor. A influência do aumento da resistência do motor sobre a curva característica do conjugado *versus* velocidade está mostrada na Figura 8 através das curvas tracejadas. Para esse tipo de motor, variações significativas de velocidade podem ser obtidas quando a resistência do motor é variada. Da mesma forma podemos observar variação do conjugado de partida de um motor de indução de rotor bobinado de acordo com a resistência rotórica aplicada.

Sem a necessidade de um aprofundamento na análise do circuito equivalente de Thevénin de um MIT apresentado na Figura 7, podemos afirmar através da equação 3 e equação 4 que o escorregamento para conjugado máximo é diretamente proporcional à resistência do rotor R_2 , mas que o valor do conjugado máximo não depende de R_2 . Quando o valor da resistência é incrementado através da inserção de resistência externa no rotor, o conjugado eletromecânico máximo não é afetado, mas a velocidade na qual isso ocorre pode ser controlada diretamente. Esse resultado pode ser visto observando que o conjugado eletromecânico, é uma função da razão $\frac{R_2}{s}$. Assim, o conjugado não se altera desde que esta razão permaneça constante.

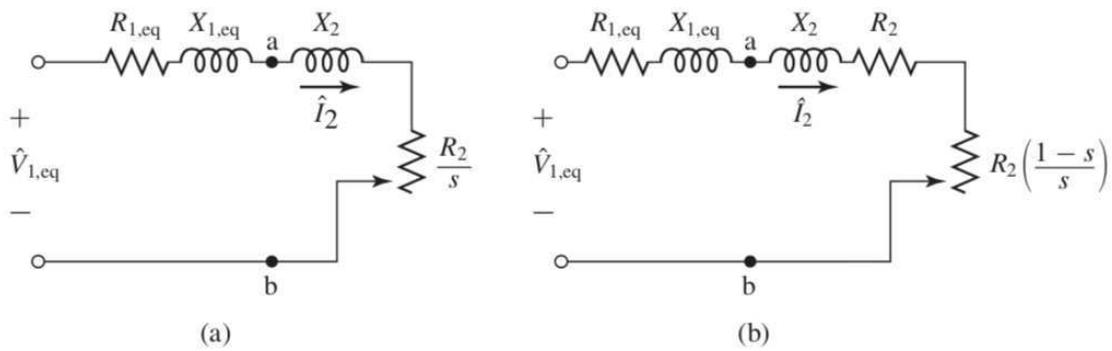


Figura 7 - Circuitos equivalentes do motor de indução, simplificados pelo teorema de Thévenin.[1]

$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} \quad (3)$$

$$T_{max} = \left(\frac{po\text{los}}{2\omega_e}\right) \frac{0,5qV_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} \quad (4)$$

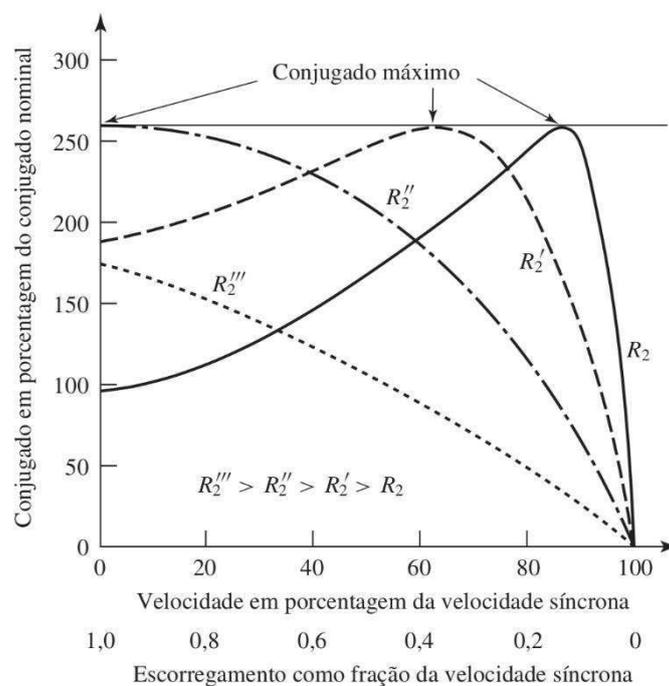


Figura 8 - Curvas de conjugado versus escorregamento de um motor de indução sobre efeito de variação da resistência do circuito do rotor [1].

Vemos assim que o escorregamento ao qual o corre o conjugado de pico, é proporcional à resistência do rotor. Para motores de gaiola de esquilo, esse escorregamento de conjugado de pico é relativamente pequeno, tal como é mostrado na Figura 6. No caso de um motor de rotor bobinado, a resistência do motor pode ser aumentada inserindo uma resistência externa, aumentando assim o escorregamento de conjugado de pico e diminuindo, portanto, a velocidade do motor para um valor especificado de conjugado. Como as máquinas de indução de rotor bobinado são maiores e mais caras, requerendo uma manutenção significativamente mais dispendiosa do que as máquinas gaiola de esquilo, na atualidade é raro e obsoleto este método de controle de velocidade ser usado. A tendência das máquinas de indução acionadas com fontes de frequência constante é estarem basicamente limitadas a aplicações de velocidade constante. Nos anos recentes, o uso de sistemas de acionamento de estado sólido, de tensão e frequência variáveis, vem tornando possível controlar com facilidade a velocidade das máquinas de indução de gaiola e, como resultado, são muito usadas hoje em uma larga faixa de aplicações que exigem velocidade variável[1].

A ideia apresentada no livro Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley apresentado no parágrafo acima nos dá a base para o trabalho. A utilização de adição de resistência rotórica para controle de velocidade e conjugado vem sendo substituída por sistemas de acionamento de estado sólido, de tensão e frequência variáveis.

2.1.4 CATEGORIAS DE MOTORES

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, e são as seguintes:

Categoria N

Conjugado de partida normal, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores.

Categoria H

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc.

Categoria D

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; alto escorregamento (mais de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada. As curvas Conjugado X Velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na Figura 9.

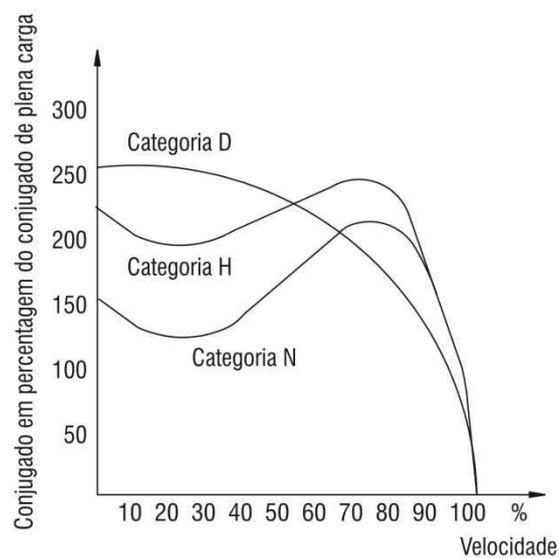


Figura 9 - Curvas Conjugado X velocidade, das diferentes categorias [6].

2.2 PONTES ROLANTES

Em busca da redução de custos e desperdício, empresas, cada vez mais, investem em novas tecnologias. O uso de pontes rolantes contribui enormemente para o setor produtivo, de modo a substituir a mão de obra por um método mecânico, possibilitando que essa mão de obra possa ser utilizada em outros serviços da empresa. Além disso, aumenta a capacidade de estoque devido a possibilidade de exploração de locais restritos, e intensifica a qualidade de trabalho, desde que seja manuseado corretamente. [11]

As pontes rolantes são equipamentos robustos e versáteis que operam com autos ciclos de trabalho. Sua característica principal é a movimentação de materiais em locais onde outros maquinários e o trabalho braçal se tornam limitados. [12]

São aparelhos de elevação de cargas, constituídos de uma ou duas vigas principais, apoiados rigidamente sobre vigas móveis. Sobre as vigas principais se deslocam um ou mais carros, dotados de sistema de elevação.

A norma que rege a construção de pontes rolantes é a ABNT NBR 8400, a qual é muito similar às normas internacionais. Ela é bastante importante para que o projeto tenha segurança e eficiência, quando aplicada corretamente. Além de seguir as normas, é necessário cálculo preciso de estrutura, levando em consideração local de atuação e tipos de carga a ser conduzida.

Diversas literaturas dissertam sobre os ganhos de produtividade que podem ser obtidos com o uso de pontes rolantes e a necessidade de suas devidas especificações, podendo assim citar [10] *Langui (2001)*, onde o tema é debatido de forma clara. Em “*Sistemas de Acionamento para Ponte Rolante; SILVA*” o autor deixa claro que atualmente motores gaiola de esquilo são os utilizados neste tipo de projeto, em virtude da ampliação de uso de inversores de frequência.

A movimentação de carga exigida em pontes rolantes pode ser dividida em dois diferentes movimentos: a movimentação horizontal de carga (movimentação do carro e movimentação longitudinal); movimentação vertical. Ambos os sistemas de movimentação utilizam redutores, freios mecânicos, acoplamento, roda motriz, etc. Nesse trabalho não iremos detalhar as especificações de tais equipamentos pois ele trata de reformas de pontes rolantes em geral, não apenas de um tipo específico. Sendo assim, o dimensionamento de equipamentos é específico para cada equipamento, de acordo com as necessidades e suas características. A NR11 é a norma responsável por reger o

transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais, sendo ela importante para tal dimensionamento.

Pontes rolantes tem os movimentos longitudinal, transversal e vertical motorizados. Dependendo de seu tamanho e potência, possui seus movimentos comandados por um operador em cabine ou por botoeira ao nível do piso. Ponte rolantes antigas possuíam sistema de acionamento por contactores e motor de rotor bobinado. As pontes modernas, apresentam acionamento a inversores de frequência.

O movimento longitudinal é feito por roda sobre trilhos. O transversal é feito por um carro sobre a ponte. O vertical ascendente ou descendente é feito pelo enrolamento ou desenrolamento do cabo de aço ou corrente.

Convencionalmente divide-se pontes rolantes em grupos de funções relacionados a capacidade de carga. O grupo leve engloba as pontes de 3 t à 15 t, o grupo médio, as de 20 t à 50 t e o grupo pesado, às de 50 t a 120 t. Os grupos médios e pesados podem ser equipados com gancho auxiliar no caro, que permite maior versatilidade no levantamento de cargas.

