



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

YASMIN EMILY DE SOUZA OLIVEIRA

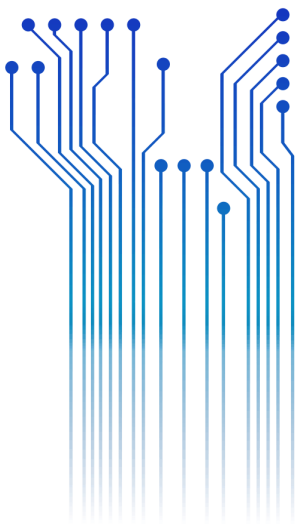


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA ACIONAMENTO  
DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2019

YASMIN EMILY DE SOUZA OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA ACIONAMENTO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso 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: Acionamentos Elétricos.

Orientador:

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande  
2019

YASMIN EMILY DE SOUZA OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA ACIONAMENTO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso 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: Acionamentos Elétricos.

Aprovado em        /        /

**Professor Luiz Augusto Medeiros**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha amada “vovó” Salete, carinhosa, dedicada, cuidadosa, que sonhou e idealizou este momento comigo. Que a senhora esteja iluminando o lugar que estiver com o seu sorriso e abraço inesquecível. Saudades.

# AGRADECIMENTOS

O momento dos agradecimentos é o momento para refletir sobre toda caminhada percorrida para chegar até aqui. É o momento em que a gente reconhece que todas as pessoas que passaram em nossas vidas deixaram um pouquinho delas conosco. E o mais incrível é que somos a soma das experiências vividas das pessoas que fizeram parte da nossa história.

Com isso, eu agradeço primeiramente à Deus, que por mais que eu, uma jovem menina, estivesse enfrentando uma caminhada árdua longe da sua família, eu nunca estive sozinha. Foi a minha fé em Deus que me fez ter forças para levantar a cada rasteira que a vida me dava.

Além da minha fé em Deus, a minha outra motivação foi um homem honesto e resiliente chamado Egídio e uma mulher guerreira e arretada chamada Eleneide. Eles são os meus pais. Eles foram a minha referência como pessoa e foi por causa deles que eu cheguei até aqui.

Gostaria de agradecer aos meus amigos de universidade e da vida, como a Lily, Hebert, João Victor, Dani e Telmo pela companhia e apoio nas noites viradas de estudo. Gostaria de agradecer a Mateus, pelas diversas caronas dadas pra universidade, elas foram muito importantes pra mim.

Ao meu orientador, o professor George, que foi parte presente em uma das minhas melhores experiências na universidade que foi a monitoria no Laboratório de Instalações Elétricas. Obrigada pela parceria, paciência, pelo conhecimento compartilhado e por ter contribuído para eu ser uma profissional melhor.

Aos colegas de profissão, que me deram uma aula todos os dias sobre Engenharia Elétrica, Eng. André Lobato e Eng. Alyston Nascimento, vocês foram fundamentais para a minha formação como engenheira e para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu namorado, por ter sido o meu apoio nesse momento difícil e ansioso que é a reta final de uma graduação. As minhas irmãs, Ingrid e Ester. A minha tia Zenaide e a minha falecida Vovó Salete, por ter sonhado esse sonho junto comigo.

Gratidão à todas as pessoas que passaram pela minha vida, a cada palavra de conforto, a cada abraço e motivação. Apenas gratidão.

*“Construí amigos,  
Enfrentei derrotas,  
Venci obstáculos,  
bati na porta da vida e disse-lhe:  
Não tenho medo de vivê-la!”*

Augusto Cury.

## RESUMO

O presente trabalho aborda a aplicação dos motores elétricos de indução na indústria através do estudo do funcionamento das chaves de partidas elétricas e eletrônicas utilizadas no mercado. No momento da partida dos motores o sistema fica submetido a valores muito superiores aos limites calculados para o seu funcionamento normal, podendo acarretar distúrbios para o sistema elétrico. A escolha de um sistema de partida eficiente contribui para uma maior vida útil do motor, uma redução de custos de manutenção e operação da máquina. No setor industrial, os equipamentos precisam garantir que o processo produtivo seja realizado. Este trabalho apresenta um estudo de caso ocorrido em uma indústria de Alumina que consiste no sistema de acionamento do enrolador de cabos de um *Reclaimer* de Bauxita. Este sistema apresentava uma elevada taxa de falhas, causando perda de produção para a indústria. Para isso, foram analisados os métodos de partida convenientes para essa aplicação e o método escolhido consistiu na modernização do sistema de acionamento utilizando inversores de frequência. Após a implementação da melhoria, notou-se uma diminuição nos custos com manutenção, no aumento da disponibilidade e na confiabilidade do enrolador de cabos, acarretando benefícios para o processo produtivo da empresa.

**Palavras-chave:** Motores elétricos, Métodos de Partida, Inversores de Frequência.

# ABSTRACT

This work addresses the application of induction electric motors in the industry through starter method motors study used on the market. The electric motors during starting requires values much higher than the limits calculated for their normal operation and may result operational disturbances for the electrical system. The choice of efficient motor starting system ensuring an increased motor life and lower maintenance costs. In the industrial sector, the equipment need to ensure the production plants. This paper presents a case study of an Alumina industry, which consists of any cable reel drive system of a Bauxite Reclaimer. This system has a high failure rate and events of loss of production happened. For this, we analyzed the starting methods appropriate for this application and the chosen method consisting in the upgrade of the drive system using frequency inverters. Afterwards the upgrade has been implemented, resulted in a decrease in maintenance costs, increase cable reel availability and reliability, resulting in the benefits for business production process.

**Keywords:** Induction Motors, Starter Methods, Frequency Inverters.



# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos motores elétricos .....	20
Figura 2 - Corrente induzida no rotor. ....	21
Figura 3 - Componentes do motor de indução trifásico.....	22
Figura 4 - Princípio de funcionamento do motor.....	23
Figura 5 - Campo girante do estator em diferentes instantes. (a), (b) e (C).....	24
Figura 6 - Rotor gaiola de esquilo .....	25
Figura 7 - Motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo .....	25
Figura 8 - Esquema de Ligação na ponte retificadora para frenagem normal .....	26
Figura 9 - Esquema de ligação na ponte retificadora para frenagem rápida.....	27
Figura 10 - Rotor bobinado .....	27
Figura 11 - Motor de indução de rotor bobinado.....	28
Figura 12 - Ligações do motor de rotor bobinado. ....	28
Figura 13 - Vista em corte de um motor de rotor bobinado.....	29
Figura 14 - Diagrama de força e comando de uma partida direta .....	30
Figura 15 - Controle de velocidade por variação da resistência do rotor de um motor de indução de rotor bobinado.....	31
Figura 16 - Diagrama de Força da Partida por aceleração rotórica. ....	31
Figura 17 - Esquema de ligação para partida estrela triângulo temporizado a contactor.....	32
Figura 18- Diagrama de força de uma partida compensadora com autotransformador .....	33
Figura 19 - Esquema de um soft-starter implementado com 6 tiristores para acionar um motor de indução trifásico (MIT).....	34
Figura 20 - Rampa de tensão na aceleração.....	35
Figura 21 - Rampa de tensão na desaceleração. ....	35
Figura 22 - <i>Kick Start</i> .....	36
Figura 23 - Diagrama de Blocos de um inversor de frequência. ....	37
Figura 24 - Componentes Internos de um inversor de frequência. ....	38
Figura 25 - Geração de sinal pwm.....	38
Figura 26 - Saída do gerador pwm .....	39
Figura 27 - Formas de onda geradas pelo chaveamento dos transistores com tecnologia PWM.....	39
Figura 28 - Gráfico tensão x Frequência. ....	40
Figura 29 - Região de enfraquecimento do campo. ....	40
Figura 30 - Interface Homem Máquina (IHM) - <i>Allen Bradley</i> .....	42
Figura 31 - Rampa de aceleração/desaceleração em rampa s. ....	43
Figura 32 - Aplicação do uso do inversor de frequência. ....	43
Figura 33 - Recuperadora de bauxita de uma indústria de alumina.....	44
Figura 34 - Recuperadora ( <i>Reclaimer</i> ) de bauxita.....	45
Figura 35 - Enrolador de cabos do reclaimer de bauxita. ....	46
Figura 36 – Esquemático elétrico do sistema antigo do enrolador de cabos. ....	46
Figura 37 - <i>Driveobserver</i> utilizado para coleta de dados. ....	49
Figura 38 - <i>Software Drive Executive</i> utilizado na análise do inversor de frequência.....	50
Figura 39 - Tela do <i>Software RLogix5000</i> .....	50
Figura 40 - Motor do tipo rotor bobinado utilizado no estudo de caso.....	52
Figura 41 - Motor atual do Sistema de Enrolador de Cabos.....	54
Figura 42 - Placa do Motor atual do Sistema de Enrolador de Cabos. ....	54
Figura 43 - CLP <i>ControLogix</i> da <i>Allen Bradley</i> .....	55
Figura 44 - Diagrama de blocos dos elementos do CLP.....	56
Figura 45 - Ciclo de Varredura do CLP .....	56
Figura 46 - <i>Drive</i> inversor <i>Powerflex700</i> do enrolador de cabos. ....	57
Figura 47 - Pêndulo do enrolador de cabos. ....	62
Figura 48 - Controle vetorial do inversor de frequência.....	63
Figura 49 - Corrente de saída e de torque do motor. ....	64
Figura 50 - Comportamento da tensão de saída no momento de partida.....	65
Figura 51 - Comportamento da frequência do motor no instante da partida. ....	65
Figura 52 - Comparação do Tempo médio de reparo de falhas. ....	66

Figura 53 - Disponibilidade do sistema antigo. ....	66
Figura 54 – Análise de Disponibilidade do sistema novo do enrolador de cabos.....	67

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do motor de indução de rotor bobinado.....	52
Tabela 2 - Dados do motor de indução do tipo gaiola de esquilo. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCM	Centro de controle do motor
IGBT	Transistor bipolar com porta isolada
PWM	Modulação por Largura de Pulsos
IHM	Interface homem máquina
RMS	Valor eficaz
CA	Corrente alternada.
CC	Corrente contínua.
MIT	Motor de indução trifásico.
CLP	Controlador Lógico Programável
E/S	Entrada/Saída
CPU	Unidade central de processamento
T <sub>p</sub>	Tempo de partida
SCRs	Retificador Controlado de Silício
MTTR	<i>Mean time to repair</i> (tempo médio de reparo)
MTBF	<i>Mean time between failures</i> ( tempo médio entre falhas)

## LISTA DE SÍMBOLOS

S	Escorregamento
f	Frequência da rede
$C_{mín}$	Conjugado mínimo de partida
$C_{máx}$	Conjugado máximo
$C_n$	Conjugado nominal
$\eta$	Rendimento
$P_c$	Perdas por aquecimento
TAP	Derivação de transformador
K	Contactora
cos	Fator de potência.
CV	Cavalo Vapor.
FEM	Força eletromotriz.
B	Vetor fluxo magnético
$\Theta$	Ângulo entre fluxo magnético e bobina
$\Delta$	Fechamento de motor em triângulo
Y	Fechamento de motor em estrela
$O_s$	Potência mecânica de saída
C	Conjugado ou torque
N	Velocidade nominal em rpm
KW	Potência em quilowatt
Nm	Newton metro
F <sub>s</sub>	Fator de Serviço
$n_{esc}$	Velocidade de escorregamento da máquina
$n_{sinc}$	Velocidade dos campos magnéticos
$n_m$	Velocidade mecânica do eixo do motor
N	Número de rotações em rpm

P	Número de pólos do motor
Rpm	Rotações por minuto
$\Phi_m$	Fluxo de magnetização (Wb)
Wb	Weber
V/f	Voltz/Hertz

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivos.....	18
1.1.1	Objetivos Específicos .....	18
1.2	Organização do trabalho .....	19
2	Motores elétricos de Indução Trifásicos.....	20
2.1	Definição.....	20
2.2	Forma Construtiva .....	21
2.3	Princípio de Funcionamento .....	22
2.4	Tipos de Motores de indução .....	24
2.4.1	Motor de indução com Rotor Gaiola de Esquilo .....	24
2.4.2	Motor de indução com Freio.....	26
2.4.3	Motor de Indução com Rotor Bobinado .....	27
2.5	Acionamento elétrico para motores de indução .....	29
2.5.1	Partida direta.....	29
2.5.2	Partida com Aceleração Rotórica .....	30
2.5.3	Partida Estrela Triângulo .....	32
2.5.4	Partida compensadora com Autotransformador.....	33
2.5.5	Partida com <i>Soft Starter</i> .....	34
2.5.6	Partida com Inversores de Frequência .....	36
2.5.6.1	Modos de controle.....	39
2.5.6.1.1	Controle Escalar.....	40
2.5.6.1.1	Controle Vetorial .....	41
2.5.6.2	Parâmetros dos inversores de Frequência.....	41
3	Estudo de Caso .....	44
3.1	Estudo de Caso: Sistema de Acionamento do Enrolador de Cabos do <i>Reclaimer</i> de Bauxita de uma indústria de Alumina. ....	44
3.1.1	Overview do sistema de Recuperação de materiais ( <i>Reclaimer</i> ) .....	44
3.1.2	Sistema do Enrolador de Cabos .....	45
3.1.3	Problemática Apresentada .....	46
3.1.4	Proposta de Melhoria.....	47
4	Metodologia.....	48
4.1	Métodos .....	48
4.2	Materiais .....	51
5	Resultados .....	59
5.1	Escolha do método de partida .....	59

5.2	Motor controlado por Inversor de Frequência.....	61
5.3	Análise de dados após a implementação do inversor de frequência .....	63
6	Conclusão .....	68
7	Referências Bibliográficas.....	70



# 1 INTRODUÇÃO

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de extraordinária importância econômica, uma vez que as máquinas rotativas são o elemento fundamental do processo produtivo das indústrias. As aplicações dessas máquinas vão desde a matéria prima até o produto final para o consumidor. Para isso, é necessário o controle e acionamento de variados equipamentos que necessitam de movimento.

O motor de indução trifásico é a principal fonte de movimento em aplicações industriais, visto que este possui uma vasta aplicabilidade, robustez, confiabilidade, preço baixo e reduzida manutenção quando em comparação com outras tecnologias (PAREKH, 2019).

Na partida, os motores elétricos solicitam da rede de alimentação uma corrente elevada, podendo atingir de 6 a 10 vezes o valor da sua corrente nominal. Essas características acarretam consequências negativas para o equipamento, visto que o sistema fica submetido a valores muito superiores aos limites calculados para o seu funcionamento normal, podendo ocasionar distúrbios operacionais para o equipamento (MAMEDE FILHO, 2013).

Um dos principais problemas causados pela elevada corrente de partida é o aquecimento causado nos motores, uma vez que este aquecimento provoca perdas excessivas nos enrolamentos estatóricos e rotóricos dos motores elétricos, resultando na redução da sua vida útil. A escolha de um sistema de partida eficiente pode ser considerada uma das regras básicas para se obter, do motor, uma vida útil maior além de custos com operação e manutenção reduzidos (MAMEDE FILHO, 2013).

Nos sistemas críticos do processo produtivo, existem diversas aplicações em que se faz necessário obter o controle da corrente de partida além da velocidade rotórica do motor. Os inversores de frequência entram nesse cenário como uma solução qualitativa para o controle dos motores elétricos. Neste caso, o motor é alimentado por tensão e frequência variáveis, possibilitando o controle da velocidade no eixo do motor (STEPHAN, 2008).

O acionamento de motores elétricos de indução por inversores de frequência é uma solução relativamente nova, porém, já amplamente utilizada na indústria (WEG, 2016). Com a redução dos preços dos componentes eletrônicos, o aumento da tecnologia, e o desenvolvimento da eletrônica de potência, o uso de inversor de frequência cresceu em diversos seguimentos industriais. O motor, que

antes era acionado por dispositivos com recursos limitados, pode ser acionado por equipamentos com soluções cada vez mais avançados (GURGEL, 2009).

Diante da notória importância dos motores de indução se faz jus um estudo mais aprofundado da aplicação desses motores, desde o princípio de funcionamento até os tipos de acionamento utilizados atualmente com o intuito de prevenir desgastes com os erros de aplicações e garantir uma maior confiabilidade nos equipamentos e nos processos produtivos. Esse estudo torna-se mais relevante, já que a maioria dos motores elétricos utilizados na indústria são de indução tipo gaiola de esquilo que de fato será o foco desse trabalho (MAMEDE FILHO, 2003).

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade do motor de indução trifásico na indústria produtora de Alumino, além de realizar um estudo a respeito das principais características dos seus dispositivos de partida destacando o uso dos inversores de frequência.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos têm-se:

- Demonstrar o princípio do funcionamento do motor elétrico e das principais características dos seus dispositivos de partida;
- Estudo de funcionamento e aplicação de inversores de frequência no acionamento de motores elétricos;
- Analisar a aplicação prática do inversor de frequência em equipamentos de processos críticos de uma indústria de Alumina.

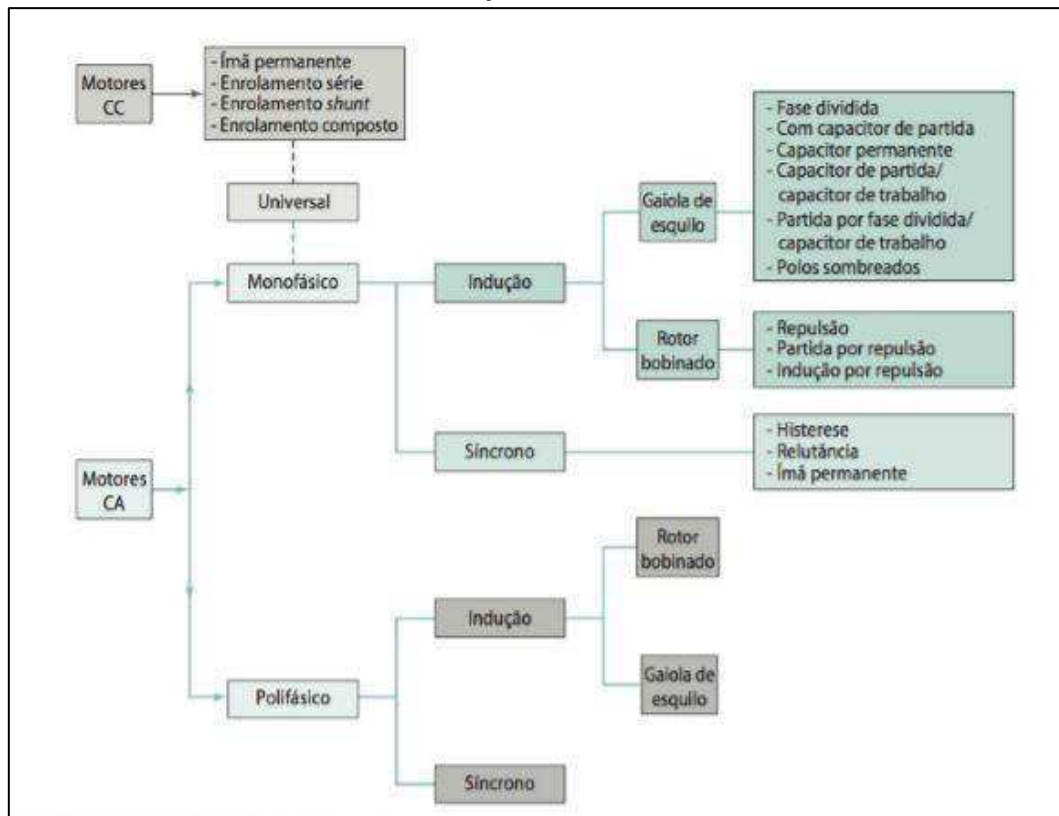
## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No desenvolvimento do trabalho, no Capítulo 2, é feita uma fundamentação teórica procurando explicitar o cenário dos motores de indução trifásico, o seu princípio de funcionamento, assim como os seus métodos de partida. Posteriormente, no Capítulo 3, é abordado o estudo de caso, sendo ele associado ao sistema de enrolador de cabos utilizado no *Reclaimer* de uma indústria. Em seguida, no Capítulo 4, é introduzida a metodologia e os materiais utilizados, quando são descritos os conceitos utilizados para análise. No capítulo 5, é realizada uma análise e discussão dos resultados obtidos para o estudo de caso. O trabalho é finalizado no Capítulo 6, com o encaminhamento das conclusões e proposta de refinamentos para pesquisas similares posteriores.

## 2 MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

O motor elétrico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica usando campos magnéticos que interagem entre si. Os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos, tomando o valor da tensão como base: corrente contínua e alternada. A tipologia e classificação dos motores elétricos são apresentados na Figura 1 (MAMEDE FILHO, 2003).

FIGURA 1- CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS



Fonte: (PETRUZELLA, 2013).

Como foi mostrado na Figura 1, há uma variedade na classificação e tipologia dos motores elétricos, cada um com a sua funcionalidade aplicada para uma variedade de operações nas áreas residenciais, comerciais e industriais. Este trabalho irá tratar mais especificamente dos motores elétricos de indução trifásicos, pela sua vasta aplicabilidade no mercado.

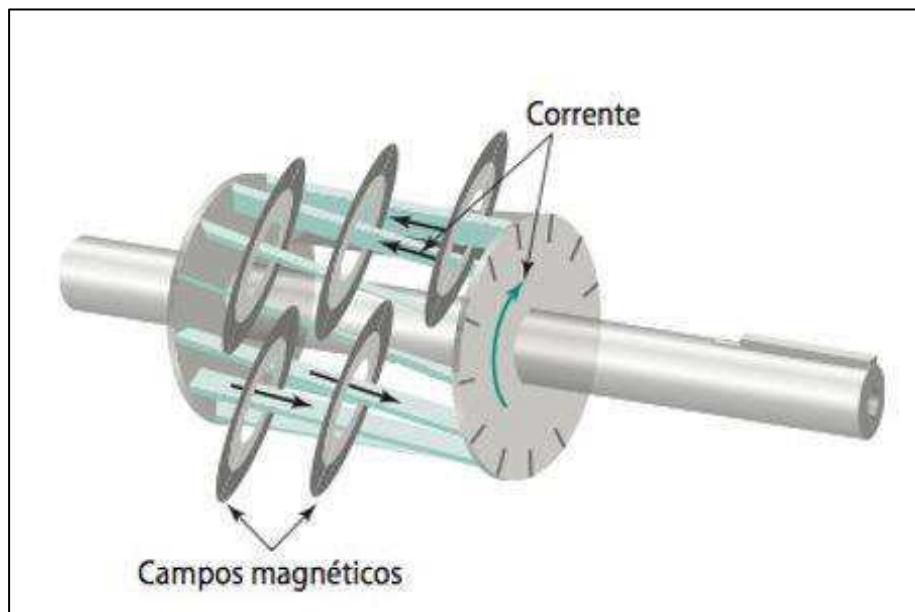
### 2.1 DEFINIÇÃO

Os motores elétricos assíncronos, ou também conhecidos por motores de indução são os mais utilizados na indústria visto que esse tipo de motor possui aspecto construtivo relativamente simples,

apresentando um menor custo quando comparado aos outros tipos de motores. As correntes rotóricas são geradas eletromagneticamente pelo estator, único elemento do motor ligado à linha de alimentação (FRANCHI,2008).

Os motores elétricos de indução, são assim chamados porque a corrente alternada do estator induz uma tensão através de uma abertura de ar dentro do enrolamento do rotor para produzir corrente no rotor através de um campo magnético associado. Os campos magnéticos do estator e do rotor interagem e fazem o rotor girar. A interação entre esses campos magnéticos pode ser vista na Figura 2 (PETRUZZELA, 2013).

FIGURA 2 - CORRENTE INDUZIDA NO ROTOR.

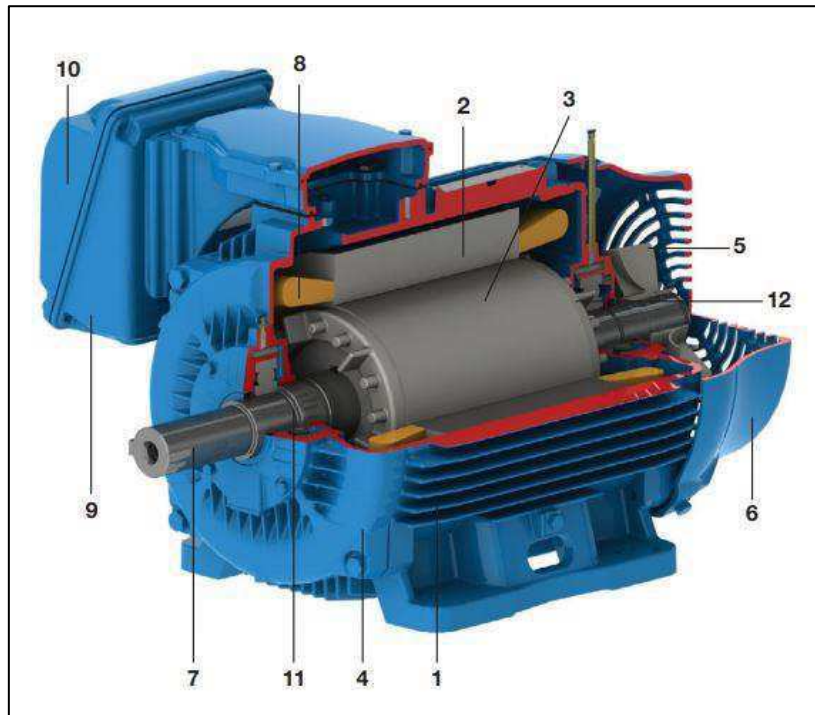


Fonte: (PETRUZZELA, 2013).

## 2.2 FORMA CONSTRUTIVA

O motor de indução trifásico é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor como pode ser visto na Figura 3.

FIGURA 3 - COMPONENTES DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO



Fonte: (WEG, 2008).

- De acordo com WEG (2008), o estator possui:
  - Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com superfície aletada e que tem como principal função suportar todas as partes fixas e móveis do motor.
  - Núcleo de chapas (2) – constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas ao estator.
  - Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.
- Mamede Filho (2003) cita as partes integrantes do rotor:
  - Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.
  - Núcleo de chapas (3) – constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas sobre o eixo.
  - Barras e anéis de curto-circuito (12) - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

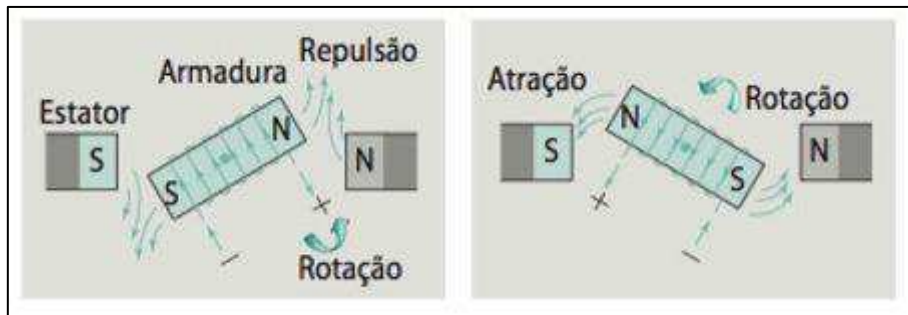
## 2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Conforme Petruzella (2013), o motor elétrico funciona com base nos princípios do eletromagnetismo e na sua relação com a corrente elétrica. A famosa lei do magnetismo em que os polos opostos se atraem (N-S) e os polos iguais se repelem (N-N ou S-S) possui forte relação para a geração da rotação do motor, atingindo o seu principal objetivo que é gerar movimento.

O motor de indução trifásico é composto de duas partes principais. A parte fixa, o estator, onde se localiza as bobinas de campo alimentados por corrente alternada. A parte móvel, o rotor, onde será induzida uma corrente pelo campo girante gerado pela armadura (PINHEIRO,2015).

Para um melhor entendimento de como é gerado o campo girante, considere um ímã permanente representando a parte fixa do motor (estator) e o eletroímã representando a parte móvel (rotor) como mostrado na Figura 4.

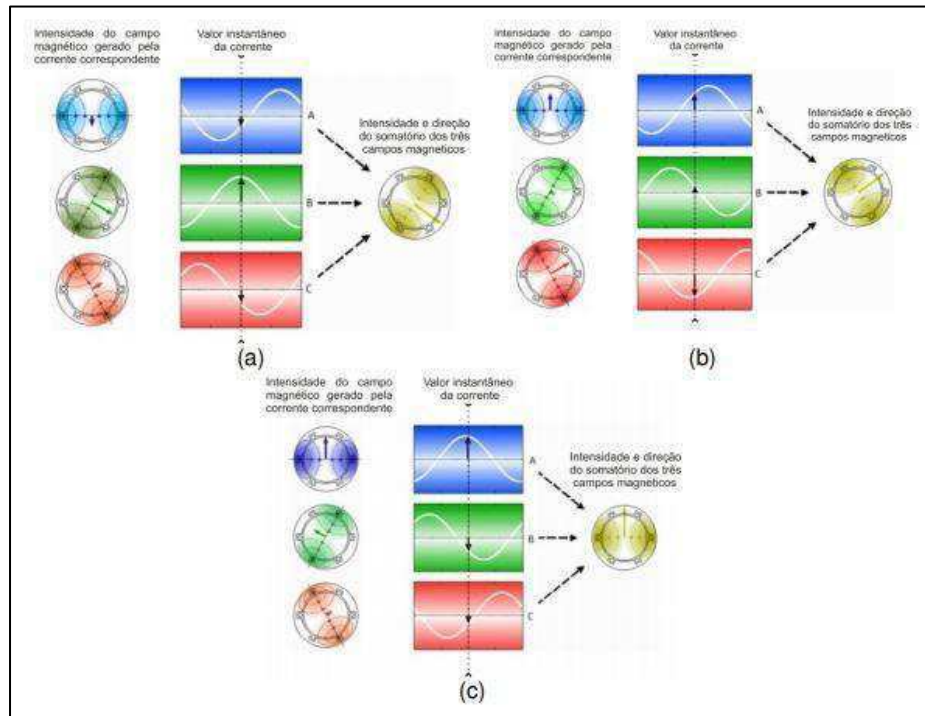
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR.



Fonte: (PETRUZZELLA, 2013).

A força de repulsão gerada entre os polos iguais acarretará em uma rotação do eletroímã, que será complementada posteriormente com a força de atração entre os polos opostos. Após o alinhamento dos polos, ocorre o processo chamado de comutação que consiste no processo de inversão da corrente de armadura, invertendo assim a polaridade do campo induzido. Através do processo de comutação, a rotação da parte móvel terá continuidade, visto que os polos da armadura e do campo que eram opostos, passarão a ser iguais, gerando uma força de repulsão, fazendo o rotor continuar a girar. A formação do campo magnético girante no estator pode ser vista na Figura 5 (PETRUZZELLA, 2013).

FIGURA 5 - CAMPO GIRANTE DO ESTATOR EM DIFERENTES INSTANTES. (A), (B) E (C)



Fonte: (GONÇALVES, 2012).

Os enrolamentos são excitados com correntes defasadas de  $120^\circ$ . Dessa forma, cada uma delas gera um campo magnético em determinada direção e com magnitude proporcional à magnitude da corrente passando em cada instante. Os campos magnéticos gerados estão representados pelos vetores correspondentes a cada fase e o campo resultante é a soma desses vetores (GONÇALVES, 2012).

De acordo com Mamede Filho (2003), o funcionamento do motor de indução consiste na formação do campo magnético rotativo produzido no estator pela passagem da corrente alternada em suas bobinas, uma vez que o haja a variação do fluxo, este induzirá correntes que irão se opor ao campo rotativo.

## 2.4 TIPOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores de indução são classificados de acordo com a configuração do seu rotor. Dessa forma, eles podem ser divididos em dois tipos: apresentando o rotor gaiola ou o rotor bobinado.

### 2.4.1 MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR GAIOLA DE ESQUILO

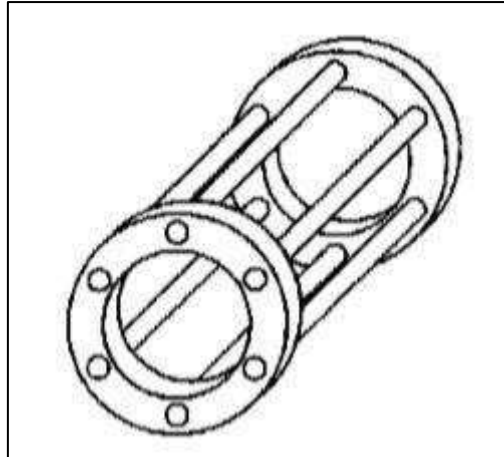
Segundo Franchi (2008), o motor de indução com rotor gaiola de esquilo é o mais utilizado atualmente nas aplicações industriais. Isso deve ao fato deste motor apresentar algumas vantagens



comparado as outras tipologias, tais como: devido a sua simples configuração, os menores preços e maior facilidade para manutenção.

A nomenclatura gaiola de esquilo vem da configuração do rotor que é constituído por um conjunto de barras de alumínio (condutores), dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores curto-circuitados como ilustra na Figura 6. (PETRUZZELA,2013).

FIGURA 6 - ROTOR GAIOLA DE ESQUILO



Fonte: (FRANCHI, 2008).

O estator do motor de indução é composto por um material ferromagnético laminado, como é mostrado na Figura 7, dos quais são colocados os enrolamentos que estão alimentados pela rede de alimentação trifásica. Essa alimentação direta no estator é o que vai resultar no campo magnético girante, força responsável pela rotação do rotor (FRANCHI, 2008).

FIGURA 7 - MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR GAIOLA DE ESQUILO



Fonte: (CHAPMAN,2013 apud *MagneTek, Inc.*).

### 2.4.2 MOTOR DE INDUÇÃO COM FREIO

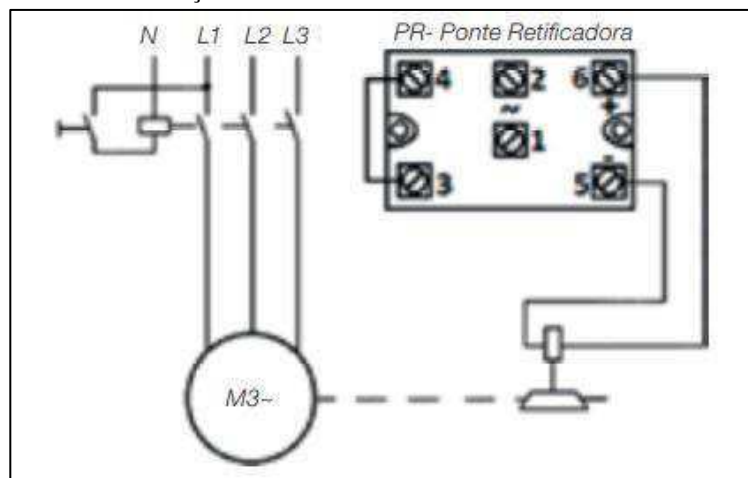
Os motores elétricos com freio, comercialmente chamados de motofreio, é formado por um motor trifásico de indução acoplado a um freio com disco. A aplicação do motofreio é restrita às atividades industriais, quando há necessidade de paradas rápidas para requisitos de segurança, bem como de precisão no posicionamento das máquinas (FRANCHI,2008).

O seu princípio de funcionamento consiste na alimentação da bobina do freio. Quando o motor é desligado da rede, é interrompida também a corrente da bobina do eletroímã e este para de atuar. As molas de pressão então empurram a armadura na direção do motor, fazendo com que o rotor (disco de frenagem) seja comprimido entre as duas superfícies de atrito (armadura e tampa), freando o motor (WEG,2016).

Dessa forma, os motofreios podem ser divididos em duas categorias:

- Ligação para frenagem normal: a alimentação da ponte retificadora da bobina do freio pode ser realizada diretamente a partir dos terminais do motor, sem interrupção, conforme mostrado na Figura 8. (WEG,2016):

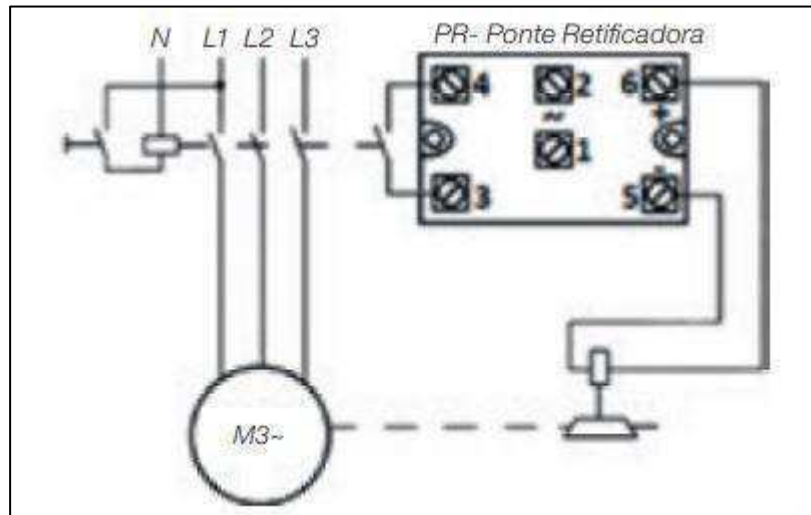
FIGURA 8 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO NA PONTE RETIFICADORA PARA FRENAGEM NORMAL.



Fonte: (WEG, 2016).

- Ligação para frenagem rápida: Nesse caso, ponte retificadora é alimentada a partir da rede local por meio da corrente alternada. Esse circuito deve ser conectado a um contato auxiliar do comando do motor para que o freio seja ligado ou desligado juntamente com o motor, como mostra a Figura 9. (FRANCHI, 2008).

FIGURA 9 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO NA PONTE RETIFICADORA PARA FRENAGEM RÁPIDA.