Elas atendem a uma série de finalidades básicas, podendo ser destacada pelo:

- Redução de custos: Custos com mão de obra; custo com materiais.
- Aumento de capacidade produtiva: Aumento de produção; aumento de capacidade de estoque; melhor distribuição de armazenagem.
- Melhores condições de trabalho: Maior segurança; redução de fadiga;
- Distribuição: Melhora na circulação; melhoria dos serviços ao usuário; maior disponibilidade.

A Figura 10 nos mostra os principais componentes de uma ponte rolante.

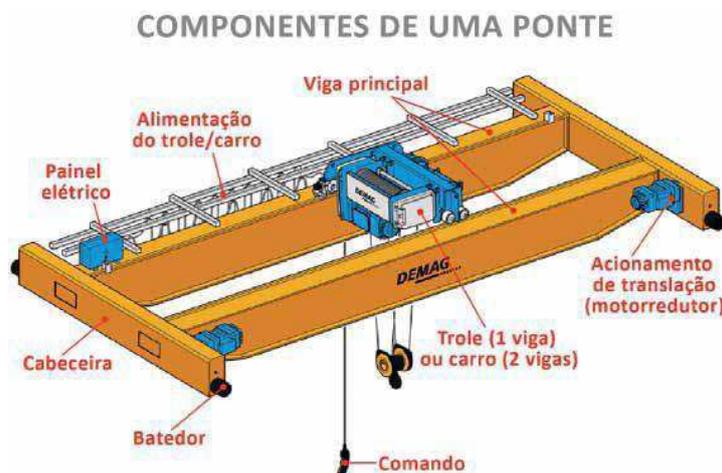


Figura 10 - Componentes de uma Ponte Rolante. [14]

2.2.1 TIPOS DE PONTE ROLANTE

As pontes rolantes podem ser caracterizadas como ponte rolante apoiada e ponte rolante suspensa, sendo distinguidas entre univiga ou biviga. A definição de qual modelo de ponte a se utilizar é determinada pelo projetista.

- **Ponte Rolante Apoiada**

Neste modelo de ponte rolante, a viga principal desloca-se em cima dos trilhos do caminho de rolamento, e os trilhos são sustentados pelas colunas do próprio local. A Figura 11 representa uma ponte rolante univiga apoiada, que permite um melhor aproveitamento da altura, pois a mesma comporta o caminho de rolamento como sendo inferior à altura de elevação da carga. A ponte rolante univiga tem por característica uma única viga na cobertura de seu vão, que por sua vez atua em sentido transversal, limitando assim a capacidade da mesma.



Figura 11 - Ponte Rolante Univiga da Abus. *Fonte: Catálogo Univiga.*

- **Ponte Rolante Suspensa**

A viga principal desta ponte rolante é formada por duas vigas paralelas que cobrem o vão de trabalho. Elas se deslocam por debaixo do caminho de rolamento, o que permite um melhor aproveitamento do local. [12]



Figura 12 - Ponte Rolante biviga suspensa. *Fonte: Catálogo Ponte Rolante Biviga Duren*

Em geral, pontes rolantes implicam em ganho de produtividade e seus custos de implantação geram rápido retorno. Por esse motivo elas tiveram uma excelente adaptação nos mais diversos ramos da indústria. A utilização de pontes inicialmente era tímida e específica, porém passou a ser de grande importância na produção. Dentro desta visão, a atualização de sistemas de acionamento é de fundamental importância para o contínuo ganho na indústria.

2.3 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

O Inversor de Frequência, também chamado de conversor de frequência, é de modo geral, um equipamento capaz de converter uma tensão trifásica na sua entrada em uma tensão contínua, alimentando um barramento CC e posteriormente invertendo essa tensão CC para uma saída CA a qual após passar por este processo, pode ser controlada a sua amplitude e frequência, com uma finalidade de controle de velocidade de motores assíncronos.

Devido ao controle de tensão e como os inversores de frequência são dimensionados principalmente com relação a corrente do motor, podemos afirmar que há um controle da potência consumida pela carga, o que resulta em uma maior economia de energia. Além da corrente do motor a ser alimentado, há outras importantes características a serem levadas em conta para o correto dimensionamento do motor, tais como: tipo e inércia da máquina; tipo de parada; ciclo de trabalho; precisão do controle, entre outras.

- **Inversor de Frequência PWM**

Inversores de frequência que utilizam a modulação PWM são geralmente aplicados para controle de frequência e valor eficaz de tensão de saída. A modulação por largura de pulso (pulse-width modulation) consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência e outro de alta frequência, chamados de modulante e portadora.

Para a obtenção da saída desejada, o sinal de referência de entrada deve possuir a forma de onda similar à forma do sinal de saída, isto é, em sistemas de acionamento de motores elétricos a saída desejada é uma tensão senoidal alternada. O sinal de referência é comparado com o sinal de uma portadora de onda dente-de-serra. Os sinais são assim comparados através de um modulador e o sinal de saída é chamado de sinal modulado, cuja largura de pulso dependerá da amplitude do sinal de referência. Os sinais de referência, da portadora e o modulado são apresentados na Figura 13.

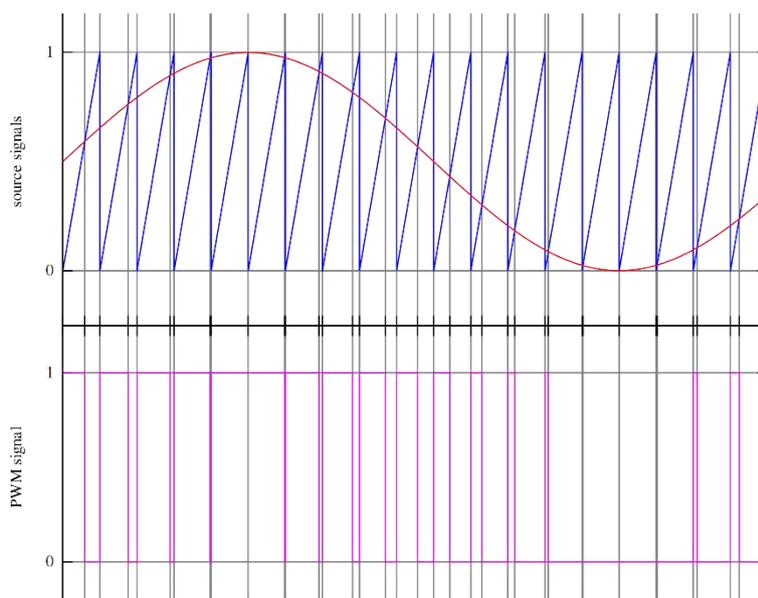


Figura 13 - Sinais de referência(vermelho) e da portadora(Azul). Sinal PWM(Rosa).

2.3.1 DIAGRAMA DE BLOCOS E FUNCIONAMENTO

De modo abrangente nós podemos afirmar que todo tipo de inversor possui três blocos funcionais básicos distintos para o seu funcionamento. Alguns inversores mais avançados podem possuir outros blocos agregados, como filtro de entrada, conversores regenerativos, entre outros. A Figura 14 nos mostra que ao receber a alimentação da rede conectada ao seu retificador e filtro, o equipamento faz a conversão CA-CC, injetando a tensão CC no barramento ao qual alimenta o inversor, que é responsável pela conversão CC-CA, controlando assim a frequência de saída do equipamento.

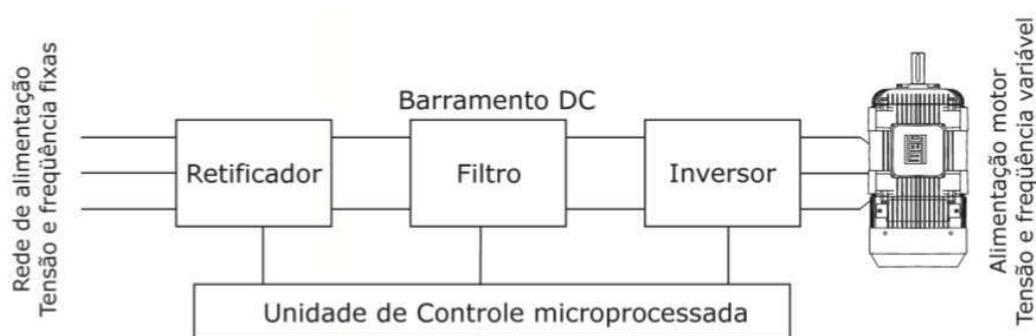


Figura 14 - Diagrama de blocos de um inversor de frequência.[2]

A unidade de controle microprocessada é a responsável por processar e receber todos os parâmetros provenientes da interface homem-máquina(IHM), bem como das entradas analógicas e digitais, as quais servem como referência para controles de

velocidade, por exemplo. Através dessas interfaces é possível se editar parâmetros conforme a necessidade do uso do inversor.

- **Retificador**

O primeiro elemento do inversor de frequência, está conectado diretamente a rede de alimentação elétrica. Geralmente é composto por pontes trifásicas de 6 diodos, podendo também serem pontes retificadoras semi-controladas utilizando 3 diodos e 3 tiristores.

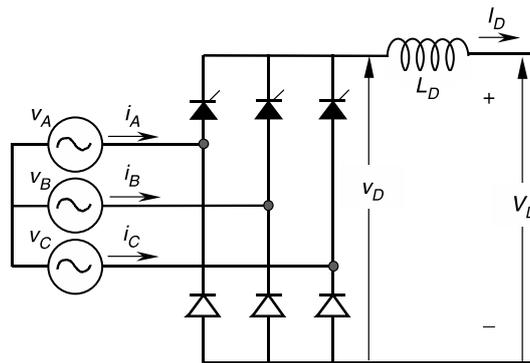


Figura 15 - Circuito retificador trifásico semi-controlado [8]

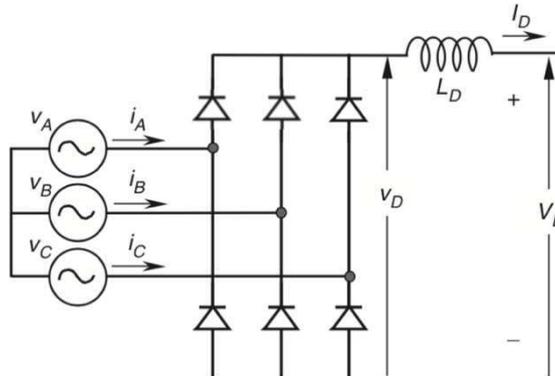


Figura 16 - Circuito retificador trifásico não-controlado.[8]

Circuitos retificadores são responsáveis pela transformação CC-CA da tensão da rede de alimentação. Esta conversão é feita através de pontes de diodos e o *ripple* de saída é geralmente diminuído através do uso de capacitores no link DC.