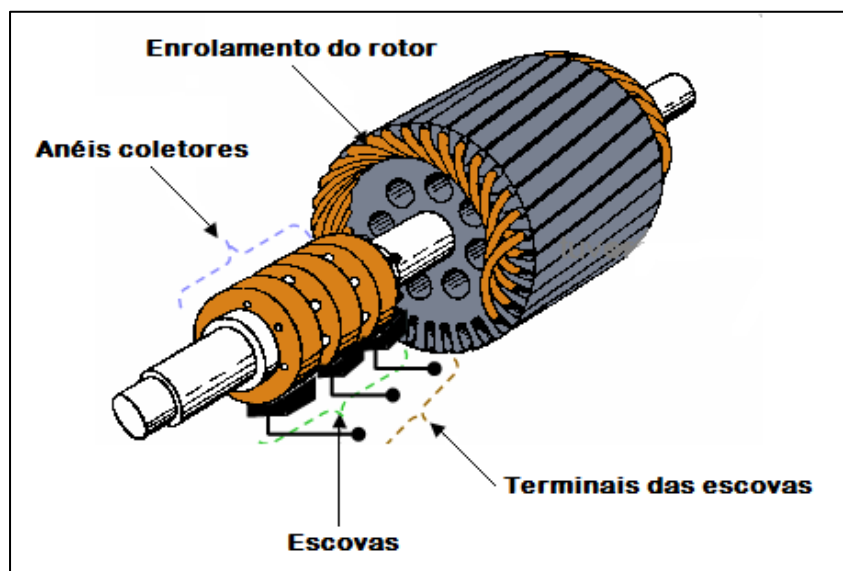
Fonte: (WEG,2016).

#### 2.4.3 MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR BOBINADO

O motor de indução de rotor bobinado, também chamado de motor de anéis coletores é uma variação do motor de indução de gaiola de esquilo. A principal diferença consiste na constituição do seu rotor, que acarreta em características particulares desse tipo de motor.

Conforme Mamede Filho (2003), a composição do rotor bobinado confere em um conjunto de bobinas normalmente interligadas, em configuração estrela, com os terminais conectados a três anéis coletores, presos mecanicamente ao eixo do motor e isoladas eletricamente. A composição do rotor bobinado pode ser visto na Figura 10.

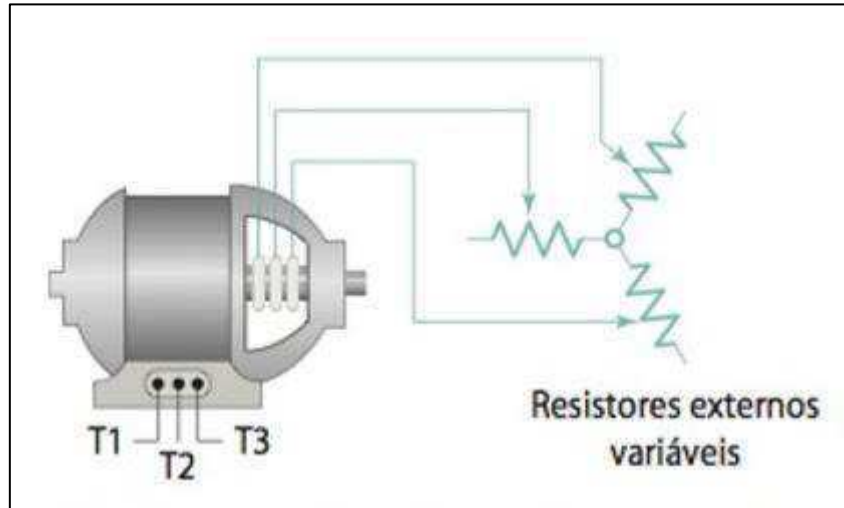
FIGURA 10 - ROTOR BOBINADO



Fonte: (FRANCISCO, 2006).

Os três anéis de deslizamento são ligados exteriormente a um reostato de partida constituído por três resistências variáveis, ligadas também em estrela, como mostra a Figura 11. Desse modo, os enrolamentos do rotor também ficam em circuito fechado (FRANCHI, 2008).

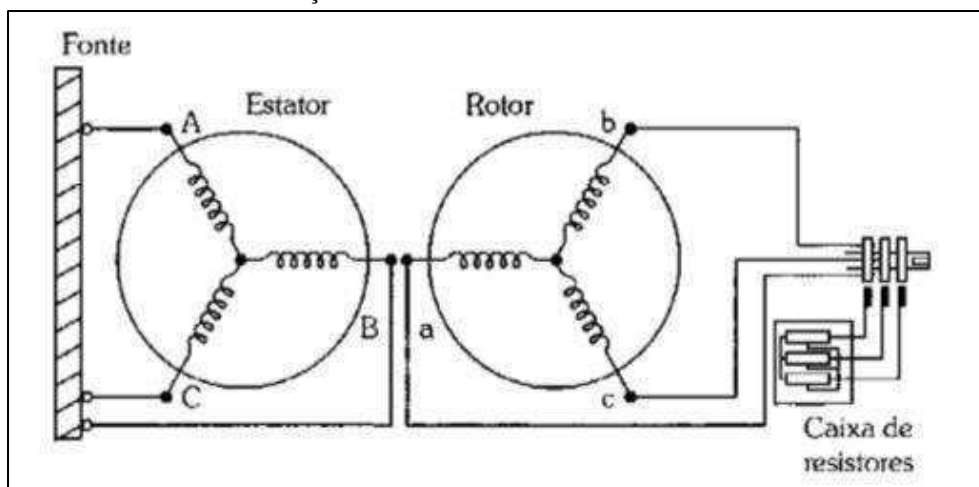
FIGURA 11 - MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO.



Fonte: (PETRUZELLA, 2013).

A função do reostato de partida, ligado aos enrolamentos do rotor, é reduzir as correntes de partida elevadas, no caso de motores de elevada potência. À medida que o motor ganha velocidade, as resistências são, progressivamente, retiradas do circuito até ficarem curto-circuitadas (retiradas), quando o motor passa a funcionar no seu regime nominal, como na Figura 12. Ao atingir o seu regime nominal, o motor de rotor bobinado funciona tal como o motor de rotor em gaiola com os elementos do rotor em curto circuito (FRANCHI, 2008).

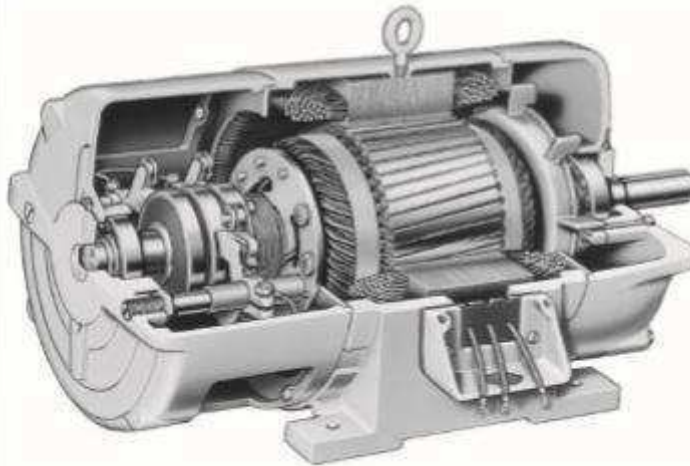
FIGURA 12 - LIGAÇÕES DO MOTOR DE ROTOR BOBINADO.



Fonte: (FRANCHI, 2008).

Segundo Petruzella (2013), um motor de rotor bobinado é usado para aplicações de velocidade constante que requerem um torque de partida mais intenso do que o obtido com o tipo gaiola, visto que as resistências secundárias são selecionadas para proporcionar curvas de torque ótimas e elas podem ser dimensionadas para suportar a carga de energia sem falhas. Por esta razão, os motores do tipo rotor bobinado são frequentemente usados em capacidades maiores, em vez dos motores tipo gaiola de esquilo. A Figura 13 apresenta a vista em corte de um motor de rotor bobinado.

FIGURA 13 - VISTA EM CORTE DE UM MOTOR DE ROTOR BOBINADO.



Fonte: (CHAPMAN,2013 apud *MagneTek, Inc.*).

## 2.5 ACIONAMENTO ELÉTRICO PARA MOTORES DE INDUÇÃO

Segundo Mamede Filho (2003), no momento da partida do motor, o sistema fica submetido a uma queda de tensão normalmente muito superior aos limites estabelecidos para o funcionamento da máquina em regime. Essa situação pode acarretar em distúrbios sérios para a operação do motor. Em virtude disso, existem diferentes métodos de partidas com o intuito de regular a corrente inicial do motor. Dentre elas:

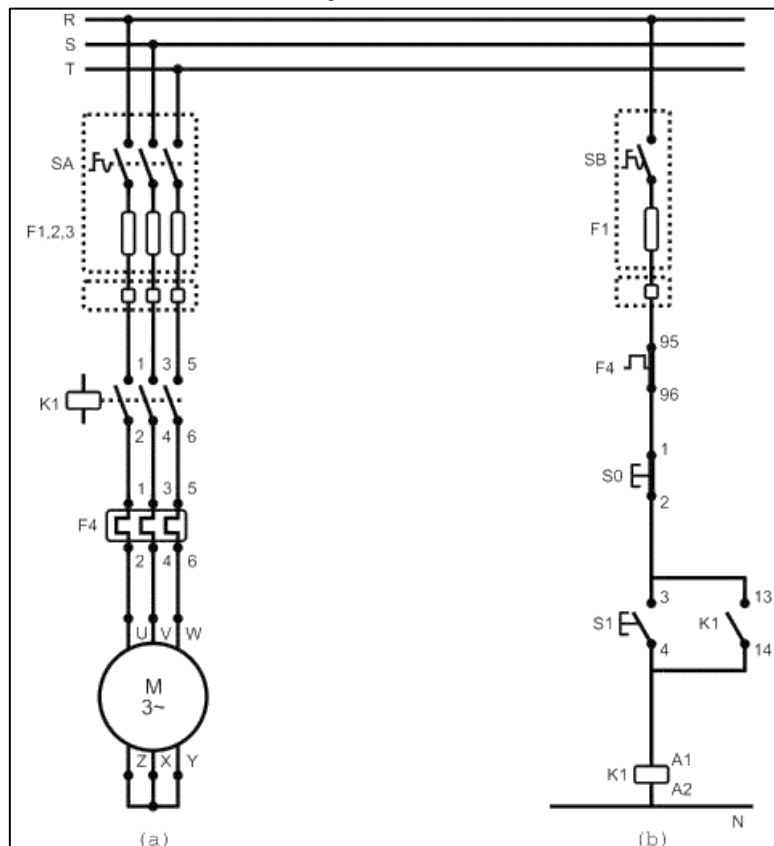
### 2.5.1 PARTIDA DIRETA

A partida direta é a forma mais simples de partir um motor elétrico, na qual as três fases são ligadas diretamente ao motor, ocasionando um pico de corrente. A simplicidade consiste no fato que não são empregados dispositivos especiais de acionamento do motor. São utilizados apenas

contatores, disjuntores ou chaves interruptoras que possibilitem a alimentação do motor com plena tensão no instante da partida (PINHEIRO, 2015).

O sistema de partida direta está representado na Figura 14 através do diagrama de força e de comando.

FIGURA 14 - DIAGRAMA DE FORÇA E COMANDO DE UMA PARTIDA DIRETA.



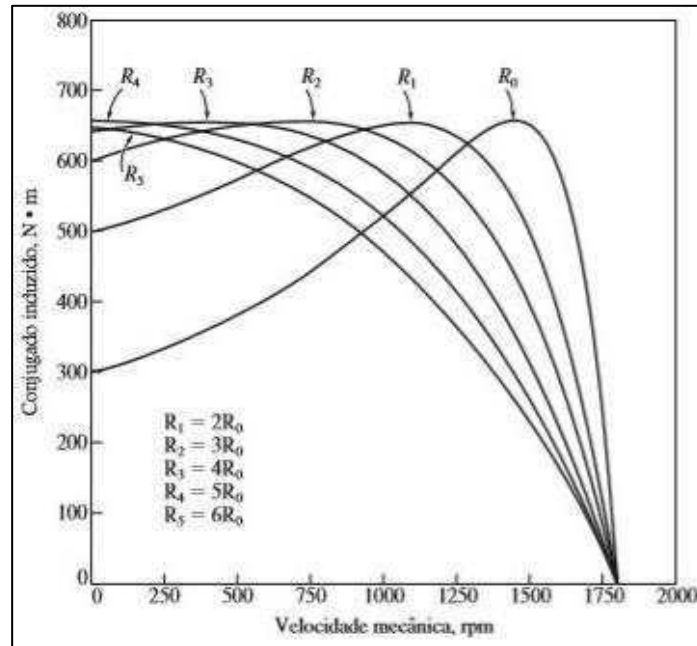
Fonte: Guia de Instalações Eléctricas Industriais – UFCG

### 2.5.2 PARTIDA COM ACELERAÇÃO ROTÓRICA

Partida com aceleração rotórica é um sistema de partida que só é permitido para motores com rotor bobinado, pois a corrente de partida é controlada por meio da inserção de resistores em série com as bobinas do rotor do motor (MAMEDE FILHO, 2003).

Seu funcionamento baseia-se na inserção da resistência total no circuito rotórico durante a partida, para reduzir a corrente induzida de partida e simultaneamente o fator de potência, aumentar o conjugado de partida e controlar a velocidade até seu valor nominal (PETRUZELLA,2013). A Figura 15 apresenta a variação de velocidade do motor através da variação da resistência em série com o rotor.

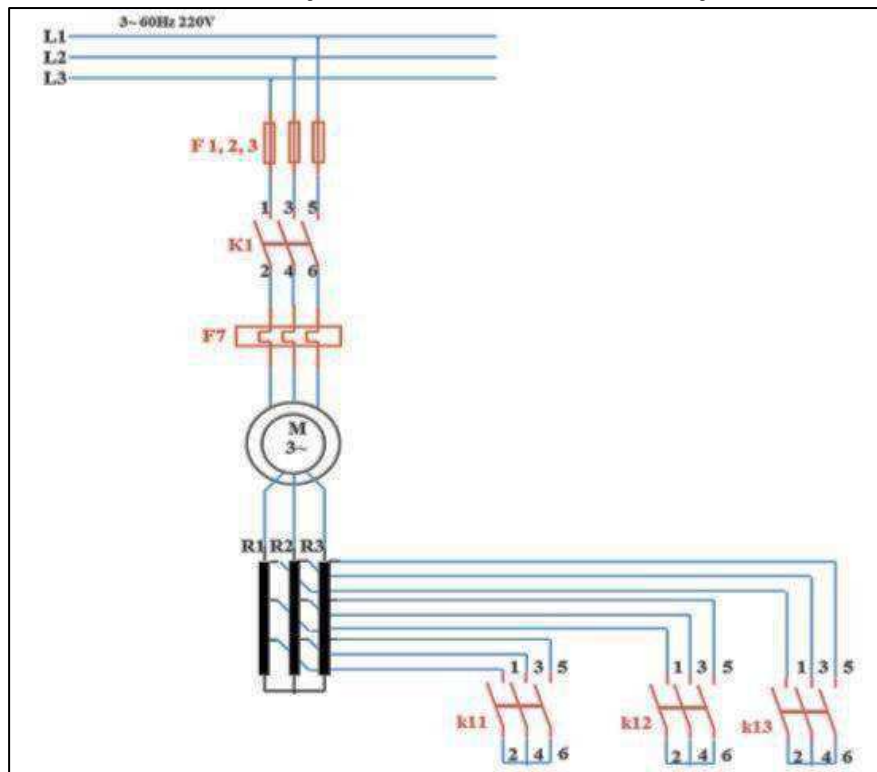
FIGURA 15 - CONTROLE DE VELOCIDADE POR VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ROTOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Na medida em que o motor vai ganhando velocidade, o reostato deve diminuir sua resistência progressivamente até atingir o menor valor possível e então o mesmo deve ser curto-circuitado quando o motor atinge a rotação nominal (CHAPMAN, 2013). A Figura 16 apresenta o diagrama de força da partida por aceleração rotórica.

FIGURA 16 - DIAGRAMA DE FORÇA DA PARTIDA POR ACELERAÇÃO ROTÓRICA.



Fonte: (MORAES, 2014).

### 2.5.3 PARTIDA ESTRELA TRIÂNGULO

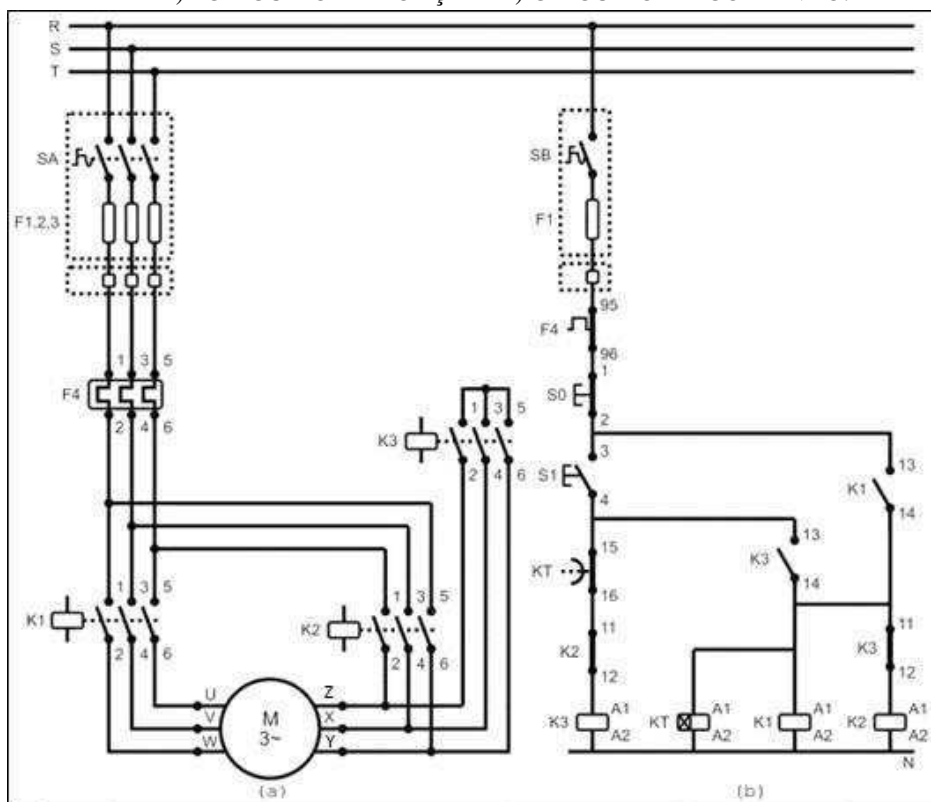
A partida estrela-triângulo pode ser usada como forma de suavizar os efeitos de partida dos motores elétricos, principalmente em casos que exijam torques maiores. Este tipo de ligação exige seis terminais no motor e serve para quaisquer tensões nominais duplas, desde que a segunda seja igual à primeira multiplicada por  $\sqrt{3}$  (PETRUZELLA,2013).

O procedimento para o acionamento do motor é feito inicialmente ligando-o na configuração estrela, mas aplicando-se a menor tensão da placa até que este alcance de 85 a 90% da velocidade de regime, quando então esta conexão é desfeita e executada a ligação em triângulo também aplicando a mesma tensão (PINHEIRO, 2015).