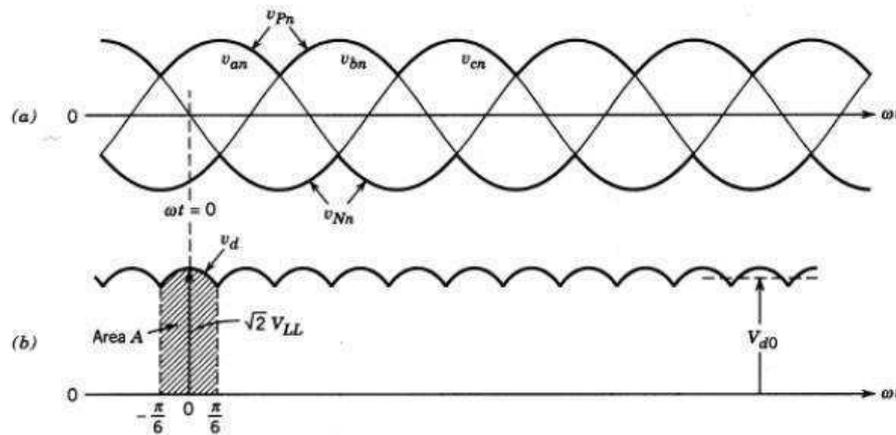


Figura 17 - (a) tensão trifásica da rede na entrada do inversor (b) Tensão retificada na saída do inversor [18]

- **Filtro**

O segundo elemento é uma etapa secundária do inversor de frequência, composto por capacitores que tem a finalidade de reduzir as poucas ondulações da tensão de saída do retificador (*ripple*), proporcionando assim, uma tensão contínua com a menor ondulação possível ao inversor. A tensão DC entregue ao inversor por uma rede trifásica será de:

$$V_{DC} = \sqrt{2} * V_L \quad (5)$$

Onde:

V_{DC} : Tensão no barramento CC;

V_L : Tensão de linha da rede de alimentação.

- **Inversor**

Elemento composto por semicondutores, geralmente transistores do tipo IGBT. É a etapa final do inversor de frequência e tem por finalidade converter a tensão CC proveniente do barramento DC para uma tensão senoidal de frequência controlada. Este processo ocorre por modulação PWM, explicada anteriormente nesta seção. São também utilizados diodos conectados em anti-paralelo com o coletor e o emissor dos IGBT para que, no caso de aplicações para cargas indutivas (como é o caso de motores elétricos), evitem elevadas tensões reversas nos terminais do IGBT.

- **Sistema de controle**

A unidade de controle do Inversor de Frequência pode ser dividida em 4 partes: Controle do inversor, leitura de velocidade do motor, leitura de corrente e interfaces (ajustes de parâmetros, I/O analógicos e digitais).

Ainda pode-se citar algumas outras características comuns presentes em inversores, como o circuito de pré-carga. O circuito de pré-carga nada mais é do que uma proteção contra picos de tensão nos terminais dos capacitores do barramento DC. Funciona de forma a limitar picos de tensão através da adição de resistores no barramento. Esses resistores são retirados posteriormente através do fechamento de uma chave, a qual é controlada pelo módulo de controle. Em resumo, os resistores de pré-carga funcionam apenas por um curto espaço de tempo, e são retirados logo após, toda a carga passa a ser transferida diretamente ao barramento CC. Podemos então afirmar que o circuito de pré-carga funciona como uma proteção extra, tanto para o inversor quanto para o operador, evitando eventuais acidentes causados pela sobrecarga em capacitores.

2.3.2 ALGORITMOS DE CONTROLE DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Dispositivos inversores de frequência utilizam diferentes métodos para controle de performance de motores elétricos. Estes algoritmos possuem características próprias e resultam em diferentes exatidões em suas aplicações. Estaremos aqui comentando sobre os controles escalar e vetorial, de forma a aumentar a compreensão da atuação desses métodos.

2.3.3 CONTROLE ESCALAR

O funcionamento de inversores de frequência com controle escalar está baseado numa estratégia de comando chamada “V/f constante”, que mantém o torque constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento do motor. Ao manter a relação V/f constante, inversores conseguem manter, até um certo ponto, o fluxo de magnetização constante.

$$T = k_1 \cdot \phi_m \cdot I_2 \quad (6)$$

$$\phi_m = k_2 \cdot \frac{V}{f} \quad (7)$$

Onde:

T: Torque na ponta do eixo (T.m);

ϕ_m : Fluxo de magnetização(Wb);

I_2 : Corrente rotórica do motor(A);

V_1 : Tensão estatórica(V);

k_1 e k_2 : Constante a depender do material utilizado no projeto da máquina.

Podemos através das formulas 3 e 5 observar que ao variar V/f de forma constante, mantemos assim o fluxo de magnetização estável. Ao mantermos o fluxo constante, mantemos assim o torque constante, de forma teórica.

Este controle é aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade; a tensão aumenta até o valor da tensão nominal do motor, e depois só a frequência segue aumentando. São geralmente utilizados em sistemas cuja exigência se restringe ao controle de velocidade do motor, sem controle de torque desenvolvido e sem conhecimento da dinâmica do processo sob controle. São sistemas que imprimem um certo erro de velocidade que, dada a aplicação, pode ser facilmente desconsiderado pelo sistema controlado.[17]

O estator do motor de indução possui um bobinado trifásico como mostrado na Figura 18. Este bobinado tem dois parâmetros que definem suas características. Um deles é a sua resistência ôhmica R(Ohm) e o outro a sua indutância (Henry).

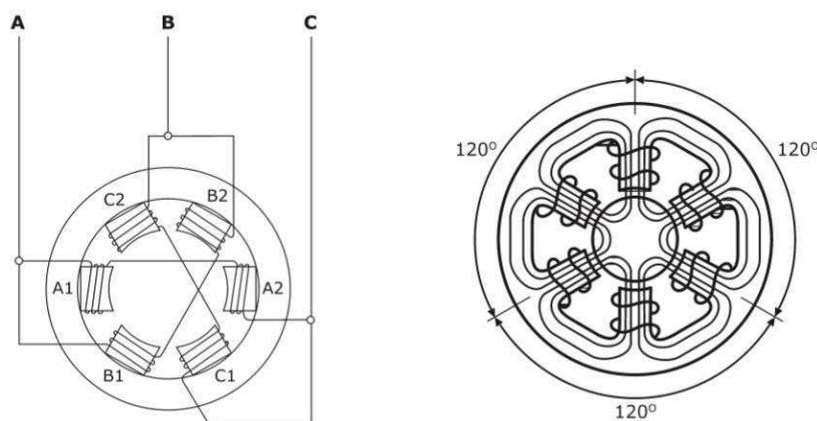


Figura 18 - Esquemático de um estator de um motor de indução trifásico.[2]

Sabemos que a corrente é dada por:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (8)$$

E que

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (9)$$

Então:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (10)$$

Relembrando que:

$$X_L = 2\pi Lf \quad (11)$$

Se compararmos o valor da resistência estatórica com o valor da reatância indutiva, dada na equação 11, percebe-se que para valores de frequência acima de 30 Hz, o valor da resistência se torna irrelevante, podendo ser desprezado. Assim, a corrente estatórica, é dada pela razão entre a tensão de alimentação e a reatância, que por sua vez depende da indutância L e da frequência f .

Para valores abaixo de 30 Hz, a resistência R não é mais tão insignificante quando comparado ao da reatância indutiva X_L , logo aquela não é mais desprezada no cálculo de corrente circulante no estator da MIT. Para manter a proporcionalidade entre a tensão e a frequência, a corrente do motor diminui consideravelmente. Podemos perceber através da equação 6 que com a diminuição da corrente do rotor diminui-se o conjugado.

A relação proporcional V/f também apresenta uma outra limitação no nível de tensão sobre o motor. Após a tensão de alimentação atingir a tensão nominal do motor, a mesma para de crescer, alterando-se apenas a frequência na aplicação. Essa limitação diminui o fluxo de magnetização, inferindo também uma diminuição no torque. Podemos analisar a Figura 19, que nos apresenta essa variação V/f de um motor cuja tensão nominal é de 380 V.

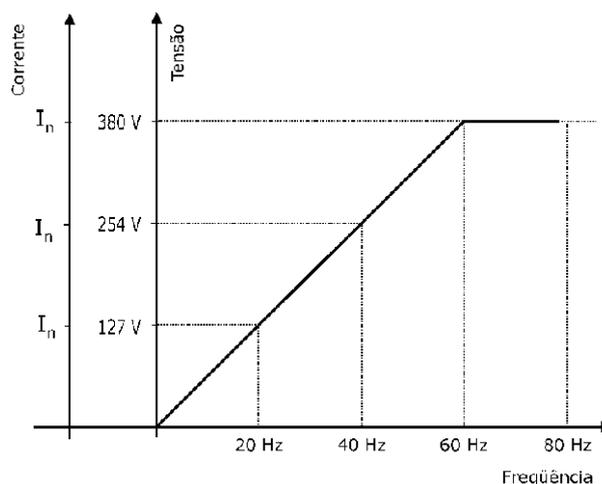


Figura 19 - Gráfico corrente/tensão X frequência. [2]

Podemos afirmar então que este tipo de controle de motor é utilizado em aplicações mais simples, cuja dinâmica de atuação seja limitada e sem a necessidade de precisão de controle de torque.

Em resumo, podemos fazer as seguintes considerações sobre o controle escalar:

- Apresenta um menor custo em relação ao controle vetorial;
- O controle escalar é utilizado em aplicações normais que não requerem elevada dinâmica (grandes acelerações e frenagem), elevada precisão nem controle de torque;
- Possui precisão de até 0,5% da rotação nominal para sistemas sem variação de carga, e de 3 a 5% para sistemas com variação de carga;
- Utiliza-se tal controle em circuitos de malha aberta, sem a leitura de velocidade do motor através de um sensor.
- Esse controle não é indicado para motores de baixa velocidade, pois em baixas rotações geralmente o torque é pequeno;

2.3.4 CONTROLE VETORIAL

Recomendado em aplicações em que é necessário alta performance dinâmica, respostas rápidas e alta precisão de regulação de velocidade. Deve fornecer um controle preciso de torque para uma faixa extensa de operação.

Conversores de frequência com controle vetorial recebem este nome devido à representação das suas grandezas por meio de vetores. Através desta técnica, a corrente que circula no estator do MIT pode ser dividida em duas componentes vetoriais – a

componente de magnetização I_d (produtora de fluxo) e a componente responsável pelo torque I_q . Podemos afirmar assim que a corrente total é a soma vetorial das duas componentes, $I_q + I_d$.

Para que se faça o controle do motor, é necessário o cálculo em tempo real das correntes presentes no estator do motor. É necessário também que se tenha conhecimento dos parâmetros inerentes ao MIT, como a indutância e resistência do motor e estator, a indutância de magnetização, a curva de saturação. Para que ocorra cálculos em tempo real, os inversores de frequência vetoriais são dotados de microprocessadores eficientes.

Muitos inversores vêm com valores de parâmetros de motores pré-programados, sendo escolhida a aplicação do motor. Outros inversores, mais sofisticados, usam rotinas de autoajuste para calcular estes parâmetros, característica muito útil quando estamos trabalhando com motores rebobinados.

• **Controle Vetorial *Sensorless***

Neste tipo de controle não há realimentação de velocidade, ou seja, o sistema funciona em malha aberta. A velocidade é estipulada através de cálculos matemáticos, o que torna a rotina de controle de velocidade mais complexa. Controle Vetorial *Sensorless* é um sistema de controle mais dinâmico que o escalar, porém possui desvantagens em relação ao controle por sensor (encoders), principalmente devido a necessidade de cálculos extras no seu processamento.

Uma das principais vantagens deste tipo de inversor é a facilidade de ajuste, pois há necessidade apenas do usuário entrar com os dados nominais de determinado motor ao qual irá ser trabalhar e executar a rotina de auto-ajuste, fazendo com que o inversor se autoconfigure, funcionando de maneira otimizada.

Inversores vetoriais são utilizados em situações que exigem um alto desempenho dinâmico, precisão na regulação de velocidade e respostas rápidas, além disso, são capazes de operar sem oscilações de torque em baixas velocidades, mesmo havendo variação de carga. Alguns valores típicos deste tipo de controle, de acordo com a WEG, são:

- Regulação de velocidade: 0,3%;
- Regulação de torque: 5%*
- Faixa de variação de velocidade: 1:100;
- Torque de partida: 150%
- Torque máximo (não contínuo): 150%

- Controle em malha aberta.

* A regulação de torque somente é possível para rotações acima de uma determinada frequência estatórica, tipicamente 3 Hz.

- **Controle Vetorial com Encoder(sensor)**

Neste inversor há o controle com alta precisão da velocidade e do torque, mesmo em velocidades muito baixas. A realimentação da velocidade permite o processamento se dedicar ao cálculo de correntes I_d e I_q de forma dedicada. A realimentação é feita por um *Encoder*, que nada mais é que um gerador de pulsos, responsável por converter movimentos rotativos em impulsos elétricos de onda quadrada.

Enquanto há uma malha responsável pelo controle da frequência de saída, há também a de controle de torque. A malha de controle de torque controla a corrente de entrada no motor que é proporcional ao torque. O sinal de diferença entre a velocidade desejada e a atual torna-se o set point para o controlador. Este sinal é comparado com o valor da corrente do motor e determina se o motor necessita ser acelerado ou desacelerado. Existe uma malha de controle separada para o fluxo de corrente. Alguns valores típicos deste tipo de controle, de acordo com a WEG, são:

- regulação de velocidade: 0,01%;
- Regulação de torque: 5%
- Faixa de variação de velocidade: 1:1000;
- Torque de partida: 200%
- Torque máximo(não contínuo): 200%
- Controle em malha fechada.

A maioria dos inversores de frequência dispõem da função reguladora PID, que pode ser usada para fazer o controle de um processo em malha fechada. Essa função faz o papel de um regulador proporcional, integral e derivativo, suposto no controle normal de velocidade do inversor.

3 CAPÍTULO 2 – MATERIAL E MÉTODOS

Como foi discutido no capítulo 1 deste projeto, os MITRB possibilitam um maior controle do torque de partida de um motor através da alteração da resistência rotórica do mesmo. À medida que o motor ganha velocidade, os valores dos resistores podem ser variados e, por fim, podem ser curto-circuitados para obter o máximo rendimento nas velocidades de operação.

Esse tipo de acionamento era bastante utilizado em sistemas de transporte de cargas, como ponte rolantes, de modo que ainda hoje há muitas pontes alimentadas por esse tipo de acionamento. Usando um valor adequado de resistência, pode-se fazer com que o conjugado máximo ocorra com o rotor parado quando é necessário um elevado conjugado de partida. Com o aumento da velocidade, pode-se retirar as resistências gradativamente. Nesse tipo de sistema, a maior parte das perdas térmicas no rotor é dissipada nos resistores externos, causando uma menor elevação de temperatura do rotor durante a partida, em relação do projeto em que a resistência estivesse no enrolamento do rotor.

Porém, esse método apresenta também suas dificuldades. Manutenções constantes dos anéis de contato, aumento de perdas térmicas no rotor e diminuição da potência mecânica são alguns dos problemas. O exemplo 6,7 do livro “*Máquinas Elétricas – FITZGERALD e KINGSLEY 7ª edição*” nos demonstra bem o aumento das perdas causadas por esse acionamento.

Embora um sistema bastante útil, principalmente se levarmos em consideração a falta de recursos para controle de frequência de décadas atrás, esse sistema vem entrando em desuso graças a métodos mais atrativos de acionamento de velocidade variável. Com isso, o uso de motores de rotor bobinado se tornou pouco comum, sendo substituídos por motores gaiola de esquilo. A atualização de sistemas de levantamento de carga em indústrias é de grande importância para o aumento da eficiência energética de empresas que utilizam sistemas motorizados de elevação de carga. A correta utilização de inversores de frequência pode oferecer a solução para sistemas com essas características.

3.1 ESTUDO DE CASO DA PONTE ROLANTE DA USINA

TRAPICHE

Um exemplo que pode ser apresentado nesse trabalho foi obtido na empresa Usina Trapiche S/A, onde se faz necessário a utilização de pontes rolantes tanto para o carregamento de matéria-prima, como para movimentação de peças mecânicas de grande massa. Podemos ver na Figura 20 uma Ponte Rolantes da Casa de Cana Coberta da empresa.



Figura 20 - Ponte Rolante Casa de Cana Coberta.

A ponte apresentada é um dos muitos exemplos que podem ser obtidos no campo. Pontes Rolantes, em geral, possuem 3 movimentos a serem conduzidos por seus devidos motores: deslocamento longitudinal, deslocamento transversal e elevação de carga. Falando especificamente desta ponte rolante, a mesma utilizava dois MITRB, um para a elevação e o segundo para o deslocamento longitudinal. Para o deslocamento transversal, um MITGE era utilizado. Após a readequação, os MITRB foram substituídos por motores

gaiola de esquilo, acionados por sistemas eletrônicos de controle. Este projeto foi a inspiração para a pesquisa realizada neste TCC.



Figura 21 - Banco de Resistores para acionamento de motores.

Embora possamos utilizar inversores para o acionamento de todos os deslocamentos, o movimento de elevação é o que necessita de maiores cuidados, com um dimensionamento bem discutido de forma a não causar futuros problemas ao projeto. Elevação de cargas geralmente funcionam em um alto ciclo de trabalho, e pode ser bem mais complexo, podendo inclusive serem utilizados para a geração de energia elétrica em movimentos de descida e frenagem, através de inversores regenerativos.

A seguir estão apresentados os dados de placa do antigo motor da talha elétrica e da movimentação transversal.

Tabela 1 - Dados de placa: Motor da movimentação longitudinal

Modelo	Motor de Indução trifásico tipo Rotor
26.6924.295	Bobinado
Tensão:	220/380/440/760 V
Potência:	10 cv
Rotação:	1725 rpm
Corrente:	26/15/13
Frequência:	50/60 Hz
Fator de Serviço:	1.0

Tabela 2 - Dados da placa: Motor da talha elétrica.

Modelo	Motor de Indução trifásico tipo Rotor
xx.xxxxx.xxx	Bobinado
Tensão:	220/380/440/760 V
Potência:	30 cv
Rotação:	1125 rpm
Frequência:	50/60 Hz
Fator de Serviço:	1.0

Devido ao desgaste causado durante anos de usos, ambos os motores apresentavam placas de indicação bastante degradadas, impossibilitando a retirada de algumas informações.

Uma das grandes dificuldades que a empresa vinha tendo com os motores era devido a necessidade de manutenção de seus contatos e conexões, e que devido a seu difícil acesso, era bastante negligenciado durante a safra. O seu cubículo de controle é instalado acima da viga principal da ponte e funciona em um ambiente com bastante resíduos sólidos de areia e de bagaço de cana-de-açúcar. Podemos ver através da Figura 22 e Figura 23 o estado de degradação que se encontravam os motores após o término da moagem(safra) e início do apontamento.



Figura 22 - Motor de rotor bobinado da talha elétrica.



Figura 23 - Motor de rotor bobinado da movimentação longitudinal.

Podemos observar o seu antigo quadro elétrico na Figura 24. Podemos perceber que o mesmo não passava por manutenção de limpeza frequente e que os seus componentes são de linhas de contactores que já saíram do mercado, dificultando realizar a troca de contatos.

Após a retirada do cubículo foi feita uma inspeção para o reaproveitamento de equipamentos antigos que estavam presentes no quadro. Poucos materiais tinham condições de serem reaproveitados dentro da empresa, sendo alguns fusíveis e relés temporizadores o principais dos equipamentos reutilizáveis.