Durante a partida em estrela, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidos a 1/3 de seus valores nominais. Neste caso, um motor só pode partir através de chave estrela-triângulo quando o seu conjugado, na ligação em estrela, for superior ao conjugado da carga do eixo, caso contrário, quando o motor estiver em estrela, ele terá seu rotor bloqueado pela carga piorando todo o sistema de acionamento (FRANCHI,2008). A Figura 17 apresenta o diagrama de força e comando para partida estrela triângulo.

FIGURA 17 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO PARA PARTIDA ESTRELA TRIÂNGULO TEMPORIZADO A CONTACTOR.

A) CIRCUITO DE FORÇA E B) CIRCUITO DE COMANDO.





#### 2.5.4 PARTIDA COMPENSADORA COM AUTOTRANSFORMADOR

A partida compensadora alimenta as bobinas do motor com tensão reduzida na partida. A redução da tensão é feita por meio da ligação de um auto-transformador em série com as bobinas. Após realizada a partida, as bobinas do motor recebem tensão nominal (PETRUZELLA, 2013)

A redução da corrente de partida depende do Tap em que estiver ligado o autotransformador (FRANCHI, 2008).

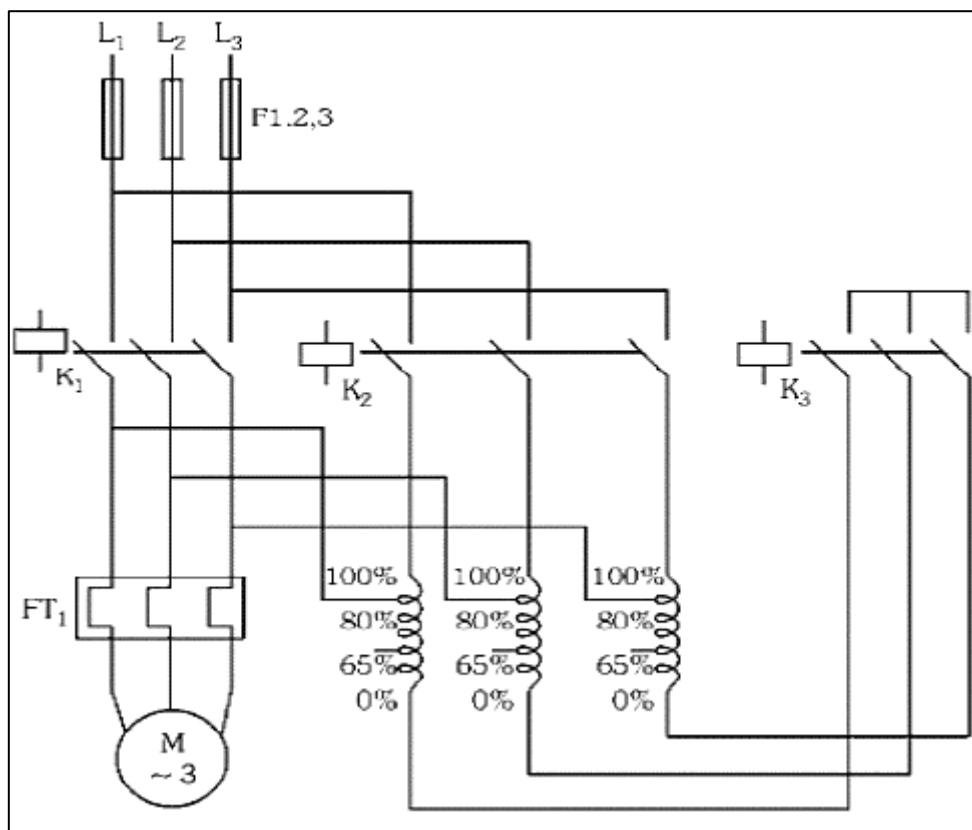
TAP 50% - redução para 25% do seu valor de partida direta;

TAP 65% - redução para 42% do seu valor de partida direta;

TAP 80% - redução para 64% do seu valor de partida direta.

Normalmente, este tipo de partida é empregado em motores de potência elevada, acima de 15 CV, acionando cargas com alto índice de atrito, tais como britadores, máquinas acionadas por correias, calandras e semelhantes. A Figura 18 mostra o circuito de potência da chave de partida compensadora. (FRANCHI,2008).

FIGURA 18- DIAGRAMA DE FORÇA DE UMA PARTIDA COMPENSADORA COM AUTOTRANSFORMADOR.

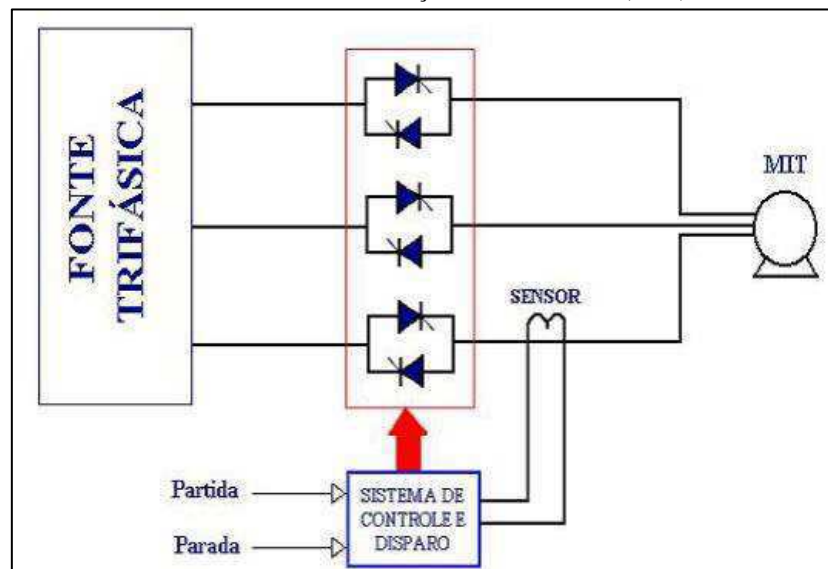


Fonte: CEMIG,2018.

### 2.5.5 PARTIDA COM *SOFT STARTER*

Conforme Rosa (2003), o funcionamento das *soft-starters* está baseado na utilização de SCRs (tiristores) dispostos em uma ponte na configuração antiparalelo, que é comandada por uma placa eletrônica de controle, a fim de ajustar a tensão de saída. A tensão na partida é reduzida através do ângulo de condução dos tiristores, diminuindo os picos de corrente gerados pela inércia da carga mecânica. O esquema genérico de um *soft-starter* é mostrado na Figura 19.

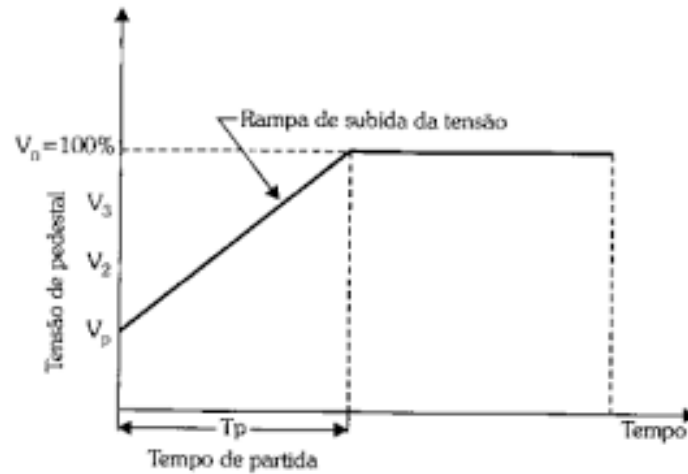
FIGURA 19 - ESQUEMA DE UM *SOFT-STARTER* IMPLEMENTADO COM 6 TIRISTORES PARA ACIONAR UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT).



Fonte: (ROSA, 2003).

A tensão de partida, responsável pelo torque inicial que aciona a carga, poderá ser ajustado a partir de uma configuração no *soft-starter*. Essa configuração permite que o valor de tensão inicie num valor  $V_p$  até atingir a tensão de linha do sistema, em determinado tempo que também é parametrizável. Para esta função dá-se o nome de rampa de tensão na aceleração, que está representado na Figura 20 (FRANCHI,2008).

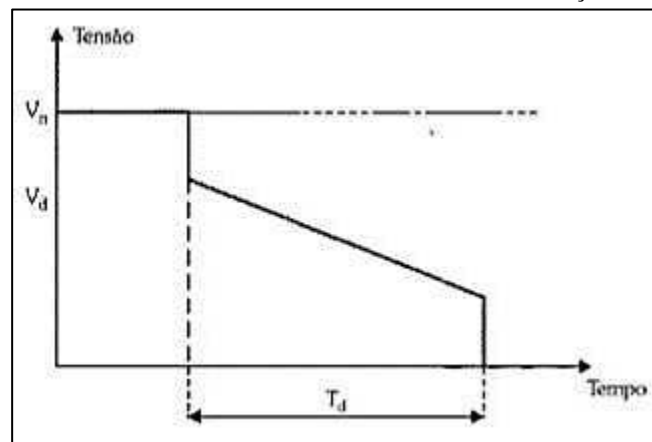
FIGURA 20 - RAMPA DE TENSÃO NA ACELERAÇÃO.



Fonte: (FRANCHI, 2008).

Da mesma maneira que as *soft-starters* permitem o acionamento suave do motor, também podem executar uma parada suave. Na parada controlada, a *soft-starter* reduz gradualmente a tensão de saída até um valor mínimo em um tempo predefinido, como mostra a Figura 21 (WEG,2013).

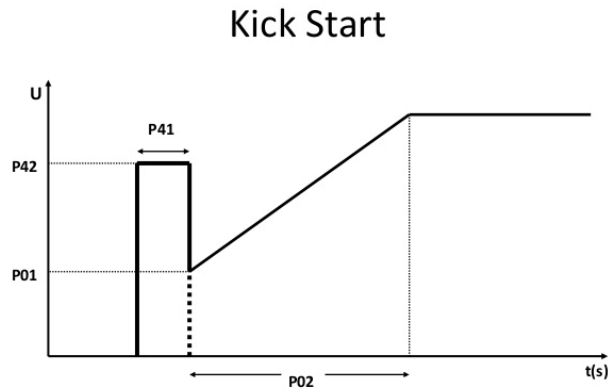
FIGURA 21 - RAMPA DE TENSÃO NA DESACELERAÇÃO.



Fonte: (FRANCHI, 2008).

As chaves de partida estáticas, *soft-starters*, são providas de uma função chamada pulso de tensão de partida (*kick start*) com um valor ajustável, valor este que deve ser suficiente para que o conjugado motor possa vencer o conjugado resistente da carga. Essa função faz com que seja aplicado ao motor um pulso de tensão com amplitude e duração programáveis para que o motor possa desenvolver um conjugado de partida suficiente para vencer o atrito e acelerar a carga. O Pulso de tensão de partida pode ser visto na Figura 22 (FRANCHI, 2008).

FIGURA 22 - KICK START



Fonte: (WEG).

O diferencial da utilização das *soft-starters* está na atuação da proteção do motor, visto que este método permite o usuário visualizar o ocorrido através da emissão de mensagens de erros e alarmes. Dessa forma, o uso dos *soft-starters* não fica restrito a partida de motores de indução, visto que elas também podem garantir ao motor toda a proteção necessária, através do ajuste dos limites de corrente, tanto sobrecorrentes quanto subcorrente do motor (WEG,2013).

#### 2.5.6 PARTIDA COM INVERSORES DE FREQUÊNCIA

De acordo com WEG (2016), a utilização de inversores estáticos de frequência atualmente compreende o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina.

O torque desenvolvido pelo motor de indução é indicado pela equação 1:

$$T = k_1 \cdot \Phi_m \cdot I_2. \quad (1)$$

E o seu fluxo magnetizante, através da equação 2, desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos estatóricos:

$$\Phi_m = k_2 \cdot \frac{V_1}{f_1}, \quad (2)$$

onde:

T: torque ou conjugado disponível na ponta de eixo (N.m)

$\Phi_m$ : fluxo de magnetização (Wb)

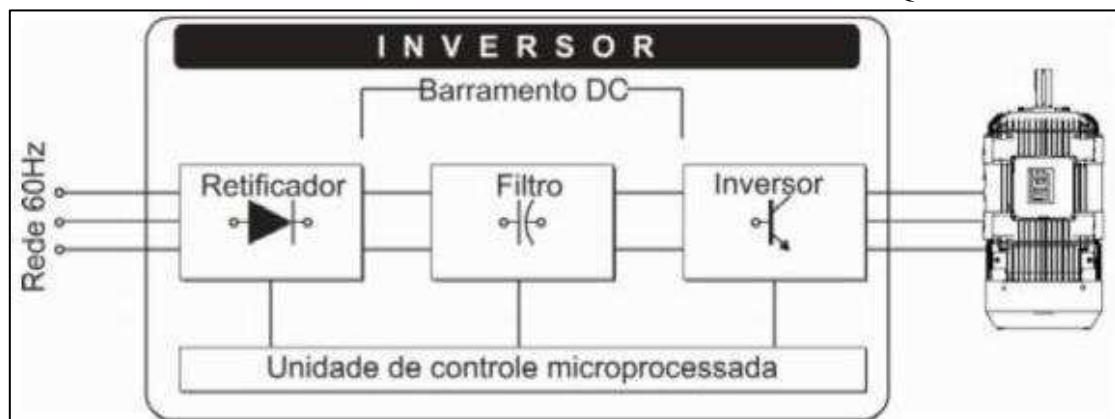
$I_2$ : corrente rotórica (A) depende da carga

$V_1$ : tensão estatórica (V)

$k_1$  e  $k_2$ : constantes e dependem do material e do projeto da máquina

Admitindo-se, que a corrente depende da carga e que essa é constante (portanto, corrente praticamente constante), percebe-se, que variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação, o fluxo e, conseqüentemente, o torque permanecem constantes. Com isso quando se deseja variar a velocidade devemos pensar em uma forma de variar a frequência, e nessa problemática que entra o inversor de frequência. O diagrama de blocos da Figura 23 mostra as partes componentes deste dispositivo (FRANCHI, 2008).

FIGURA 23 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

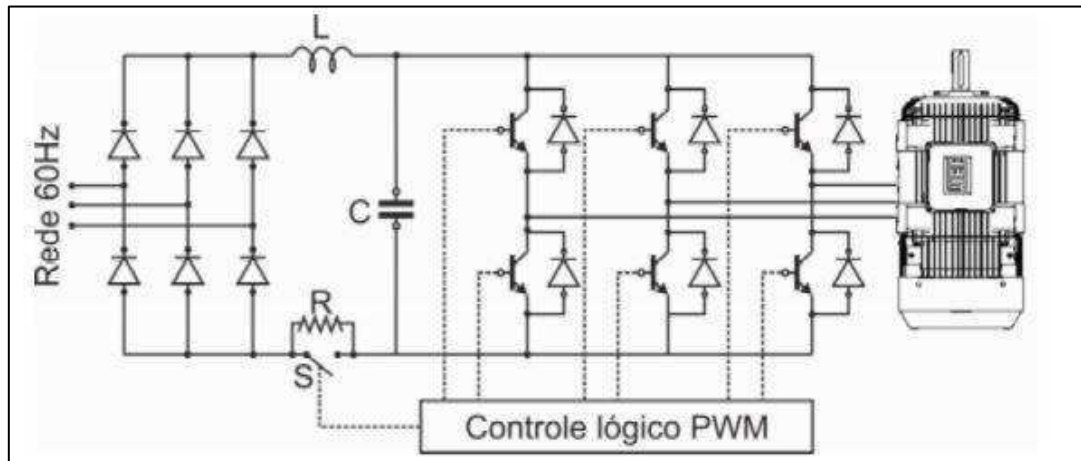


Fonte: (PINHEIRO, 2015).

Os inversores de frequências operam como uma interface entre a fonte de energia (rede) e o motor de indução. Segundo a WEG (2016), o processo de obtenção da tensão e frequência desejadas por meio de tais equipamentos passa por três estágios, como pode ser visto na Figura 24:

- Ponte de diodos - Retificação do sinal alternado - de tensão e frequência constantes - proveniente da rede de alimentação;
- Filtro ou Link DC - Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- Transistores IGBT - Inversão da tensão contínua proveniente do link DC num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis.

FIGURA 24 - COMPONENTES INTERNOS DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA.



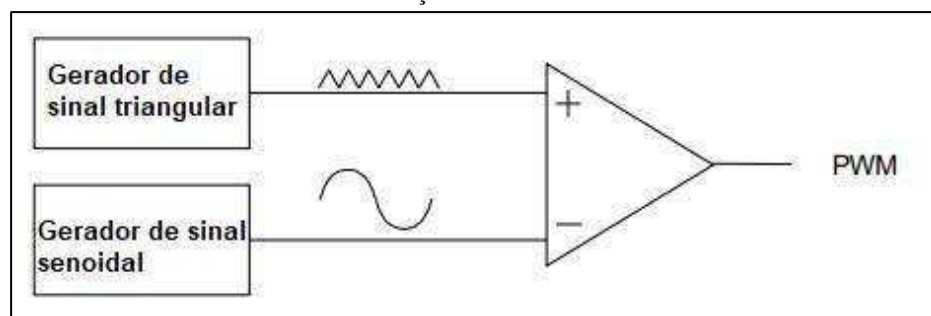
Fonte: (PINHEIRO,2015).

Dependendo da combinação de chaves abertas ou fechadas pode-se obter na saída do inversor, formas de onda diferentes. Estas chaves são implementadas nos inversores de frequência com dispositivos semicondutores chamados de transistores de potência. Os transistores mais frequentemente utilizados são os chamados IGBT ou transistor bipolar de porta isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (PINHEIRO, 2015).

O circuito de comando dos transistores de potência é o elemento responsável pela geração dos pulsos de controle de sinais a partir do uso de microcontroladores digitais. Atuando sobre a taxa de variação do chaveamento das bases dos transistores, controla-se a frequência do sinal trifásico gerado (FRANCHI, 2008).

Os inversores de frequência modernos utilizam para a combinação de abertura e fechamento das chaves uma estratégia chamada de "PWM" (*Pulse Width Modulation*) ou Modulação por Largura de Pulsos. Essa estratégia é aplicada através da combinação de uma onda triangular e uma onda senoidal produzindo a forma de onda de frequência variável desejada, essa relação é mostrada na Figura 25 (PINHEIRO, 2015).

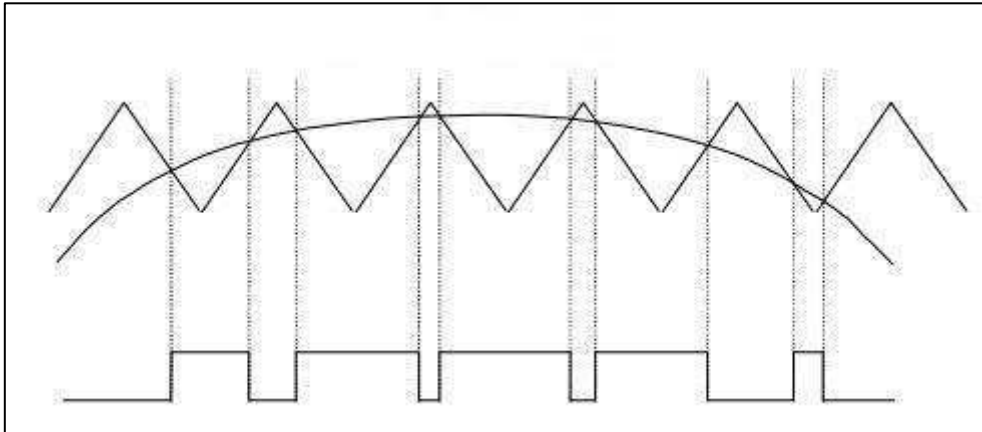
FIGURA 25 - GERAÇÃO DE SINAL PWM.