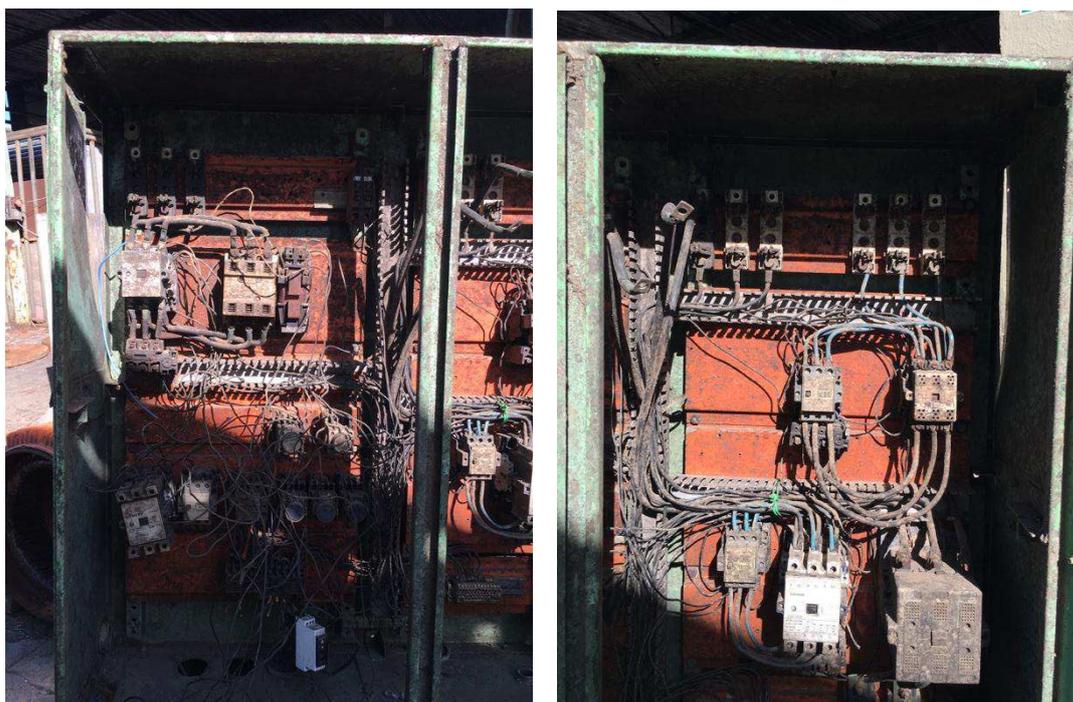


Figura 24 - Antigo cubículo de controle dos motores.

3.1.1 O PROJETO

Para que fosse feitas as alterações, foi necessário esperar o fim da moagem e começo do apontamento, aproveitando o momento de pouca produtividade da manutenção em geral, pois era começo do período de manutenção. Após a retirada das cabines e dos motores, começou o projeto para os novos cubículos e foi definido os novos motores a serem utilizados.

A escolha do motor foi definida de forma a alterar o mínimo possível do quadro de motores apresentado anteriormente, com potências similares. O principal motivo seria o fato de todo o sistema de transferência de energia mecânica através das engrenagens permanecer o mesmo. Os dados dos motores gaiola de esquilo a serem utilizados estão listados na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 3 - Novo motor gaiola de esquilo para a movimentação do carro.

Modelo WEG Alto rendimento PLUS	Motor de Indução trifásico tipo Gaiola de Esquilo
Tensão:	380/660 V
Potência:	10 cv
Rotação:	1130 rpm
Corrente:	15.1/8,75 A
Frequência:	50/60 Hz
IP	55
CAT	N

Tabela 4 - Novo motor gaiola de esquilo para a movimentação longitudinal.

Modelo WEG Alto Plus rendimento	Motor de Indução trifásico tipo Gaiola de Esquilo
Tensão:	220/380/440 V
Potência:	20 cv
Rotação:	1165 rpm
Corrente:	56,7/32,8/28,4 A
Frequência:	50/60 Hz
IP	55
CAT	N

Tabela 5 - Novo motor gaiola de esquilo para a talha elétrica

Modelo WEG Alto Plus rendimento	Motor de Indução trifásico tipo Gaiola de Esquilo
Tensão:	380/440 V
Potência:	30 cv
Rotação:	1180 rpm
Corrente:	44,2/38,3 A
Frequência:	50/60 Hz
IP	55
CAT	N

Com os motores selecionados, foi selecionado equipamentos ideais para acionamento de cada um. O dimensionamento levou em conta a corrente de placa de cada motor, e o equipamento utilizado para cada motor tem uma corrente de placa maior do que o do motor a ser acionado por ele.

Os equipamentos de acionamento eletrônico utilizados estão listados na tabela 6, tabela 7 e tabela 8.

Tabela 6 - Soft-starter para acionamento de talha elétrica.

Modelo Telemecanique ATS48D88Q	Soft-starter
Tensão:	230...415 V
Corrente:	88 A

Tabela 7 - Soft-starter para acionamento de movimentação do carro.

Modelo Telemecanique ATS48D47Q	Soft-starter
Tensão:	230...415 V
Corrente:	47 A

Tabela 8 - Inversor de frequência para movimentação longitudinal.

Modelo ALTIVAR 71	Inversor de frequência
Tensão:	380/480 V
Potência:	30 HP

Após a seleção de motores e acionamentos eletrônicos estáticos foi possível construir o novo quadro elétrico de comando.

A parametrização dos equipamentos foi feita por um instrumentista da própria empresa. Foi necessário apenas a alteração de parâmetros dos motores a qual cada equipamento foi relacionado.



Figura 25 - Novo quadro elétrico para a ponte rolante.

- **Parametrização**

Tabela 9 - Parâmetros de inversor de frequência para a movimentação longitudinal.

Inversor altivar 71			
Menu de parâmetros:	Código:	Regulagem:	Descrição:
	tcc	2C	Comando a dois fios
	CFG	StS	Comando para start/stop
	bFr	60	Frequência standart para padrão IEC ou NEMA
	nPr	20	Potência nominal do motor (20 cv)
SIN	UnS	380	Tensão Nominal do motor (380 V)
	nCr	28	Corrente nominal do motor (28 A)
	FrS	60	Frequência nominal do motor (Hz)
	nSP	1165	Velocidade nominal do motor (rpm)
	itH	30	Proteção térmica do motor a partir da corrente.

LSP	0	Velocidade mínima do motor (Hz)
HSP	60	Velocidade máxima do motor (Hz)

Para a soft-starter 48, os parâmetros alterados foram:

Tabela 10 - Parâmetros alterados de acordo com motor específico da movimentação do carro e elevação.

Soft-starter Telemecanique ATS48		
Menu de Parâmetros:	Código:	Descrição:
SEt	In	Corrente Nominal do motor (A)
	ILt	Limitação de corrente (%)
	ACC	Tempo de aceleração de rampa
	Sty	Parada por roda livre
PrO	tHP	Classe de proteção térmica do motor
drC	ULn	Tensão de rede de alimentação
	FrC	Frequência de rede de alimentação

Para ambas as soft-starters os parâmetros alterados estão expostos na tabela 10, e os valores utilizados foram os parâmetros de cada motor.

O controle de movimentos é feito por dois joysticks, um de quatro movimentos para controlar a elevação e movimentação longitudinal, e um de dois movimentos para a movimentação do carrinho. Ambos os joysticks foram instalados na cabine de comando da ponte rolante. Há também uma sirene de segurança, a qual sempre que houver alguma falha nos equipamentos, será acionada de forma a avisar a todos que pode haver problema na ponte.

3.1.2 A INSTALAÇÃO

A instalação foi realizada logo após o término do passo anterior, e foi necessário cerca de três dias para o término do processo. Os motores foram instalados em seus locais, assim como cubículo de comando de motores. A maior dificuldade neste passo foi relacionada ao difícil acesso ao piso de cima da ponte.



Figura 26 - Sistema de movimentação longitudinal de ponte rolante.

Para a movimentação longitudinal, a ponte rolante utiliza-se de um sistema de polias que fazem a conexão entre o eixo do motor e o eixo das rodas da ponte rolante. A movimentação também passa por um sistema de redução por engrenagens. Podemos perceber que há um sistema de freio atrelado ao motor. O acionamento de freios é intermitente com o acionamento do motor.



Figura 27 - Sistema de içamento de carga da talha elétrica.

Assim como o sistema de movimentação longitudinal, o sistema de içamento também possui freio, o qual é acionado imediatamente após a desenergização do motor.



Figura 28 - Sistema de movimentação do carro.

Podemos observar que o único sistema que não utiliza uma frenagem externa é a movimentação do carro, sendo toda a operação de controle de movimento feita pelo operador.

3.1.3 TESTES

Durante a fase de testes, alguns problemas iniciais surgiram. O primeiro deles era uma falha no inversor de subtensão na entrada. O problema estava sendo causado por falha nos contatos das sapadas da ponte rolante com o barramento de alimentação. A solução foi a troca da sapada antiga e a lavagem completa do barramento de alimentação. Podemos ver através da Figura 29 que a sapata estava bastante deteriorada.



Figura 29 - Sapatas substituídas da ponte rolante.

Um segundo problema ocorrido foi relacionado a sobrecarga no motor da movimentação do carro. O sistema de rolamentos do movimento estava emperrado e ao tentar partir o motor, a soft-starter apontava a falha. O problema foi solucionado por funcionários do departamento da mecânica da empresa, com a devida limpeza do sistema.

A terceira falha ocorrida na fase de testes foi também de sobrecarga, porém no motor da talha elétrica. Era perceptível que ao colocar carga mais pesadas no sistema, o mesmo não conseguia elevar com o mesmo êxito de com o motor de rotor bobinado. O problema estava relacionado ao torque de partida do motor, o qual um sistema de contactores tem um controle de torque mais conciso do que a soft-starter, fazendo com que o motor não conseguisse elevar a carga, causando um sobreaquecimento e eventual falha de sobrecarga. A solução para este último problema foi a substituição do motor de 30 cv para um motor de 50 cv para o içamento. Embora não seja a melhor solução, foi suficiente para resolver o problema. Como a soft-starter já tinha sido dimensionada para um motor maior do que de 30 cv, não foi necessária a sua substituição.

Após as falhas serem solucionadas, o sistema não retornou a dar problemas e funcionou conforme o planejado durante o período. Podemos observar na figura 30 a ponte rolante elevando uma carga de equipamentos da usina.



Figura 30 - Ponte rolante em funcionamento pleno na Usina Trapiche.

3.2 RESULTADOS

Os resultados obtidos com essa atualização da ponte rolante foram satisfatórios. Foi aplicado o novo sistema de acionamento na ponte rolante a qual necessitava de uma grande manutenção para que voltasse a atuar conforme a necessidade. As soluções apresentadas, embora não fossem a ideia inicial do projeto, foram suficientes para um bom funcionamento.

Pudemos ver que a atualização foi de grande importância para a empresa, devido ao fato de que a casa de cana coberta é desmontada a cada apontamento, e a movimentação das peças é feita por tal ponte.

Alguns problemas que foram demonstrados durante a fase de testes do equipamento foram solucionados de forma prática, sem grandes paradas necessárias.

Inicialmente planejava-se a instalação de três inversores para o acionamento dos motores, porém devido ao pouco tempo para a finalização do projeto, decidiu-se utilizar dois acionamentos por soft-starter e um acionamento por inversor de frequência, principalmente por questão de disponibilidade e pouco tempo para o término do serviço.

3.3 INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA ELEVAÇÃO DE CARGA

Embora não tenha sido utilizada no projeto da empresa, inversores de frequência são a melhor solução para sistemas de levantamento de carga, proporcionando um controle vetorial de fluxo de motores, controlando assim o torque de partida de moto eficiente e evitando que problemas como a falta de torque para a elevação de carga ocorram.

Talvez nenhuma outra tecnologia desenvolvida nos últimos 30 anos revolucionou mais projetos de Guindastes. Inversores e controle vetorial de fluxo de motores se tornaram o padrão industrial internacional para controle de guindastes. A indústria nacional vem tentando se modernizar nesse segmento, o qual consegue gerar um lucro a longo prazo para qualquer empresa que o implementar.

Inversores de Frequência entregam grande confiabilidade, aumenta performance, aumenta produtividade, prolonga a vida útil do equipamento, reduz custos de manutenção e, a depender da sua forma de instalação, pode reduzir custos com pessoal. Algumas principais vantagens de inversores que podemos citar são:

- Eles reduzem as correntes de pico de MIT. Características comentadas no capítulo 1 como o controle de rampa de aceleração e de freio dinâmico, produzem aceleração e paradas suaves, garantem também uma transição mais polida entre velocidades e reduz grandemente os desgastes de freios e manutenção requerida.
- A depender de seu modelo e características oferecidas ao cliente, sistemas de controle com comunicação wireless são possíveis de serem alcançadas. Com a implementação de controle wireless é possível receber informações de monitoração, status, performance e diagnóstico de funcionamento.
- A segurança aumenta grandemente com a utilização de inversores, principalmente falando do movimento de elevação de guindastes. Com a aplicação do acionamento eletrônico, podemos ter controle de sobrecarga no eixo do motor, minimizando ou eliminando os perigos que a falta de potência para a elevação de uma determinada carga poderia causar para todos que se encontram ao redor.

Em suma, podemos afirmar que o projeto de renovação de acionamento de motores trás enormes benefícios para o cliente interessado na proposta.

A capacidade dos inversores de frequência está relacionada com o dimensionamento de potência dos motores. A depender do fabricante, inversores de

frequência tem suas especificações dadas em potência ou em corrente nominal. Em geral, os inversores WEG utilizam o valor de corrente nominal para definir a capacidade do equipamento. Portanto, para motores de 30 CV é necessário adquirir inversores com capacidade mínima de 45 A (valor comercial). Esses equipamentos são projetados para operar em ambientes com temperatura e umidade controladas, oferecendo também um ambiente livre de poeiras, podendo causar assim danos aos seus componentes. A falta de controle da temperatura e umidade pode também oferecer riscos de curto-circuito em suas placas integradas, bem como prejudicar a refrigeração interna, levando a um sobreaquecimento.

3.3.1 O INVERSOR WEG CFW-11

Nesse trabalho, estaremos tratando especificamente da linha de inversores WEG CFW11, o qual possui a tecnologia *Vectrue*. Em outras palavras, o inversor apresenta parâmetros para configurações de controle escalar (V/f) como também controle vetorial no mesmo produto. O controle vetorial no CFW-11 pode ser programado de forma *sensorless*, sem a instalação de *encoders*, ou utilizando *encoders* como sensores no motor. Com esse tipo de controle vetorial *sensorless* é possível controlar o torque de forma rápida, mesmo em velocidades muito baixas ou na partida. O inversor apresenta ainda uma vasta gama de outros ajustes que auxiliam a sua aplicação para o içamento de cargas, como funções relacionadas a frenagem e autoajuste de controle de vetores.

Uma razão para a utilização de inversores da linha WEG CFW-11 no projeto é a grande projeção da WEG no mercado nacional, oferecendo uma grande assistência técnica para o mercado, em várias regiões do país, facilitando assim a compra e instalação de seus materiais.

Quando se tratando de operação de movimentação de cargas, o controle vetorial é o mais indicado para o funcionamento, levando em consideração o seu desempenho dinâmico e a sua precisão no ajuste de conjugado e velocidade. Nele o inversor de frequência decompõe a corrente do motor em dois vetores, corrente de eixo de quadratura e corrente de eixo direto. O inversor passa a controlar estas duas parcelas separadamente, o que garante uma resposta dinâmica e um desempenho comparado ao de um acionamento CC.

Em função da importância da operação, recomenda-se o emprego de inversores sem a inibição de proteções como: sub e sobre tensão; sobretemperatura; sobrecarga no

inversor e motor; sobrecarga no resistor de frenagem; curto-circuito entre fase ou fase e terra na saída do inversor e nos enrolamentos do motor.[13]

Podemos ver na Figura 31 um modelo-exemplo do inversor CFW-11, posteriormente, na Figura 32 vemos um diagrama de blocos do modelo do inversor, onde apresenta todas as entradas e saídas do módulo de potência e módulo de controle.



Figura 31 - Inversor de Frequência WEG CFW-11.[14]

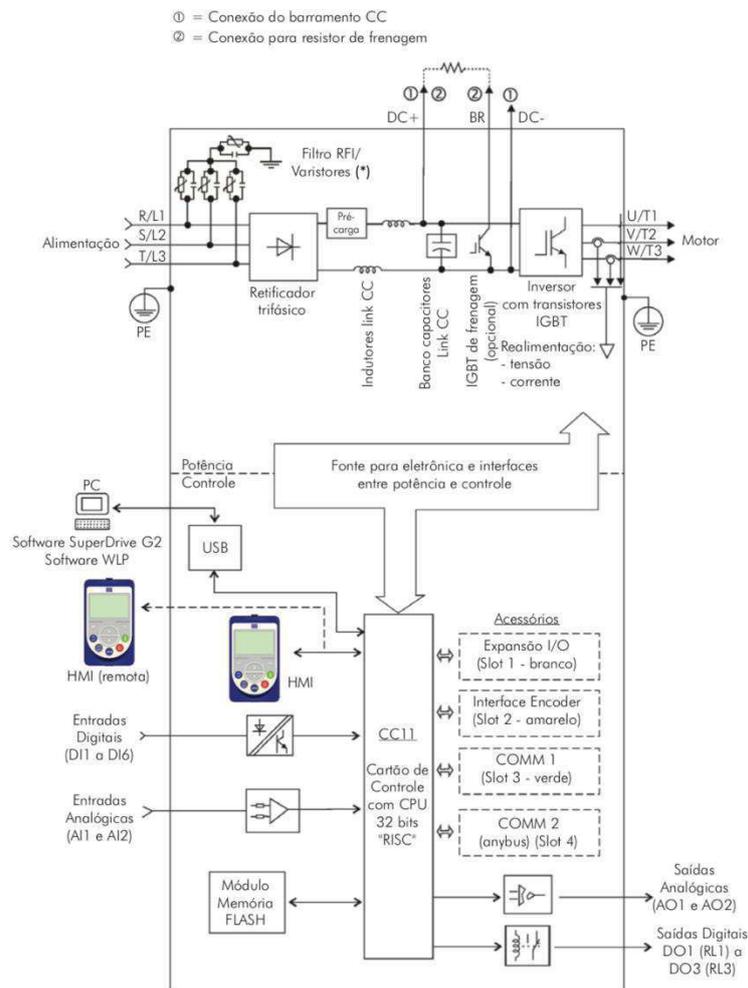


Figura 32 - Blocodiagrama do CFW-11.[14]

As conexões de potência do inversor são apresentadas na Figura 33. Uma ilustração básica do acionamento de inversores sem o uso de resistor de frenagem. Para movimentações de carga com elevada inércia, como é o nosso caso, utiliza-se resistores de frenagem externos ou conversores regenerativos para dissipar a potência gerada em excesso.

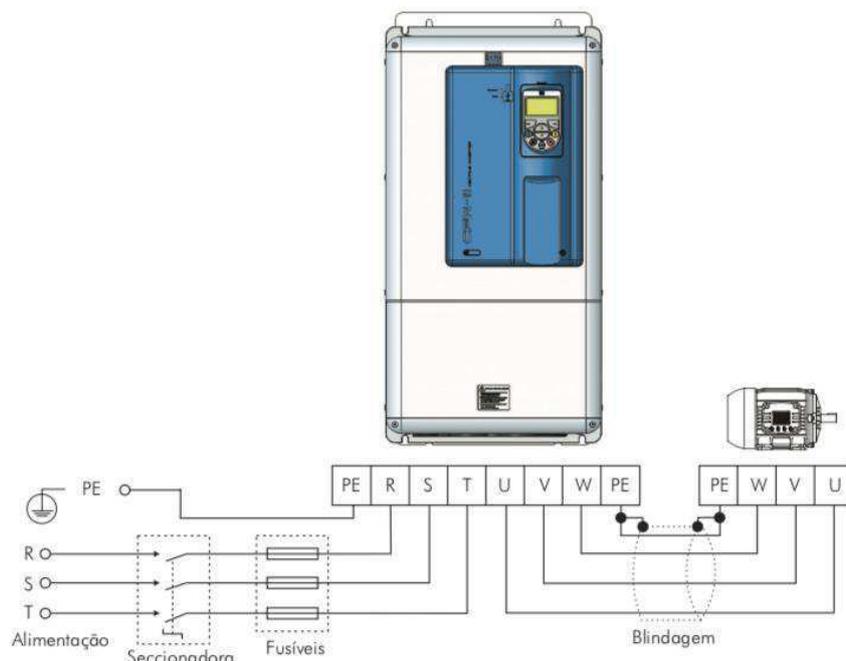


Figura 33 - Conexões de potência e aterramento.[14]

3.3.2 SISTEMAS DE ACIONAMENTO COM CAPACIDADE REGENERATIVA

A utilização de inversores de frequência para movimentação de cargas no sentido vertical pode nos proporcionar um método eficiente de aproveitamento de energia. De acordo com Fitzgerald (7ª Edição, pg.362) “uma máquina de indução funcionará como gerador se seus terminais de estator forem conectados a uma fonte de tensão polifásica e seu rotor for acionado por uma máquina motriz acima da velocidade síncrona (resultado em um escorregamento negativo). A fonte determina a velocidade síncrona e fornece a entrada de potência reativa necessária para excitar o campo magnético de entreferro.” Quando em movimentos descendentes e em frenagens, podemos utilizar esse escorregamento negativo para assim gerar energia elétrica com um fluxo se sentido inverso ao original. Essa potência pode ser dissipada através de resistores externos ao inversor ou reaproveitados no sistema elétrico, através de conversores regenerativos.