Fonte: Adaptado (ROCKWELL, 2000).

O sinal triangular é a portadora ou a frequência de comutação do inversor. Na Figura 26 é mostrada a saída da tensão no gerador PWM. O gerador de modulação produz uma onda senoidal sinal que determina a largura dos pulsos e, portanto, a tensão de saída RMS do inversor (ROCKWELL, 2000).

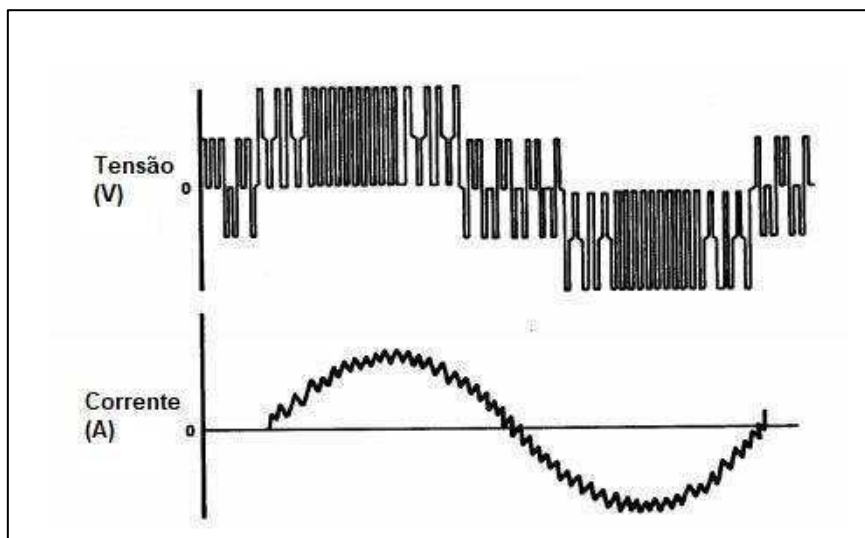
FIGURA 26 - SAÍDA DO GERADOR PWM



Fonte: Adaptado (ROCKWELL, 2000).

A Figura 27 mostra o padrão de chaveamento da tensão e a corrente resultante numa fase do motor, quando utilizada a técnica PWM para comando dos transistores de potência.

FIGURA 27 - FORMAS DE ONDA GERADAS PELO CHAVEAMENTO DOS TRANSISTORES COM TECNOLOGIA PWM.



Fonte: Adaptado (ROCKWELL,2000).

#### 2.5.6.1 MODOS DE CONTROLE

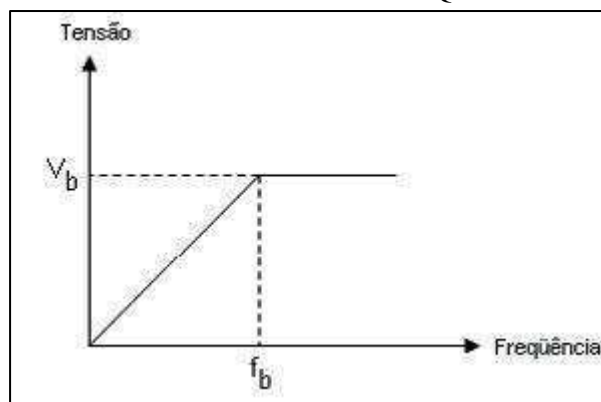
Basicamente existem dois tipos de controle dos inversores eletrônicos:

- o escalar;
- o vetorial.

#### 2.5.6.1.1 CONTROLE ESCALAR

O controle escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência: impõe no motor uma determinada tensão/frequência como mostrado na Figura 28. Com o intuito de manter a relação  $V/f$  constante o motor trabalha com fluxo aproximadamente constante (FRANCHI, 2008).

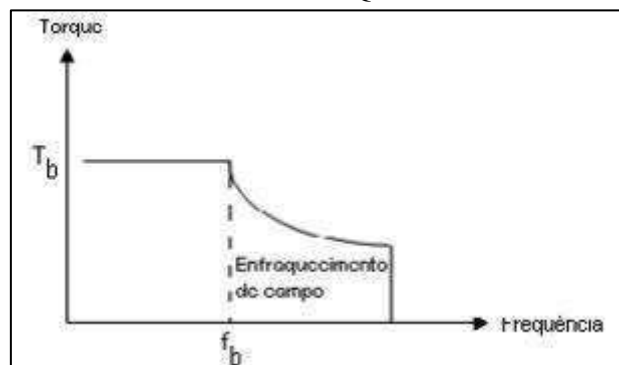
FIGURA 28 - GRÁFICO TENSÃO X FREQUÊNCIA.



Fonte: (WEG, 2016).

Como pode-se notar acima de  $f_b$  a tensão não pode continuar subindo, pois já foi atingida a tensão máxima (tensão da rede). É assim que a partir deste ponto a corrente, e conseqüentemente o torque do motor, diminuirão. Esta região é conhecida como região de enfraquecimento de campo. A Figura 29 mostra o gráfico do torque em função da frequência onde fica em evidência este comportamento. (WEG, 2016).

FIGURA 29 - REGIÃO DE ENFRAQUECIMENTO DO CAMPO.



Fonte: WEG,2016.



Dessa forma, o controle escalar é aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade e é particularmente interessante quando há conexão de múltiplos motores a um único inversor. O controle é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, que varia em função da carga, já que a frequência no estator é imposta (FRANCHI, 2008).

#### 2.5.6.1.1 CONTROLE VETORIAL

Segundo Mamede Filho (2003), o controle vetorial possibilita o motor operar com uma elevada precisão de velocidade e do conjugado através do controle da corrente do próprio motor. Esse tipo de controle é mais utilizado em aplicações que exijam controles maiores de velocidade. Dessa forma, o inversor de controle vetorial determina a corrente do estator, a de magnetização e a corrente necessária para gerar o torque requerido do motor.

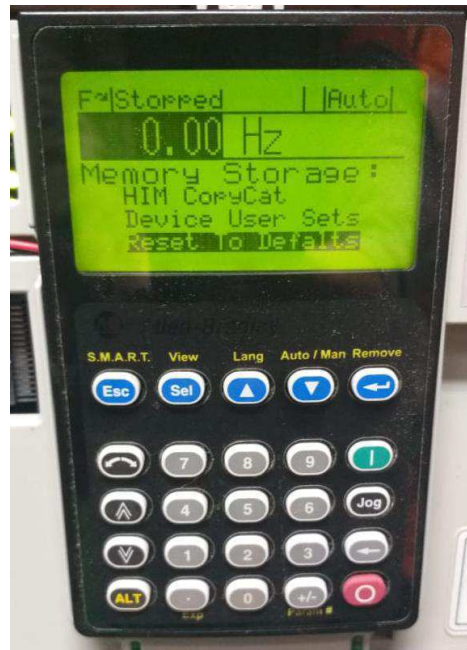
De acordo com WEG (2016), no que consiste a fabricação dos inversores de frequência com controle vetorial, podem ser em duas versões:

- Com sensor de velocidade – requer a instalação de um sensor de velocidade (*encoder*) no motor. Este tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive em rotação zero.
- *Sensorless* – mais simples que o controle com sensor, porém, apresenta limitações de torque principalmente em baixíssimas rotações.

#### 2.5.6.2 PARÂMETROS DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Conforme Pinheiro (2015) um parâmetro do inversor de frequência é um valor de leitura ou escrita, através do qual o usuário pode ler ou programar valores que mostrem, sintonizem ou adequem o comportamento do inversor e motor em uma determinada aplicação. Estes parâmetros são acessíveis através de uma interface composta por um mostrador digital (“*display*”) e um teclado, chamado de Interface Homem-Máquina (IHM). Na Figura 30 é mostrada a IHM do inversor de frequência *PowerFlex* da *AllenBradley*.

FIGURA 30 - INTERFACE HOMEM MÁQUINA (IHM) - ALLEN BRADLEY .



Fonte: (Autora, 2019).

A WEG (2005) apresenta os principais parâmetros do inversor de frequência:

- Parâmetros de leitura: permitem visualizar os valores programados nos parâmetros de regulação, de configuração, do motor e das funções especiais.
- Parâmetros de regulação: São os valores ajustáveis a serem utilizados pelas funções do inversor.
- Parâmetros de configuração: Definem as características do inversor, as funções a serem executadas, bem como as funções das entradas e saídas.
- Parâmetros do motor: São os parâmetros obtidos da placa do motor utilizado para a realização do controle.

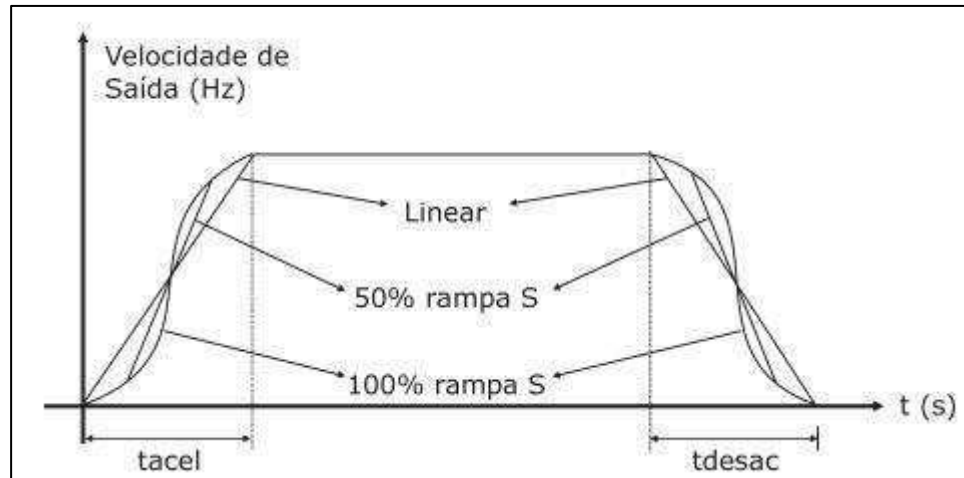
Um fator diferencial do uso dos inversores de frequência consiste na aceleração/desaceleração controlada em forma de rampa, como mostrado na Figura 31. Este recurso possibilita um menor desgaste aos componentes do motor, uma vez que as rampas permitem ao usuário do inversor modificar a velocidade de rotação do motor de forma controlada. Através da especificação do valor de tempo e velocidade final é possível controlar a aceleração e desaceleração do motor. (WEG, 2005).

Conforme a WEG (2005), os inversores possuem normalmente dois tipos de rampas:

- Rampa linear: é a mais simples, e indicada para cargas com pouca inércia. Na transição da velocidade zero para a rampa e da rampa para a velocidade final.

- A rampa “S” é um recurso no qual se permite obter a aceleração/desaceleração de cargas onde se necessita de uma partida/parada de forma suave, não ocorrendo choques mecânicos no sistema.

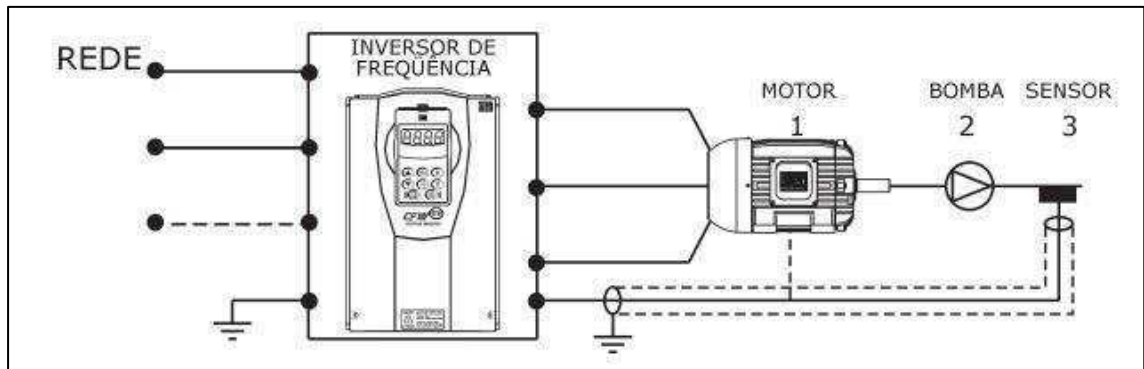
FIGURA 31 - RAMPA DE ACELERAÇÃO/DESACELERAÇÃO EM RAMPA S.



Fonte: (WEG,2005).

A Figura 32 apresenta o diagrama de ligação do uso do inversor de frequência no acionamento de motores elétricos.

FIGURA 32 - APLICAÇÃO DO USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.



Fonte: (WEG, 2005).

## 3 ESTUDO DE CASO

### 3.1 ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE ACIONAMENTO DO ENROLADOR DE CABOS DO *RECLAIMER* DE BAUXITA DE UMA INDÚSTRIA DE ALUMINA.

#### 3.1.1 OVERVIEW DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS (*RECLAIMER*)

O processo produtivo industrial é marcado pelo manuseio de materiais, e este sistema deve operar sempre em altíssimas exigências de confiabilidade, produtividade e desempenho dos equipamentos. É neste contexto que o *Reclaimer* por ser um dos principais braços funcionais deste universo, recebe muitos investimentos em pesquisas ao decorrer dos anos (TUNES, 2014).

Máquinas de elevação e transporte são parte integrante do equipamento mecânico de toda empresa industrial moderna. Elas são empregadas para mover cargas em estabelecimentos ou áreas, fábricas e indústrias, nos locais de construções, de armazenagem e recarga.

Trata-se de um equipamento que tem por finalidade retomar/recuperar (por meio da roda de caçamba) o material que havia sido empilhado no pátio pelo *Stacker*. A recuperação do material feita no *Reclaimer* é através do giro da roda de caçamba além do movimento de translação para se aproximar ou se afastar da pilha de material, e assim controlar o fluxo de material despejado nas correias transportadoras (CHAVES *et al*, 2012). Na Figura 33 pode ser observado o *Reclaimer* de Bauxita.

FIGURA 33 - RECUPERADORA DE BAUXITA DE UMA INDÚSTRIA DE ALUMINA.



Fonte: (Autora,2019).

Como pode ser observado no equipamento, através dos componentes mostrados e pelo uso conjunto de transportadores de correia, dos quais detém alta capacidade de produção, com a característica de participar de um processo contínuo. Cada componente – translação, giro, roda de caçambas, enrolador de cabos, elevação e correias – possui um sistema de acionamento individual. Dessa forma, é possível gerir a manutenção e execução de melhorias de modo flexível, de acordo com a necessidade e com grau de solicitação de cada parte funcional (CHAVES *et al*, 2012). A Figura 34 apresenta uma outra visão da Recuperadora de Bauxita.

FIGURA 34 - RECUPERADORA (*RECLAIMER*) DE BAUXITA



Fonte: (Autora,2019).

### 3.1.2 SISTEMA DO ENROLADOR DE CABOS

Conforme Stemmann (2019), os enroladores de cabos motorizados são aplicados na transmissão de energia (força, comando ou sinal) para máquinas móveis em geral que utilizam cabos flexíveis em sua eletrificação. A Figura 35 mostra o enrolador de cabos do *Reclaimer* de Bauxita. Esse sistema necessita trabalhar em perfeito sincronismo com a máquina móvel, para evitar danos ao cabo. Dessa forma, esse sistema requer um controle efetivo para o enrolar e desenrolar do cabo.

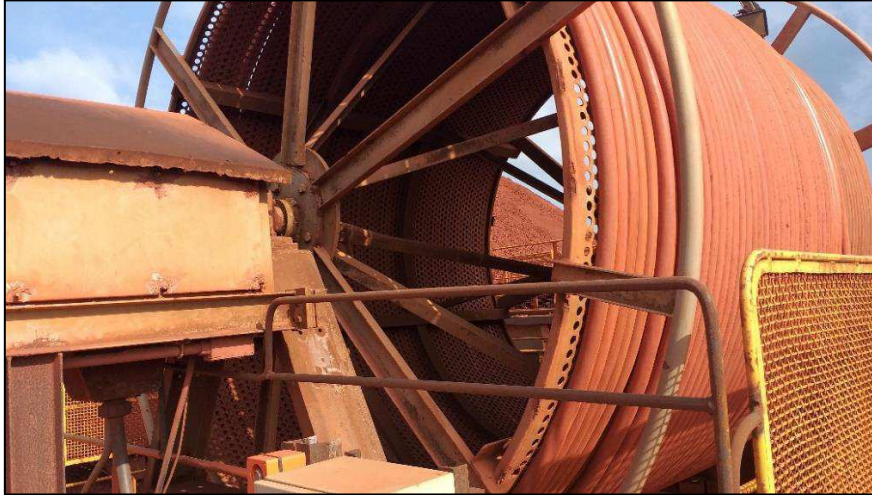
Segundo Avahle(2012), os enroladores de cabo são basicamente compostos de dois subconjuntos:

- Corpo do enrolador: onde o cabo elétrico é enrolado;
- Acionamento: conjunto que irá movimentar o corpo do enrolador para enrolar/liberar o cabo em sincronismo com a máquina móvel.



A escolha do melhor tipo de enrolador depende dos dados e as características da aplicação. Por exemplo, máquinas em grandes velocidades de translação devem ter o acionamento adequado para manter o sincronismo entre o enrolamento do cabo e a translação da máquina (STEMMANN,2019).

FIGURA 35 - ENROLADOR DE CABOS DO RECLAIMER DE BAUXITA.



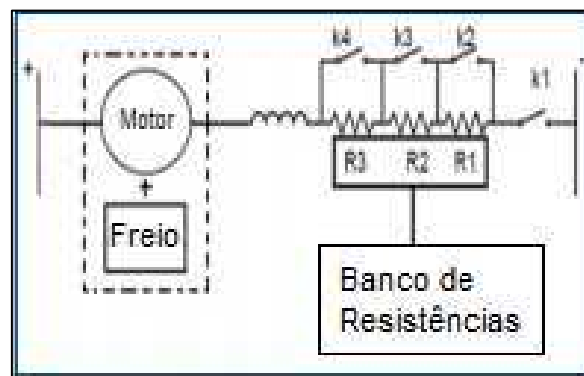
Fonte: (Autora,2019).

### 3.1.3 PROBLEMÁTICA APRESENTADA

O sistema de enrolador de cabos da Recuperadora (*Reclaimer*) de Bauxita é composta por um motor de 11 CV do tipo rotor bobinado com o freio eletromagnético acoplado. Para controlar a corrente de partida e rotação desse motor são utilizados bancos de resistores em série com os enrolamentos do rotor.

Os motores de rotor bobinado possibilitam o aumento de sua resistência rotórica através da utilização de um banco de resistência externa, conectada ao circuito rotórico, aumentando o conjugado de partida com corrente relativamente baixa. A Figura 36 apresenta o esquemático elétrico do sistema de enrolador de cabos antigo utilizando motor de rotor bobinado.

FIGURA 36 – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DO SISTEMA ANTIGO DO ENROLADOR DE CABOS.



Fonte: (Autora,2019).

De acordo com a pesquisa realizada com engenheiros e técnicos responsáveis por gerir o sistema de enrolador de cabos, percebeu-se que esse sistema não estava atendendo os requisitos do processo, visto que o mesmo apresentava uma alta taxa de falhas. O tempo médio de reparo do sistema de enrolador de cabos era em torno de 12 horas.

O dimensionamento da Recuperadora de Bauxita e dos seus componentes foi feito há mais de três décadas, na época da criação da indústria. Com isto, os equipamentos instalados sofreram desgastes ao longo do tempo. Os equipamentos que apresentaram maiores desgastes foram aqueles que possuíam movimentações mecânicas, como é o caso dos contadores contidos no banco de resistências do motor apresentado anteriormente.

Dessa forma, os eventos envolvendo falhas dos contadores se tornaram frequentes, em um destes eventos ocorreu o rompimento dos cabos devido a falha no controle de torque que gerou perda de produção em torno de 1% da produção mensal da Refinaria.

#### 3.1.4 PROPOSTA DE MELHORIA

Com a incidência de eventos ocasionados pelo desgaste dos componentes mecânicos do acionamento do enrolador de cabos, foram apresentadas proposta de modernização do sistema, utilizando inversores de frequência, uma tecnologia que na época da implementação da recuperadora não era tão difundido.

Outra mudança significativa foi a troca do motor do tipo rotor bobinado para um motor de gaiola de esquilo. O motor de indução trifásico é muito utilizado nas aplicações industriais devido a uma série de vantagens, como por exemplo o baixo custo em manutenção, montagem, fabricação e simplicidade em relação aos outros motores, além de não apresentarem os contadores, evitando assim a fragilidade do desgaste desse componente.

Os principais objetivos da modernização do sistema:

- Redução de paradas não planejadas por falha no acionamento.
- Modernização do acionamento utilizando das melhores tecnologias.
- Maior precisão no torque, evitando rompimento de cabo.
- Melhor controle do sistema de enrolamento.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 MÉTODOS

A análise do sistema de partida do enrolador de cabos do *Reclaimer* de uma indústria de Alumina consiste em uma comparação do sistema de partida com um motor antigo, de rotor bobinado que fora substituído por um motor de indução do tipo gaiola de esquilo acionado por inversor de frequência.

Tendo em vista que o motor de rotor bobinado antigo já havia sido substituído e não havia banco de dados técnicos para análise, foi realizada uma pesquisa a partir do histórico de falhas e paradas, através de entrevistas realizadas com engenheiros e técnicos responsáveis por gerir o sistema em questão.

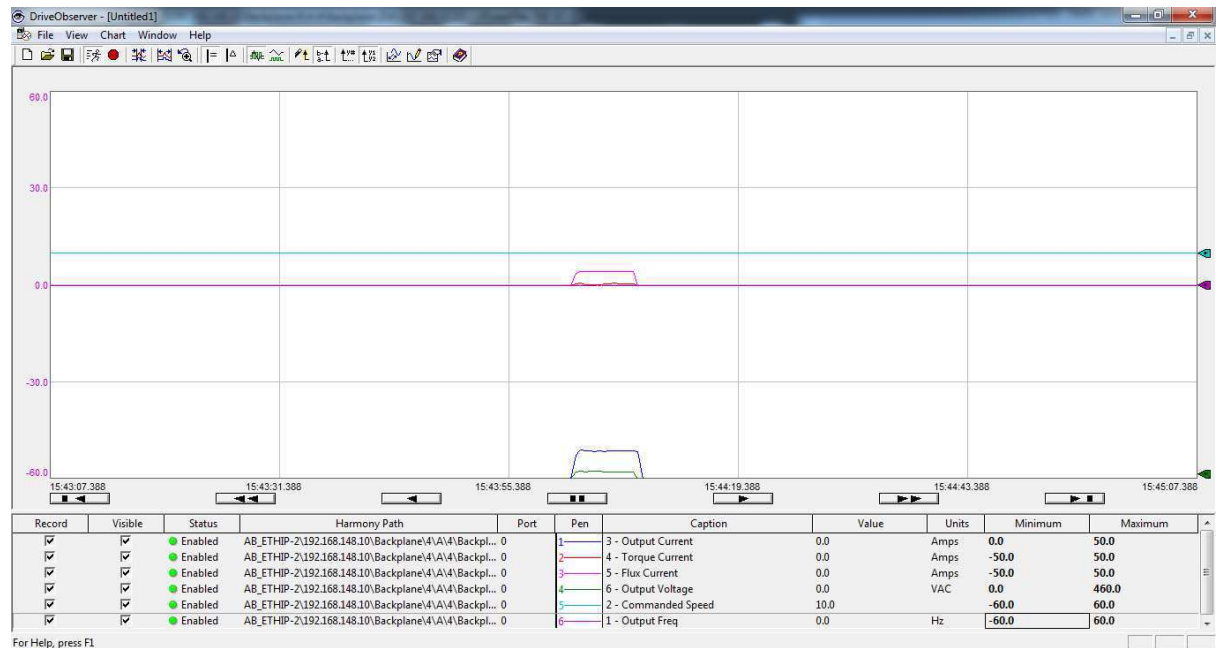
As perguntas consistiam em:

- O motor utilizado anteriormente à troca atendia bem aos requisitos da carga?
- Houve eventos de paradas e/ou falhas com esse motor? Se sim, quantas? Qual o impacto disso?
- Após o evento da troca, ocorreram eventos de falha?
- Você acha que a utilização do conjunto motor + inversor é um bom investimento para o seu processo?

No que concerne a análise da partida com inversor de frequência foram utilizados dados reais retirados do software *DriveObserver*<sup>TM</sup> da fabricante *Allen Bradley*, responsável por realizar diagnóstico do inversor *PowerFlex*® instalado, informações de eventos, falhas e alarmes. Esse *software* permite ao usuário analisar o comportamento e a eficiência do inversor. Com isto, a partir da comunicação entre o software e o inversor, foi possível acessar e coletar os dados *online* e em tempo real do momento de partida. A Figura 37 apresenta a tela inicial do software utilizado para coleta dos dados.



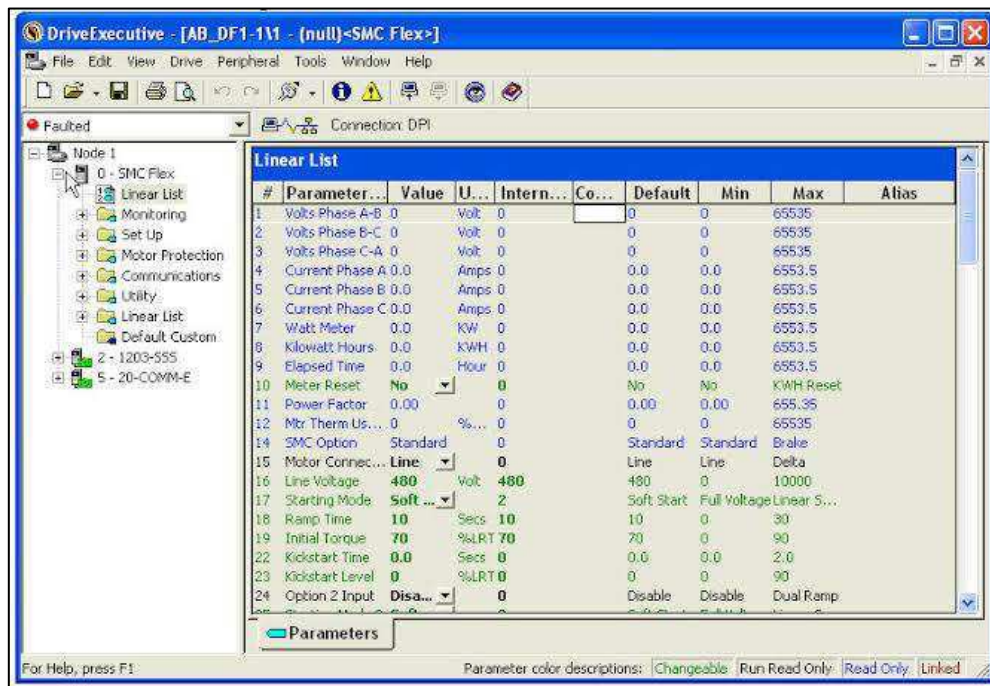
FIGURA 37 - DRIVEOBSERVER UTILIZADO PARA COLETA DE DADOS.



Fonte: (Autora, 2019).

Outro *software* utilizado neste trabalho foi o *DriveExecutive*<sup>TM</sup> que fornece uma interface simplificada para programação, manutenção e localização de falhas de inversores e conversores *PowerFlex*®. Através dos dados da placa do motor, esse *software* permite ao usuário configurar todos os parâmetros que são necessários para a instalação do inversor, parâmetros esses como: a tensão do motor, a frequência, a corrente nominal, o número de polos, a velocidade síncrona. Além da parametrização do motor, a partir desse software foi possível referenciar os valores de torque e velocidades necessários para manter o sistema de enrolador de cabos com o torque controlado. Esses valores de referência foram encontrados a partir de testes com o sistema implementado até chegar no ponto ótimo de referência e torque. A Figura 38 apresenta a tela inicial do software *DriveExecutive*<sup>TM</sup>, contendo na tela alguns dos parâmetros que são configurados.

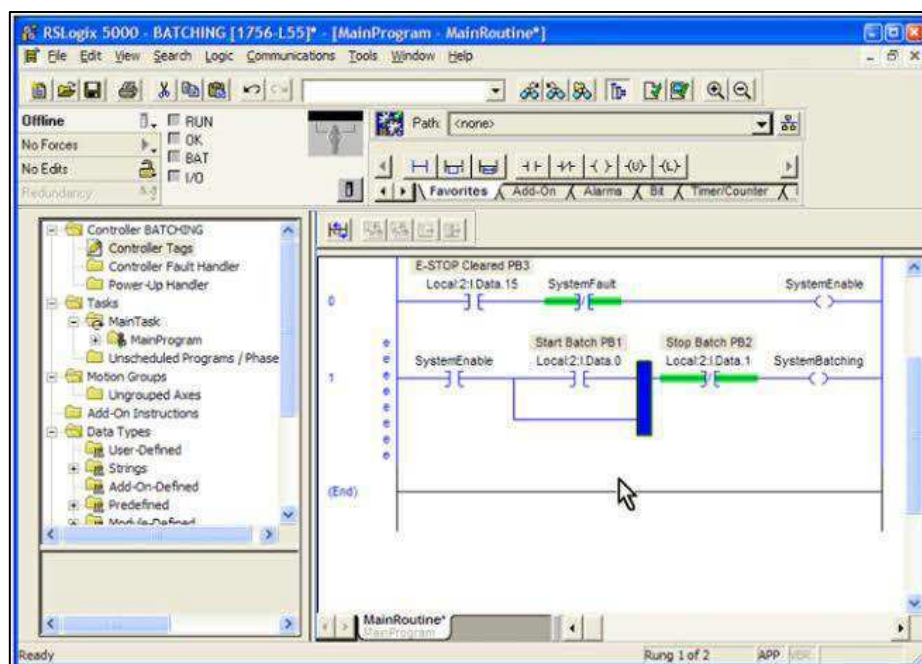
FIGURA 38 - SOFTWARE DRIVE EXECUTIVE UTILIZADO NA ANÁLISE DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.



Fonte: (Rockwell Automation, 2007).

Para realizar os comandos de partida e desligamento do motor, assim como monitorar e controlar as falhas e alarmes foi utilizado o software de programação *RSLogix 5000*, como mostrado na Figura 39, por meio da linguagem de programação *Ladder*, destinada primariamente para automação de processos de produção industriais. Este *software* permite criar, modificar e monitorar programas de aplicação para a família de *Allen-Bradley ControlLogix* de controladores.

FIGURA 39 - TELA DO SOFTWARE RSLOGIX5000.



Fonte: (Rockwell Automation, 2001).

Para administrar a saúde dos equipamentos, os setores industriais implantam os indicadores de manutenção, que servirão como base para a tomada de decisões e desenho de estratégias. Na fase de avaliação do desempenho do sistema de enrolador de cabos foi realizada a análise da disponibilidade do sistema antes e após a modernização do mesmo. Para isso, tornou-se necessário conhecer alguns conceitos da gestão de manutenção que serão tratados neste trabalho.

Segundo Fogliatto (2011), a disponibilidade de equipamentos é um dos principais indicadores de confiabilidade utilizados em programas de manutenção. Ela consiste na percentagem de tempo em que um equipamento está disponível para exercer a sua função, excluindo o tempo em que esteve parado para manutenção ou por outro motivo qualquer.

Para calcular a disponibilidade de um equipamento, é necessário conhecer dois indicadores de manutenção: O MTBF e o MTTR.

Conforme Teles (2017), o MTBF (*Mean Time Between Failures*) consiste no tempo médio entre falhas de um equipamento. A equação 10 mostra como se obtém esse importante indicador:

$$MTBF = \frac{\text{Somatório das horas de trabalho em bom funcionamento}}{\text{Número de falhas/reparos}}. \quad (10)$$

O MTTR (*Mean Time to repair*) consiste no tempo médio para reparo de um equipamento. A equação 11 mostra como se obtém esse importante indicador:

$$MTTR = \frac{\text{Somatório dos tempos de reparo}}{\text{Número de reparo realizados}}. \quad (11)$$

Uma vez que se conhece os indicadores de manutenção citados acima, Fogliatto (2011) afirma que a disponibilidade pode ser calculada como indica a equação 12 abaixo:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (12)$$

## 4.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Motor de indução trifásico de rotor bobinado;
- Motor de indução trifásico de gaiola de esquilo;
- Controlador Lógico Programável;

- Inversor de Frequência.

### ➤ Dados do Motor antigo

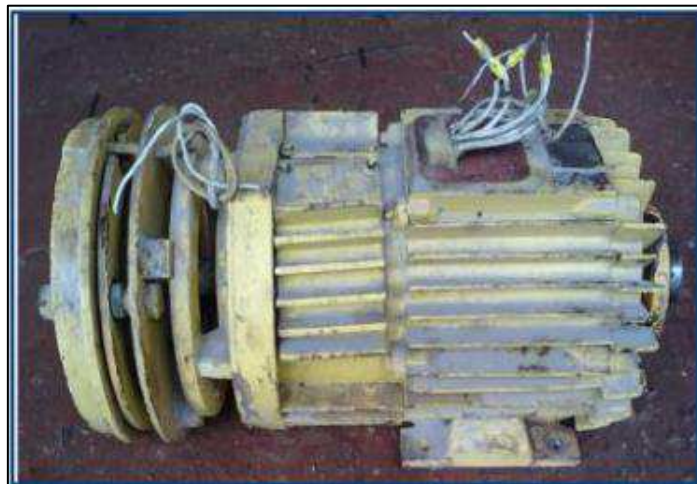
Motor elétrico marca BBE, assíncrono de indução, com rotor bobinado. A Tabela 1 apresenta os dados do motor de indução de rotor bobinado do sistema antigo do enrolador de cabos. A Figura 40 mostra o motor de rotor bobinado com o freio eletromagnético acoplado utilizado.

TABELA 1 - DADOS DO MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO.

<b>Potência:</b>	11CV
<b>Tensão:</b>	440V
<b>RPM:</b>	1170
<b>Carcaça:</b>	160L
<b>Frequência:</b>	60Hz
<b>Forma construtiva:</b>	B3
<b>Montagem:</b>	Horizontal
<b>Grau de Proteção:</b>	IP 55
<b>Classe de Isolamento:</b>	A
<b>Refrigeração:</b>	TFVE (Totalmente Fechado com Ventilação Externa)
<b>Tipo de Acoplamento:</b>	DIRETO
<b>Fabricante:</b>	BBE

Fonte: Banco de dados da empresa ALUMAR.

FIGURA 40 - MOTOR DO TIPO ROTOR BOBINADO UTILIZADO NO ESTUDO DE CASO.



Fonte: (Autora,2019).

➤ **Dados do Motor novo:**

Motor elétrico marca WEG, assíncrono de indução, com rotor de gaiola em curto-circuito, mancais de rolamentos de esferas, formas construtivas indicadas, apresentam as seguintes características como mostrado na Tabela 2:

TABELA 2 – DADOS DO MOTOR DE INDUÇÃO DO TIPO GAIOLA DE ESQUILO.

<b>Potência:</b>	7.5 CV
<b>Tensão:</b>	440V com 6 terminais
<b>Pólos:</b>	04
<b>Carcaça:</b>	132S
<b>Alimentação</b>	Trifásico
<b>Categoria / Design</b>	Categoria N
<b>Classe De Isolamento</b>	F (DT=105K)
<b>Fator De Serviço</b>	1,00
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Grau De Proteção</b>	IPW55
<b>Material Invólucro</b>	Ferro
<b>Método de Partida</b>	Inversor de Frequência
<b>Norma</b>	IEC
<b>Refrigeração</b>	TFVE Totalmente Fechado com Ventilação Externa
<b>Regime de serviço</b>	S1 contínuo
<b>Sentido de Rotação</b>	Ambos
<b>Temperatura Ambiente Máxima</b>	40°C
<b>Temperatura Ambiente Mínima</b>	-20°C
<b>Tipo de Acoplamento</b>	Direto

Motofreio

Motor W22

IR2

Encoder Dynapar B58N – 1024 pulsos

-Freio Eletromagnético N° 16 conjugado de frenagem nominal 80Nm – considerando atuação estática (atuação na rotação de 0 a 100rpm)

Alimentação do freio 220-240 V

Fonte: Banco de dados da empresa ALUMAR

A Figura 41 e 42 apresentam, respectivamente, o motor de indução com rotor gaiola de esquilo utilizado na substituição e os seus dados de placa.

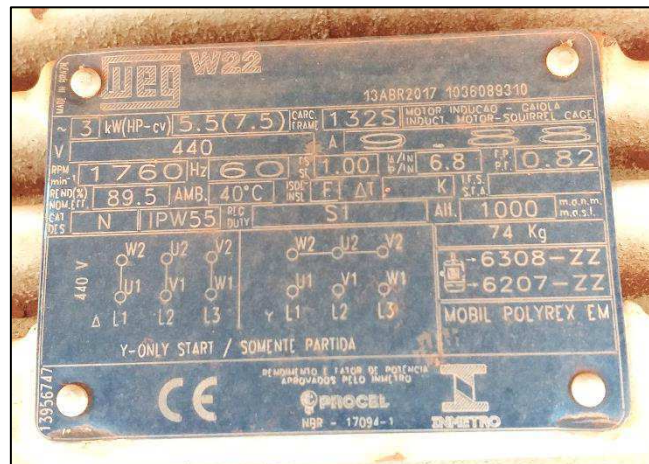


FIGURA 41 - MOTOR ATUAL DO SISTEMA DE ENROLADOR DE CABOS.



Fonte: (Autora, 2019).

FIGURA 42 - PLACA DO MOTOR ATUAL DO SISTEMA DE ENROLADOR DE CABOS.