Para a linha CFW-11, a WEG possui conversores regenerativos da série CFW-11 RB. De acordo com a empresa, o conversor regenerativo é um conversor CA/CC tipo boost trifásico bidirecional, que gera uma tensão contínua com valor superior ao pico de tensão de linha da rede elétrica de alimentação. Esses inversores também são denominados como do tipo *Active Front-End*. No caso da linha CFW-11, utiliza-se o sufixo RB, do inglês *Regenerative Breaking*, em função da capacidade natural destes conversores de permitir a circulação da energia também no sentido do conversor para a rede, no caso da frenagem do motor acionado. A tensão contínua gerada pelo conversor regenerativo é usada para alimentar unidades de potência conversoras, as quais geram tensões trifásicas alternadas para o controle de motores. A Figura 34 nos mostra o esquema de ligação de conversores+inversores na mecânica de tipo F e G. Percebemos que aqui o conversor é o responsável pela conversão CA-CC na entrada do sistema, alimentando o barramento CC para o inversor.

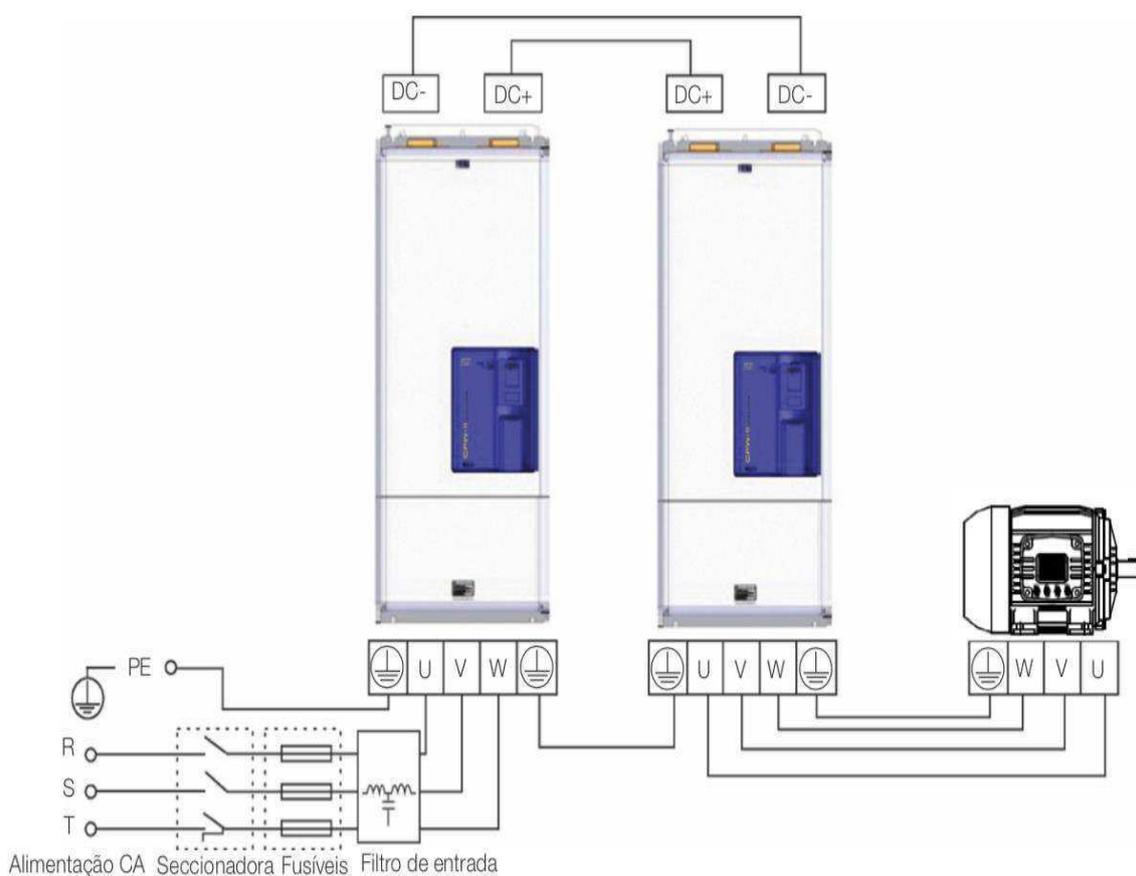


Figura 34 - Conexões de potência e aterramento. Mecânica F e G.[14]

Percebemos a necessidade da utilização de filtro de entrada para eliminação de frequências harmônicas. Esses filtros são dimensionados de forma que sejam capazes de

eliminar suficientemente frequências que não sejam a fundamental da rede para quando o motor está funcionando na região de geração de energia.

3.4 MOVIMENTAÇÃO DE CARGA

- **Movimentação Horizontal de Carga**

Consiste em movimentar a carga no sentido horizontal, com os comandos para avançar e retornar a carga. O movimento de translação de carga, o movimento de deslocamento do carro, o movimento do giro da lança entre outros são movimentos horizontais.

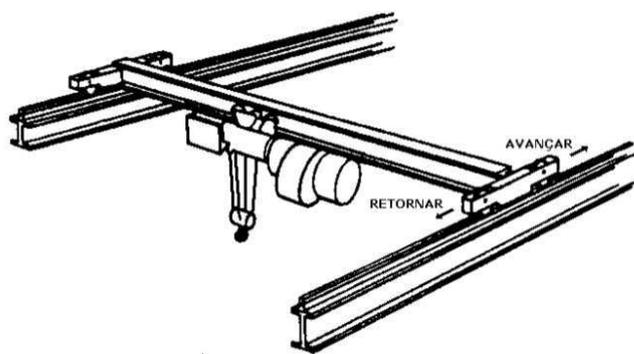


Figura 35 - Movimentação Horizontal de Carga. [13]

- **Movimentação Vertical de Carga**

Consiste na movimentação vertical, sendo executados comandos de subir e descer a carga. Movimento este que exige o maior torque para retirar a carga da inercia. Além de controle de torque, necessita de controle de frenagem bastante aguçado para evitar eventuais acidentes.

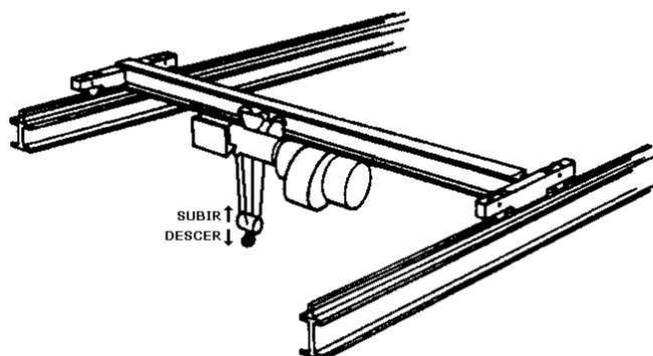


Figura 36 - Movimentação Vertical de Carga.[14]

3.5 PARAMETRIZAÇÃO DE INVERSOR

Usualmente, o dimensionamento do inversor de frequência é feito considerando a corrente nominal do motor elétrico, sempre usando um inversor com corrente nominal igual ou superior comparado ao motor.

Ainda neste dimensionamento prevê-se sobrecargas de 150% durante 60 segundos a cada 10 minutos para cargas em regime pesado (*Hard Duty HD*), ou 110% durante 60 segundos a cada 10 minutos para carga no regime normal (*Normal Duty ND*).

Para aplicações com movimentação de carga, onde a necessidade de se partir cargas pesadas em tempos de aceleração relativamente curtos, a necessidade de o inversor operar em sobrecarga de moto a vencer a inércia da carga durante a aceleração é certa, além de normalmente o ciclo de operação ser bem superior ao suportado pela sobrecarga padrão. Desta forma, calcula-se para um correto dimensionamento do inversor, levando em consideração o ciclo de operação no pior caso, para um período de 10 minutos, calculando-se o valor eficaz da corrente para este período.

Tendo calculado o valor da corrente, o inversor escolhido será para uma corrente igual ou superior à corrente eficaz calculada. Tomando-se ainda cuidado com a corrente de sobrecarga, para que não seja maior que 1,5 vezes a corrente do inversor adquirido.

As fontes de comando de um inversor podem ser divididas em Local e Remoto. No comando local é possível comandar o motor da movimentação apenas através de entradas analógicas ou IHM. Já no controle remoto, uma programação é feita através do programa WEG Ladder Programmer [14]. No software é possível também monitorar o funcionamento do inversor, funcionando como um sistema supervisor.

3.5.1 RESISTOR DE FRENAGEM

Para o dimensionamento do resistor de frenagem em uma aplicação de movimentação de carga, alguns critérios precisam ser executados:

-Movimentação horizontal

O inversor é dimensionado conforme a corrente para regime de sobrecarga normal

I_{ND} :

$$I_{ND} = I_N \quad (12)$$

Onde,

I_{ND} : Corrente nominal do inversor de frequência para regime de sobrecarga normal;

I_N : Corrente nominal do motor;

Para o dimensionamento do resistor de frenagem, podemos seguir a formula 13:

$$P_R = 0,4 \times P_M, \text{ com } \%ED = 50\% \quad (13)$$

Onde,

P_R : Potência do resistor de frenagem (kW);

P_M : Potência nominal do motor (kW);

$\%ED$: Percentual de utilização da frenagem no ciclo de operação (*Enable Duty*).

-Movimentação Vertical

O inversor é dimensionado conforme a corrente para regime de sobrecarga pesada

I_{HD} :

Para regime de trabalho não agressivo:

$$I_{HD} = 1,15 \times I_N \quad (14)$$

Para regime de trabalho agressivo:

$$I_{HD} = 1,3 \times I_N \quad (15)$$

Onde,

I_{ND} : Corrente nominal do inversor de frequência para regime de sobrecarga normal;

I_N : Corrente nominal do motor;

Para o dimensionamento do resistor de frenagem, podemos seguir a formula 16:

$$P_R = 0,7 \times P_M, \text{ com } \%ED = 100\% \quad (16)$$

Onde,

P_R : Potência do resistor de frenagem (kW);

P_M :Potência nominal do motor (kW);

%ED: Percentual de utilização da frenagem no ciclo de operação (*Enable Duty*).

De acordo com a WEG, cada inversor possui um valor resistência de frenagem específica para seu trabalho, que deve ser utilizado nos conformes do manual.