Fonte: (Autora,2019).

### ➤ Controlador Lógico Programável

O Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado foi o *ControlLogix* da *Allen Bradley*, mostrado na Figura 43. É a última geração dos controladores da *Allen Bradley* pertencente a *Rockwell Automation* destinados a aplicações de grande porte, por isso utilizados em ambientes industriais que necessitem de equipamentos com maior confiabilidade.

O CLP foi utilizado para controlar a partida e rotação do motor através de um inversor de frequência, que por sua vez será controlado pela rede *Ethernet* através de sinal analógico.

FIGURA 43 - CLP *CONTROLOGIX* DA ALLEN BRADLEY.

Fonte: (Autora,2019).

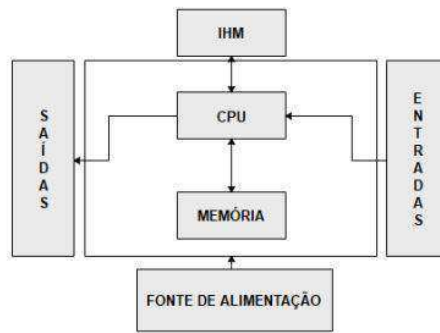
Basicamente, um controlador lógico programável, ou CLP, é um sistema de controle computacional voltado para ambientes industriais. Segundo Silveira e Santos (2003), Três conceitos básicos são apresentados a seguir:

- Variáveis de entrada: geradas pelo processo através de sensores diversos, chaves ou botoeiras, dentre outros.
- Variáveis de saída: realiza intervenção direta no processo através de contadores, válvulas, lâmpadas, displays, relés, dentre outros.
- Programa: sequência de instruções programadas pelo usuário e que gera ações específicas no processo a partir dos estados das variáveis de entrada.

Conforme Natale (2003), um CLP é composto basicamente 5 elementos, conforme ilustra a Figura 44.

- CPU – (Unidade central de processamento): responsável pela execução de um programa. Realiza ciclicamente as ações de leitura das entradas, execução do programa de controle do usuário e atualizações das saídas
- Interfaces de entrada e saída: sensores e atuadores que disponibilizam informações do processo ao CPU e após a execução do programa atuam conforme programado
- Memória: armazena o programa do CLP, assim como o estado das entradas e saídas.
- Fonte de alimentação: alimentação de 24 VDC fornecida para o CPU, cada módulo de entrada/saída e sensores do processo
- IHM – (Interface homem máquina): periférico ligado à CPU para comunicação do operador com o sistema

FIGURA 44 - DIAGRAMA DE BLOCOS DOS ELEMENTOS DO CLP



Fonte: (FRANCHI, 2013).

A Figura 45 mostra o diagrama do ciclo de varredura ou *scanning*, que é o tempo total para execução das instruções do programa e se encontra na faixa média de milissegundos. Primeiramente, o CLP atualiza o estado das entradas, e logo após inicia a execução do programa. Portanto, a última ação é a atualização das saídas (SILVEIRA e SANTOS, 2003).

FIGURA 45 - CICLO DE VARREDURA DO CLP



Fonte: (SILVEIRA e SANTOS, 2003).



### ➤ Inversor de Frequência

O Inversor de Frequência utilizado foi o *PowerFlex700* da família *Allen Bradley* pertencente à *Rockwell Automation*. Os inversores *PowerFlex700* estão disponíveis em uma ampla gama de classificações de potência. Esses inversores controlam motores de indução trifásicos em aplicações com especificações que vão do mais simples controle de velocidade até o mais exigente controle de torque. A Figura 46 mostra o inversor *PowerFlex700* utilizado no acionamento do enrolador de cabos.

FIGURA 46 - DRIVE INVERSOR *POWERFLEX700* DO ENROLADOR DE CABOS.



Fonte: (Autora,2019).

Segundo as informações da fabricante *Rockwell Automation*, o drive *PowerFlex700* apresenta os seguintes recursos:

- ❖ Apresenta valores nominais:
  - Tensão: 380 a 480V;
  - Potência: 0,37 a 132 kW; 0,5 a 200 HP;
  - Corrente: 1,1 a 260 A.
- ❖ Inclui IP20 NEMA/UL Tipo 1, Aberto/Flange, IP54 NEMA 12.
- ❖ Proporciona controle V/Hz, controle vetorial em malha aberta e controle vetorial com tecnologia FORCE.
- ❖ Oferece comunicações CIP (Protocolo Comum Industrial) incluindo *DeviceNet*, *ControlNet* e *EtherNet/IP*.
- ❖ Proporciona excelente produção de torque, regulagem de torque precisa e curtos tempos de atualização das entradas de torque.

- ❖ Oferece integração com inversores *PowerFlex* que usam a plataforma de *ControlLogix* para simplificar a programação de parâmetros e reduzir o tempo de desenvolvimento.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ESCOLHA DO MÉTODO DE PARTIDA

Com a substituição do motor do tipo rotor bobinado para o motor de indução do tipo gaiola de esquilo foram analisadas qual era o melhor método de partida para ser implementado nesse sistema.

Com base nas pesquisas bibliográficas apresentadas neste trabalho foi realizado uma análise comparativa, destacando as vantagens e desvantagens de cada método para essa aplicação, como pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparação entre as vantagens e desvantagens dos métodos de partida.

<b>Método de partida</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Escolha</b>
Direta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor custo de todas</li> <li>• Muito simples de implementar</li> <li>• Alto torque de partida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta corrente de partida, provocando queda de tensão na rede de alimentação.</li> <li>• É necessário sobredimensionar cabos e contadores</li> <li>• Limitação do número de manobras/hora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não atende a necessidade do sistema</li> </ul>
Estrela Triângulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo reduzido</li> <li>• A corrente de partida é reduzida a 1/3 quando comparada com a partida direta</li> <li>• Não existe limitação do número de manobras/hora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do torque de partida a aproximadamente 1/3 do nominal</li> <li>• São necessários motores com seis bornes</li> <li>• Caso o motor não atingir pelo menos 90% da velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo é equivalente ao da partida direta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não atende a necessidade do sistema</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em casos de grande distância entre motor e chave de partida, o custo é levado devido a necessidade de seis cabos.</li> </ul>	
Compensadora com Auto-transformador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variações gradativas de <i>tape</i>, para que se possa aplicar a chave adequadamente à capacidade do sistema de suprimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo superior ao da chave estrela-triângulo;</li> <li>• Aumento no volume dos Centros de Controle de Motores (CCM).</li> <li>• Desgastes mecânicos de variação dos <i>taps</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não atende a necessidade do sistema</li> </ul>
Soft-starter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrente de partida próxima à corrente nominal</li> <li>• Não existe limitação do número de manobras/hora</li> <li>• Longa vida útil pois não possui partes eletromecânicas móveis</li> <li>• Torque de partida próximo do torque nominal</li> <li>• Pode ser empregada também para desacelerar o motor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior custo na medida em que a potência do motor é reduzida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atende a necessidade do sistema</li> </ul>
Inversor de Frequência	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benefícios do <i>soft-starter</i></li> <li>• Controle a distância</li> <li>• Aumento da produtividade</li> <li>• Eficiência energética</li> <li>• Versatilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atende a necessidade do sistema</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle preciso da velocidade, torque e corrente.</li> </ul>		
--	--	--	--

De acordo com o Quadro 1, notou-se que os métodos por *soft-starter* e inversor de frequência apresentam os melhores benefícios para a aplicação do sistema em questão. Entretanto, tendo em vista que o sistema de enrolador de cabos necessita de um controle de torque mais preciso o método de partida escolhido foi o inversor de frequência.

Esse método apresenta um custo elevado quando comparado com os outros métodos de partida. Entretanto, levando em consideração que estamos tratando de um sistema industrial no qual a falha do mesmo pode acarretar em perda de produção, e conseqüentemente, em perda de capital. O custo em um método confiável de controle e partida do motor compensará o investimento.

## 5.2 MOTOR CONTROLADO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O enrolador de cabo está dimensionado para recuperar/desenrolar automaticamente o cabo elétrico que irá fornecer a energia para a máquina móvel, em uma relação de total sincronismo. Um CLP em conjunto com um inversor de frequência fornecerá ao motor elétrico o controle de torque variável.

No enrolador de cabos teremos os seguintes sinais:

- 01 sinal fornecido por um sensor analógico instalado na chave fim-de-curso, informações para referência de torque variável, em função da posição do enrolador ao longo de todo o caminho de rolamento da máquina;
- 01 gerador de pulsos (*encoder*) instalado no eixo do motor do enrolador; o qual permite que o sistema trabalhe em "malha fechada".
- 01 sinal fornecido a partir de um sensor instalado no pêndulo guia-cabo, mostrado na Figura 47, que informará ao enrolador os seguintes sinais: torque adicional, "cabo frouxo", "cabo esticado" e a posição do pêndulo. Com isto, é possível liberar o comando para o sistema do enrolador de cabos realizar alguma ação(enrolar/desenrolar).

FIGURA 47 - PÊNDULO DO ENROLADOR DE CABOS.



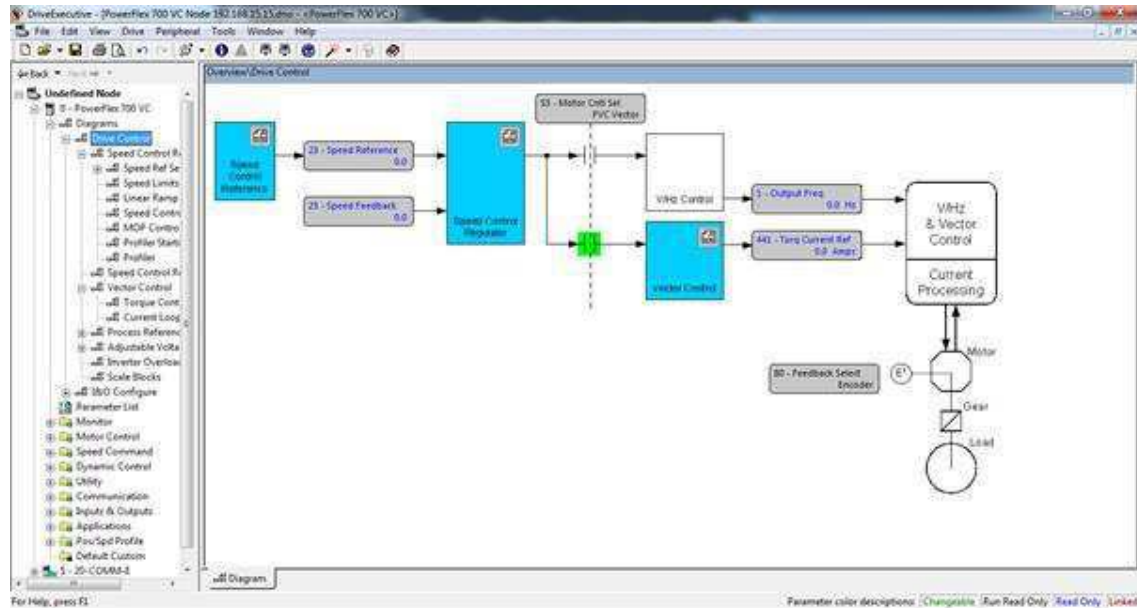
Fonte: (Autora,2019).

Durante a movimentação teremos o controle e a supervisão do torque por todo o percurso da máquina. Caso o cabo do enrolador não esteja recuperando-o adequadamente um sinal de torque adicional será ativado para correção do mesmo. A parada total da máquina se dará quando ocorrer situações de cabo frouxo ou esticado poderá ser regulada conforme a característica do fabricante do cabo.

O controle aplicado no inversor foi o controle vetorial. Através do bloco “*Vector Control*”, é feito o controle do torque. Comparando o valor real e o valor de referência, a saída do controle é o menor valor entre os valores comparados. Esse valor mínimo resulta em um controle mais preciso do torque, e em valores mais suaves de correntes no motor.

Para essa aplicação, foi acrescentado uma malha externa para o controle de velocidade do motor com o intuito de atuar como uma proteção de redundância ao controle de torque. Dessa forma, para evitar que a velocidade do motor atinja valores elevados e isso prejudique o sincronismo entre o torque e o enrolamento do cabo. Por meio de testes, foi setado um valor de referência de velocidade para o motor. Esse valor de referência é comparado com o valor da velocidade real do motor, através do *encoder*. Essa comparação é feita pelo bloco de controle “*Speed Control Regulator*” vista na Figura 48.

FIGURA 48 - CONTROLE VETORIAL DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA



Fonte: (Autora, 2019).

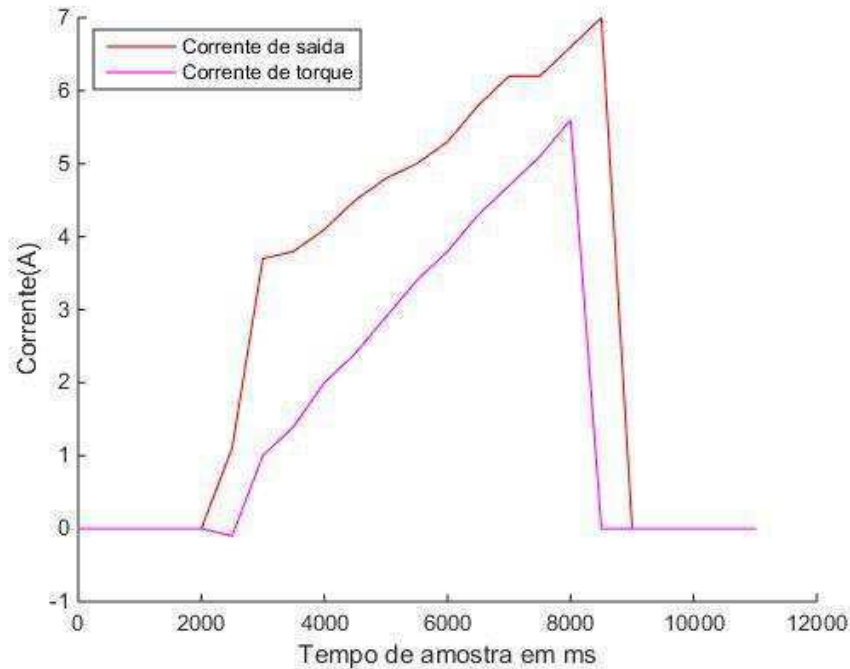
### 5.3 ANÁLISE DE DADOS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Para a fase de análise da partida foi utilizado o software *DriveObserver*. Esse *software* permite ao usuário analisar o comportamento e a eficiência do inversor. Com isto, foi realizado a coleta de dados *online* e em tempo real do momento de partida.

Foram coletados 1200 pontos de amostras a cada 500ms para o tratamento dos dados. A partir de todos os dados coletados foram escolhidos pontos estratégicos de momentos um pouco antes e depois do momento da partida. Dessa forma, através do software *Matlab*, foram gerados os gráficos abaixo.

Através da Figura 49, notou-se que a corrente de partida foi acelerada gradativamente, através da ferramenta de rampa do inversor de frequência. Além disso, o pico de corrente atingida foi de 7A, o que não ultrapassa o valor de corrente nominal do sistema. Essa característica evita assim, desgastes dos sistemas de proteção do motor. A corrente de torque é a corrente que gera o torque no eixo do motor. A corrente de saída é a soma das correntes de torque com a corrente de fluxo.

FIGURA 49 - CORRENTE DE SAÍDA E DE TORQUE DO MOTOR.



Fonte: (Autora,2019).

Além desse benefício, pode-se destacar a eficiência energética que o inversor de frequência possibilitou a esse sistema. No acionamento do motor de rotor bobinado, via aceleração rotórica, havia uma elevada dissipação de energia através dos resistores em série com o rotor.

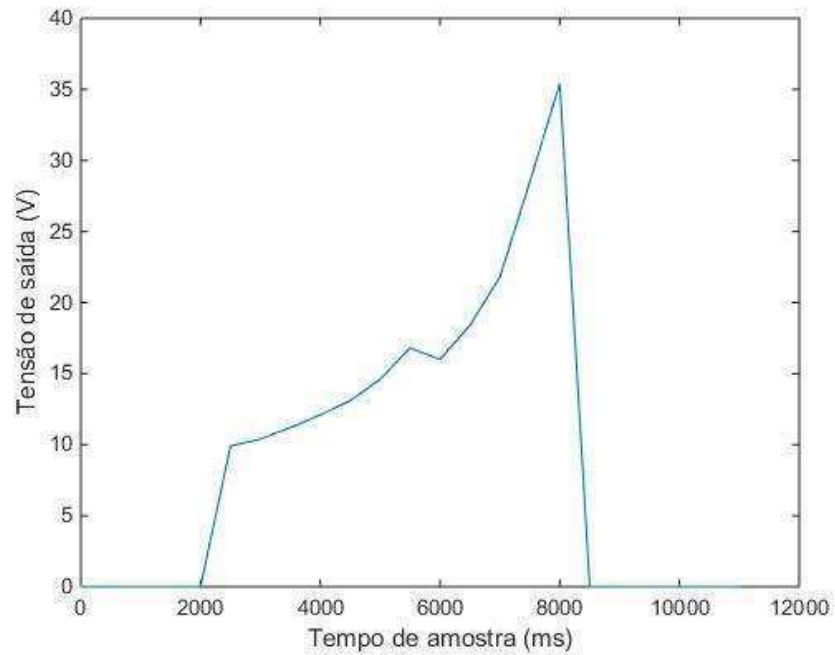
Por conta dessa característica, uma vez que parte da energia do motor era dissipada pelas resistências, a configuração anterior apresentava um rendimento menor. Dessa forma, para o motor atender os requisitos da carga, ele precisava apresentar uma potência maior, visto que havia uma exigência de corrente maior sobre ele.

Nessa nova configuração, como houve um aumento no rendimento do motor, e conseqüentemente, a diminuição das perdas e da exigência de corrente, possibilitou ao novo sistema a diminuição da potência do motor.

A tensão de saída e a frequência apresentaram o mesmo comportamento de subida e descida suaves, como pode ser notado nas Figuras 50 e 51, respectivamente. O motor do enrolador de cabos só é acionado quando acontece a translação do *Reclaimer*. Por conta dessa característica pode-se observar que as variáveis assumem valores de partida e logo após voltam para o estado inicial (0), que significa o acionamento e o desligamento do motor.

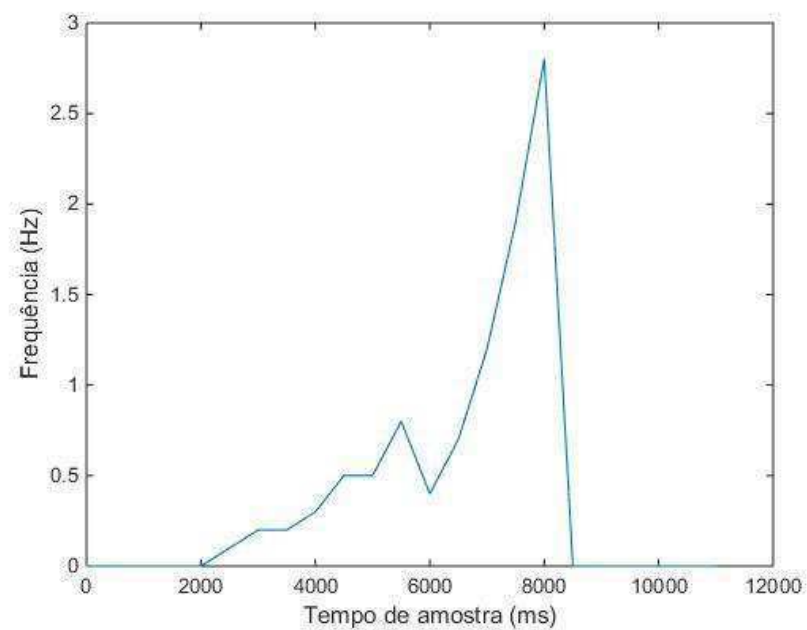


FIGURA 50 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA NO MOMENTO DE PARTIDA.