3.5.2 WEG LADDER PROGRAMMER

De modo a facilitar a parametrização do usuário, a WEG disponibiliza o software Weg Ladder Programmer (WLP).Um programa em ladder gráfico usado para facilitar o uso em ambientes de desenvolvimento integrado. Se torna uma poderosa aplicação que concede ao usuário as características e funcionalidades para criar aplicações profissionais com facilidade.

O programa poderá ser utilizado para a programação, e até supervisão, de sistemas de transporte de carga, como pontes rolantes. Podemos ver na figura 37 o sistema supervisório do software, o qual pode ser conectado a um inversor.

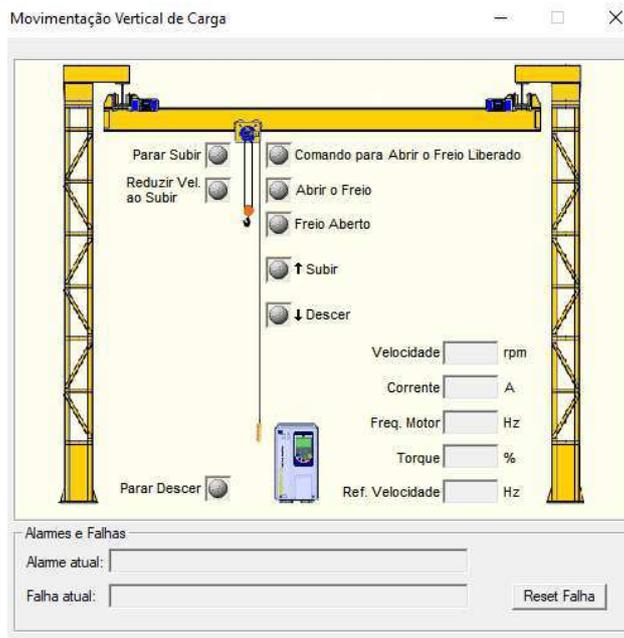


Figura 37 - Sistema supervisório WLP.

Com o software é possível se comunicar com o inversor, programar através do SoftPLC presente no inversor CFW-11 utilizando a conexão USB ou via porta serial. Após a comunicação é possível alterar parâmetros, supervisionar atuação, acompanhar gráficos de variáveis, programar em ladder no inversor, etc.

Podemos ver na figura 38, que o software apresenta diversos tipos de menus, entre eles o assistente de configuração. Com o assistente, podemos configurar parâmetros de inversores ao qual a WEG recomenda que seja utilizado para este tipo de movimentação. Há também um diálogo de monitoração, onde pode-se monitorar falhas, parâmetros, estado do equipamento, entre outras possibilidades.

O software é capaz de auxiliar a instalação do projeto de modo a otimizar o tempo de aplicação do projeto e gerar benefícios através de uma ótima configuração do instrumento.

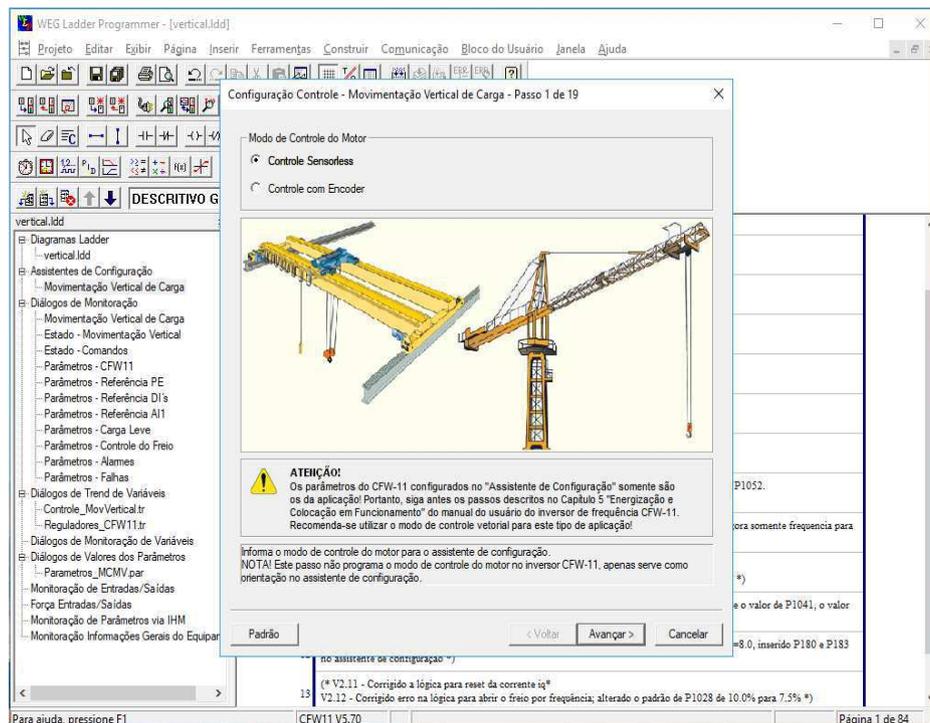


Figura 38 - Assistente de configuração WLP.

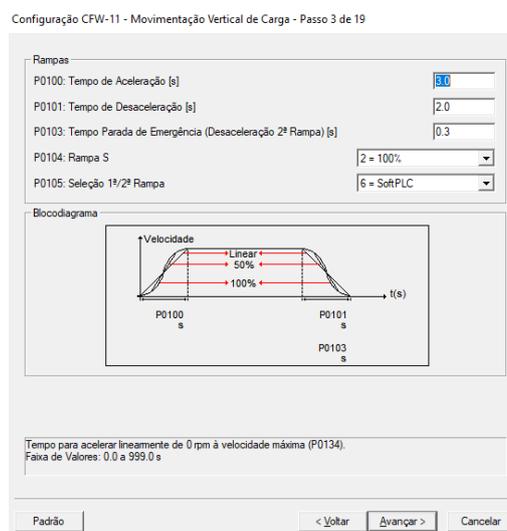


Figura 39 - Configuração de rampa de aceleração/desaceleração WLP.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Motores de rotor bobinado foram úteis na instalação de pontes rolantes no passado, porém vem sendo aos poucos substituída seu uso por sistemas mais modernos e mais seguros;
- A utilização de softstarter é bastante útil para estes casos, apresentando uma solução barata, porém ao mesmo tempo apresenta dificuldades quando se necessita de um maior controle de torque;
- Inversores de frequência apresentam a melhor forma de controle sobre a movimentação do sistema, utilizando controle por orientação de campo para um torque de partida mais eficiente, trazendo também maior segurança e praticidade na sua atuação, podendo ser utilizado inclusive em sistemas supervisórios;
- A linha WEG CFW-11 apresenta características interessantes para a aplicação, possuindo também um suporte amplo, facilitando a implementação dos seus inversores.

5 CONCLUSÃO

- O projeto apresentado foi satisfatório para a empresa, de modo a suprir as exigências de atuação para a ponte rolante.
- Todas as falhas apresentadas na fase de testes foram sanadas.
- Embora o projeto tenha apresentado resultados, a utilização de soft-starter em contraposição a inversores de frequência com controle vetorial, custou a empresa o uso de um motor de potência maior do que o necessário, utilizado no sistema anterior com motor de rotor bobinado.
- A utilização de inversores de frequência é uma solução nova, que precisa ser expandida para empresas antigas as quais possuem pontes com projetos de acionamento de décadas passadas.
- A linha WEG CFW-11 possui todos os requisitos necessários para serem utilizadas na aplicação, com ou sem conversores regenerativos no acionamento.
- O Software WLP é uma interface amigável e prática para programar inversores para este tipo de aplicação.
- Este trabalho contribui para a difusão da ideia de utilização de equipamentos eletrônicos, de modo a apresentar um projeto bem sucedido de implantação de instrumentos de acionamento eletrônicos em projetos ultrapassados.

1 REFERÊNCIAS

- [1] A. E. Fitzgerald e C. Kingley Jr, “Máquinas Elétricas,” AMGH, New York, 2014.
- [2] WEG, “Guia de Aplicação de inversores de Frequência”.
- [3] WEG, “Guia Técnico de Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência”.
- [4] WEG, “Motores Elétricos: Guia de Especificações”.
- [5] WEG , “Módulo 2: Variação de Velocidade”.
- [6] D. Kothari, “Electric Machines,” Tata McGraw Hill Education, New Dheli, 2010.
- [7] U. R. Mohan, Power Electronics: Converters, applications and design, New York: Tata McGraw Hill Education.
- [8] M. H. Hashid, “Power Electronics Handbook,” Elsevier, Boston, 2011.
- [9] P. A. Fischer, “Proteção, Partida e Comando de Motores de Indução Trifásicos.,” 2006.
- [10] C. A. Langui, “A importância do equipamento nas áreas de produção industrial,” Universidade de Taubaté, Taubaté, 2001.
- [11] L. Passos, “Técnicas de instalação, operação, manutenção, testes e inspeção: pontes rolantes, guindastes giratórios e acessórios de movimentação de carga,” Make Engenharia, Acessoria e Desenvolvimento, 2011.
- [12] G. SORDI, “Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante.,” UNIVATES, 2016.
- [13] WEG, “Movimentação Vertical de Carga. CFW-11”.
- [14] WEG, “Manual do usuário. Inversor de Frequência CFW-11”.
- [15] Cesgranrio, Artist, *Concurso Petrobras- Engenheiro de Equipamento júnior - Elétrica*. [Art]. 2011. Disponível em “<https://www.qconcursos.com/questoes-de-concursos/questoes/c4ce2743-a5>”. Acesso: 20/06/2019

- [16] J. C. Cortes Pinheiro, “Projeto e desenvolvimento de uma linha de pontes rolantes padronizadas para uma empresa metal mecânica,” UNIJUÍ.
- [17] D. A. Andrade, “Introdução a Sistemas de Acionamento Estático. Acionamento de Máquinas Elétricas,” UFU.
- [18] F. M. Gurgel, “Aplicações de Inversores Eletrônicos na Indústria Nacional: a Contribuição brasileira,” UFRJ, Rio de Janeiro, 2009
- [19] M.H. Ferreira Costa “Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo: inversores de frequência x chaves de partida estática” CEFET, Belo Horizonte, 2014
- [20] D.M. Cortes “Aplicação de inversores de frequência em motores elétricos de CA.” PUC, Rio de Janeiro, 2010
- [21] V.J. Modena “Estudo de aplicação de inversores de frequência em sistemas de elevação de carga do tipo talha elétrica” UCS. Caxias do Sul, 2015