Fonte: (Autora,2019).

FIGURA 51 - COMPORTAMENTO DA FREQUÊNCIA DO MOTOR NO INSTANTE DA PARTIDA.

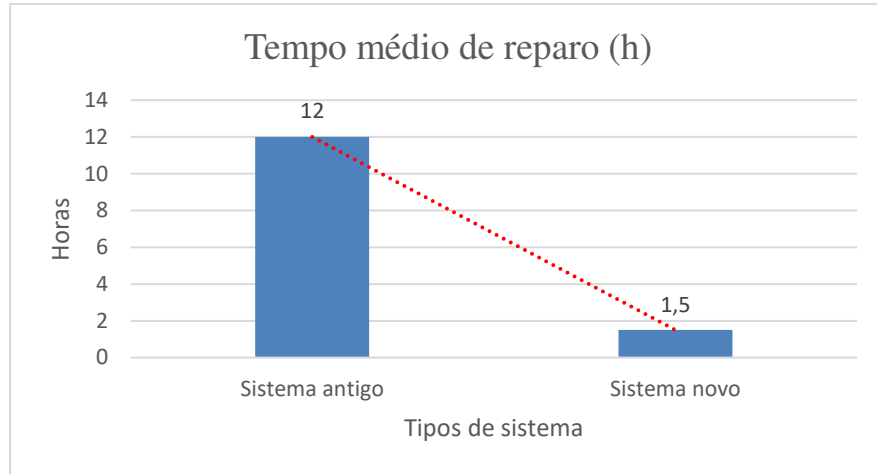


Fonte: (Autora,2019).

A implementação do inversor de frequência possibilitou ao sistema de enrolador de cabos uma facilidade no diagnóstico de falhas e alarmes em tempo real. Com isso, houve uma melhoria e rapidez do *troubleshooting* devido a robustez do novo sistema. O tempo médio em que os técnicos e engenheiros levavam para diagnosticar e resolver problemas com o sistema antigo era em torno de

12 horas. Após a modernização do sistema esse tempo reduziu para aproximadamente 1,5 horas. A Figura 52 apresenta a comparação do tempo médio de reparo entre os sistemas antigo e novo.

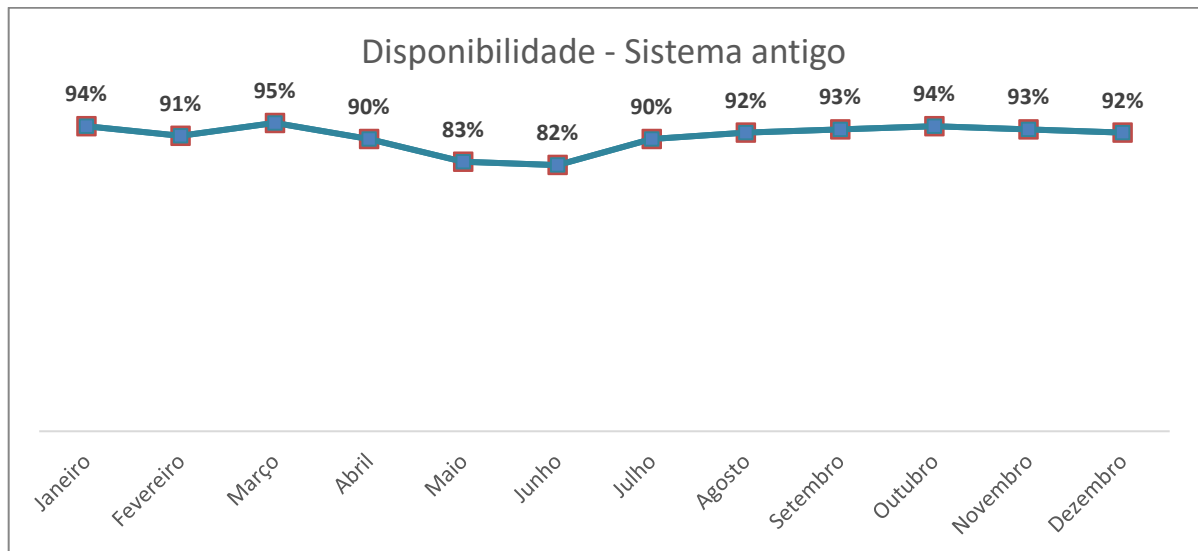
FIGURA 52 - COMPARAÇÃO DO TEMPO MÉDIO DE REPARO DE FALHAS.



Fonte: (Autora,2019).

Essa melhoria propiciou uma maior disponibilidade do equipamento que consiste na percentagem de tempo em que um equipamento está disponível para exercer a sua função, excluindo o tempo em que o mesmo esteve parado para manutenção ou por outro motivo. Com o sistema de enrolamentos de cabos antigo, a média de Disponibilidade, durante 1 ano de análise, foi de 90,75%, como mostrado na Figura 53.

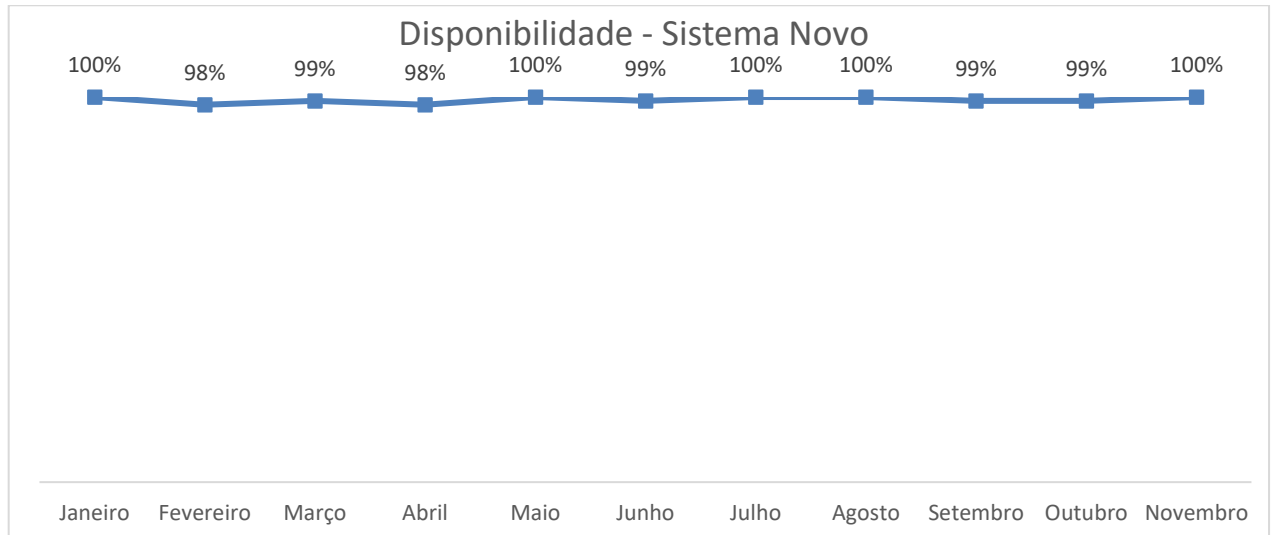
FIGURA 53 - DISPONIBILIDADE DO SISTEMA ANTIGO.



Fonte: (Autora,2019).

Considerando o período de 1 ano após a implementação do novo sistema, o sistema não apresentou falhas, apenas algumas paradas programadas para checar o estado de lubrificação de acoplamento e outros detalhes mecânicos. Dessa forma, a disponibilidade média do enrolador de cabos durante 1 ano foi de 99,27%, como mostrada na Figura 54.

FIGURA 54 – ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE DO SISTEMA NOVO DO ENROLADOR DE CABOS.



Fonte: (Autora ,2019).

Com isto, tem-se que o sistema escolhido não só atende os requisitos da carga, mas também propiciou um cenário com “zero” falhas, diminuindo assim os custos com manutenção, além de uma maior confiabilidade e disponibilidade do sistema do enrolador de cabos. Os custos causados durante os eventos de falhas chegam em torno de 10 vezes mais comparados com o ano após a implementação do novo sistema.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apresentar a aplicação dos motores elétricos de indução, dando enfoque para os do tipo rotor bobinado e rotor gaiola de esquilo, através do estudo do princípio de funcionamento e dos variados métodos de partida existentes no mercado.

Para isso, foi apresentado um estudo de caso ocorrido em uma indústria de Alumina, do qual consiste em um enrolador de cabos de um *Reclaimer* de Bauxita. Esse sistema era composto por um motor elétrico de rotor do tipo bobinado com um freio acoplado. O método de partida utilizado era o de aceleração rotórica, contendo um banco de resistores e um conjunto de contatores que através das suas comutações conseguia diminuir a corrente de partida do sistema.

No entanto, esse sistema estava apresentando falhas, com uma frequência de aproximadamente três paradas não planejadas por ano. Além das paradas planejadas para manutenção dos contatores e dispositivos que apresentavam desgastes mecânicos. Este cenário estava apresentando perdas de produção e custos para a empresa, que poderiam ter sido evitadas ao se utilizar um sistema adequado de partida para essa aplicação.

Com a incidência de eventos ocasionados pelo desgaste dos componentes mecânicos do acionamento do enrolador de cabos, foi feita uma análise dos métodos de partida existentes. E diante da necessidade de um controle de torque mais preciso do enrolador de cabos, optou-se por utilizar inversores de frequência, uma tecnologia que na época da implementação da recuperadora não era tão difundido.

Outra mudança significativa foi a troca do motor do tipo rotor bobinado para um motor de gaiola de esquilo. O motor de indução trifásico é muito utilizado nas aplicações industriais devido a uma série de vantagens, como por exemplo o baixo custo em manutenção, montagem, fabricação e simplicidade em relação aos outros motores, além de não apresentarem os contatores, evitando assim a fragilidade do desgaste desse componente.

Após a implementação da modernização do sistema foram realizadas análises do comportamento das variáveis como corrente, tensão e frequência do motor no instante da partida e pode-se perceber que os mesmos apresentam variações suaves tanto de aceleração quanto de desaceleração.

Contudo, o sistema implementado apresentou ótimos resultados, além de terem apresentado um total de zero falhas. Diminuindo o custo com manutenção, aumentando assim a disponibilidade e confiabilidade não só do enrolador de cabos, mas também de todo o sistema de Recuperação da bauxita.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 STEPHAN, Richard M.(2008). *Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 2 MAMEDE FILHO, João. (2003). *Instalações elétricas industriais*. 7.ed. Rio de Janeiro-RJ:LTC Editora.
- 3 GURGEL, Fabio.(2009). *Aplicações de inversores de frequência na indústria nacional: A contribuição brasileira*. Tese (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- 4 BARNES, Malcolm. (2003). *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. Elsevier.
- 5 PETRUZELLA, Frank D. (2013). *Motores elétricos e acionamentos*. 1. ed.. AMGH Editora Ltda.
- 6 FRANCHI, Claiton Moro. (2008). *Acionamentos Elétricos*. 4. Ed. São Paulo – Editora Érica Ltds.
- 7 PAREKH, Rakesh.(2013). *AC Induction Motor Fundamentals*. Acesso em 11 de 08 de 2019, disponível em:<[http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn\\_00887a.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn_00887a.pdf)>.
- 8 FRANCISCO A. M. S. (2006) —*Motores de Indução Trifásico*, editora: ETEP – Edições Técnicas e Profissionais, 2º edição.
- 9 COSERN. *Livreto energia reativa*. Disponível em: <[http://servicos.cosern.com.br/residencial\\_rural/Documents/Cartilha%20Educativa/06\\_-\\_Livreto\\_Energia\\_ReativaWEB.pdf](http://servicos.cosern.com.br/residencial_rural/Documents/Cartilha%20Educativa/06_-_Livreto_Energia_ReativaWEB.pdf)>. Acessado em: 25/06/2019.
- 10 COSTA, Edson. SOUZA, Ronimack.(2009). *Guia de Instalações Industriais*. UFCG.
- 11 ROSA, Alex.(2003). *Simulação de um soft-starter para acionamento de motores de indução*.67. Dissertação - Universidade Federal de Goiás, 2003.
- 12 WEG. (2013). *Guia de Seleção de Partidas*. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hca/h04/WEG-soft-starters-10525004-catalogo-pt.pdf>>. Acessado em: 10/11/2019.
- 13 FERRAZ, Rogério. *Guia de Aplicação de soft-starters – WEG*. Manual, 2a Edição, WEG.
- 14 CEMIG, (2018). *Supervisão Controle do Sistema Elétrico Distribuição - Concurso Público*. Disponível em:<<https://www.tecconcursos.com.br/conteudo/concursos/13676>>. Acessado em: 10/11/2019.
- 15 WEG. (2016). *Guia Técnico - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM*. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acessado em: 18/11/2019.
- 16 WEG. (2005). *Guia de Aplicação de Inversores de Frequência*. Disponível em: <<https://sidrasul.com.br/wp-content/uploads/2014/09/Guia-de-Aplicação-de-Inversores-de-Frequência-WEG-3-Edição.pdf>>. Acessado em: 18/11/2019.
- 17 PINHEIRO, Diego. (2015). *Análise dos distúrbios no transitório de partida de motores de indução trifásicos*. Tese (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará- Campus Tucuruí.

- 18 ROCKWELL Automation. (2000). *AC Drives Using PWM Techniques*. Allen Bradley. Publicação DRIVES-WP002A-EN-P — Junho 2000.
- 19 CHAPMAN, Stephen J.(2013). *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. Porto Alegre: AMGH.
- 20 MORAES, Everton.(2014). *10 partidas de motores que você precisa conhecer. Guia Prático de Análise e Aplicação*. 1 Edição. São Bernardo do Campo, SP.
- 21 WEG.(2016). *Manual de Instalação, Operação e Manutenção de Motores Elétricos com Freio*. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h20/h2b/WEG-motofreio-manual-de-instalacao-operacao-e-manutencao-de-motores-eletricos-com-freio-50021505-manual-portuguese-web.pdf>>. Acessado em 19/11/2019.
- 22 COTRIM, Ademaro A. M. B.(2003) *Instalações Elétricas*, 4. ed. São Paulo: Makron Books do Brasil.
- 23 FILIPPO FILHO, Guilherme. (2000) *Motor de indução*. São Paulo: Érica, 2000.
- 24 WEG S.A.(2008) *Catálogo geral de motores elétricos*. Jaraguá do Sul. Disponível em: <[https://www.hd.ind.br/PDF/manual\\_TECNICO-motores.pdf](https://www.hd.ind.br/PDF/manual_TECNICO-motores.pdf)>. Acessado em 19/11/2019.
- 25 EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2019). *Balanço energético nacional – Relatório Final*. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo.pdf>>. Acessado em 19/11/2019.
- 26 COSERN. Livro energia reativa. Disponível em: <[http://servicos.cosern.com.br/residencial\\_rural/Documents/Cartilha%20Educativa/06\\_-\\_Livreto\\_Energia\\_ReativaWEB.pdf](http://servicos.cosern.com.br/residencial_rural/Documents/Cartilha%20Educativa/06_-_Livreto_Energia_ReativaWEB.pdf)>. Disponível em: < Acessado em: 18/11/2019.
- 27 SILVEIRA, P. R; SANTOS, W. E. (2003). *Automação e controle discreto*. São Paulo: Érica, 5ª Edição, 236p.
- 28 NATALE, F.(2003). *Automação Industrial*. São Paulo: Érica, 5ª Edição, 256p
- 29 FRANCHI, C. M.(2013). *Inversores de frequência: teorias e aplicações*. São Paulo: Érica, 2ª Edição, 212p.
- 30 ROCKWELL. (2019). *Inversores PowerFlex 700*.Disponível em: <<https://ab.rockwellautomation.com/pt/Drives/PowerFlex-700#documentation>>.Acessado em 21/11/2019.
- 31 TUNES, Marcelo Ribeiro. (2014). *Perspectivas da Mineração no Mundo e no Brasil*. In: ISEE Brazil – International Society of Explosives Engineers, 2ª edição.
- 32 CHAVES, Arthur Pinto et al.(2012). *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Manuseio de sólidos granulados*. Volume 5. 2ª edição. Oficina de Textos: São Paulo.
- 33 STEMMANN. (2019). *Enrolador de Cabo - Tipo Motorizado*. Disponível em:<<http://www.stemann.com.br/produtos/enrolador-para-mangueiras/enrolador-de-cabo-tipo-motorizado>> Acessado em 21/11/2019.
- 34 TASSI, Reginaldo et al. (2012). *Estudo de acionamentos das chaves de partidas elétricas e eletrônicas para motores elétricos*. 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul.
- 35 MASCHERONI, José M.; LICHTBLAU, Marcos; GERALDI, Denise.(2005). *Guia de aplicação de inversores de frequência*. Santa Catarina: WEG Automação, 238p.
- 36 ROCKWELL AUTOMATION. (2007). *DriveTools SP v4.xx PowerFlex DC Drive Software Patch*. USA. Disponível em: <[https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rn/9303-rn008\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rn/9303-rn008_-en-p.pdf)>. Acessado em 25/11/2019.
- 37 ROCKWELL AUTOMATION. (2001). *Controladores Logix5000*. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/ederborbasc/manual-em-portulogix5000>>. Acessado em 25/11/2019.
- 38 FOGLIATTO, Flavio Sanson. (2011). *Confiabilidade e Manutenção industrial*. Rio de Janeiro. Elsevier: ABEPRO,2011.
- 39 TELES, Jhonata. (2017). *Guia Prático para implantação de indicadores de manutenção*. Engeteles – Engenharia de Manutenção LTDA. Brasília -DF.

- 40 AVAHLE(2012). Motor Powered Cable Reels. Germany. Disponível em: <  
[https://vahle.com.br/fileadmin/user\\_upload/pdf/Kataloge/englisch/Cat\\_09b\\_en\\_Motor\\_powered\\_cable\\_reels.pdf](https://vahle.com.br/fileadmin/user_upload/pdf/Kataloge/englisch/Cat_09b_en_Motor_powered_cable_reels.pdf)  
Acessado em 26/11/2019. >.
- 41 CREDER , H. (2007). *Instalações elétricas*.15. ed. Rio de Janeiro. LTC.
- 42 WEG. *Soft-Starter Arrancador Suave. SSW03Plus*. Disponível em:  
<<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h90/haa/WEG-ssw03-soft-starter-manual-br0899.4421-brochure-english.pdf>>. Acessado em 06/02/2019.



