UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÂO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÚNIOR DOS SANTOS GOMES

ESTUDO PARA SUBSTITUIÇÃO DE ACIONAMENTO DOS MOTORES TRIFÁSICOS DE ANÉIS COM ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA POR MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ACIONADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM UM VEÍCULO DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO COM SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE FIO *TROLLEY*

SANTOS/SP
2016

JÚNIOR DOS SANTOS GOMES

ESTUDO PARA SUBSTITUIÇÃO DE ACIONAMENTO DOS MOTORES TRIFÁSICOS DE ANÉIS COM ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA POR MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ACIONADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM UM VEÍCULO DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO COM SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE FIO *TROLLEY*

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario.

SANTOS/SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Gomes, Júnior dos Santos.
Estudo para Substituição de Acionamento dos Motores Trifásicos de Anéis com Alimentação Bifásica por Motores de Indução Trifásicos acionados por Inversor de Frequência em um veículo de Transporte Ferroviário com Sistema de Captação de Fio *Trolley*.
/ Júnior dos Santos Gomes.
-- 2016
84 p.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. Inversores de Frequência. 2. Motores de Indução. 3. Acionamento. 4. Bonde Elétrico. 5. Consumo de Energia.

I. Mario, Mauricio Conceição, orient. II. Estudo para Substituição de Acionamento dos Motores Trifásicos de Anéis com Alimentação Bifásica por Motores de Indução Trifásicos acionados por Inversor de Frequência em um veículo de Transporte Ferroviário com Sistema de Captação de Fio *Trolley*.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

Dedico este trabalho ao me Deus por toda a inspiração e incentivo, à minha esposa e a minha filha que me apoiaram de diversas maneiras durante esta importante etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao meu Deus, depois ao meu orientador Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario que através de seus conhecimentos permitiu a condução deste trabalho, por suas orientações, recomendações, cobranças e o rápido retorno das inúmeras duvidas, assim como a consideração e respeito com que sempre me recebeu.

A Universidade Santa Cecília, UNISANTA, representada pelo Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco Coordenador Geral da Pós-Graduação - *Stricto Sensu*, a todo o corpo docente e ao atendimento sempre pontual das secretárias Sandra Helena Aparecida de Araújo e Imaculada Scorza.

Aos colegas Marcos Santos Lima, André Luiz Gonçalves Rojas, Edson Oliveira Vieira e Enir da Silva Fonseca, grande incentivador para o ingresso na carreira acadêmica no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica.

Aos meus amigos profissionais Ulisses Pimentel Guimarães, Marco Antônio Feliziani e Carlos Alberto Tozo por toda ajuda e apoio para as pesquisas e aplicações dos ensaios em campo, aos profissionais da Usina Hidrelétrica de Itatinga que abraçaram o desafio e contribuíram muito para aplicação dos objetivos, ao parceiro e fornecedor de equipamentos a MC TECH Automação Ltda administrada pelo amigo Engenheiro Maurício Capitani que me auxiliou em diversos aspectos para a escolha de equipamentos.

Aos colegas mestrandos da UNISANTA, pelos bons momentos de convívio com trocas de experiências e cooperação na busca dos objetivos acadêmicos.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo principal de analisar e aplicar um método de acionamento de controle de velocidade em um veículo de transporte ferroviário (bonde) da Usina Hidrelétrica de Itatinga, com a substituição dos motores trifásicos de anéis com chaves reostáticas por um sistema com motores de indução controlado por inversores de frequência, verificar sua eficácia devido problemas sistêmicos de baixa tensão e intermitências de energia. Nesta pesquisa utilizamos técnicas relacionadas a área da Eletrônica de Potência que adota parâmetros de controle e adaptação as diversas aplicações na indústria. Com o novo método de acionamento, buscou-se a solução de redução das manutenções corretivas que geravam altos custos no processo antigo, a confiabilidade, a qualidade com aplicação do novo processo e a redução do consumo de energia elétrica. No bonde, o sistema de captação de energia de uma fase da linha elétrica trata-se de uma chave pantógrafa, sendo esta uma chapa de contato deslizante sobre fio *trolley.* A segunda fase da linha elétrica é captada através do contato dos rodeiros (conjunto de rodas de aço) sobre as linhas férreas, formando assim um sistema bifásico de 440 Volts. Este sistema gera inúmeras intermitências de energia, causando diversos distúrbios no sistema elétrico de acionamento do bonde, o que justificou o estudo para a troca do novo método. Após as mudanças no Bonde nº1 foram extraídos e analisados os dados característicos de seu funcionamento através do simulador *Trend Recorder* do inversor de frequência YASKAWA e demais instrumentos elétricos. Os resultados mostraram que os comportamentos técnicos funcionais dos inversores de frequência foram satisfatórios, controlando o bonde com eficiência na partida, e em curvas de aceleração e desaceleração, garantindo maior torque, velocidade e menor consumo de energia elétrica, mesmo com as constantes intermitências de energia que são inerentes da linha elétrica.

Palavras Chave: Inversores de Frequência. Motores de Indução. Acionamento. Bonde elétrico. Consumo de Energia.

ABSTRACT

This work has the main objective of analyzing and applying a method of driving speed control in a railroad vehicle (tram) of the Itatinga Hydroelectric Power Plant, with the replacement of three - phase ring motors with rheostatic switches by a system with motors Induction controlled by frequency inverters, check their effectiveness due to low voltage systemic problems and intermittent power. In the tram, the energy pickup system of a phase of the electric line is a pantograph switch, this being a sliding contact plate on trolley wire. The second phase of the electric line is captured by the contact of the wheels (set of steel wheels) on the railway lines, thus forming a two-phase system of 440 Volts. This system generates innumerable intermittents of energy, causing several disturbances in the electric system of tram drive, which justified the study for the exchange of the new method. After the changes in Tram nº1 were extracted and analyzed the characteristic data of its operation through the simulator Trend Recorder of the frequency inverter YASKAWA and other electrical instruments. The results showed that the functional technical behavior of the frequency inverters was satisfactory, controlling the tram with starting efficiency, and in acceleration and deceleration curves, guaranteeing greater torque, speed and lower electric energy consumption, even with constant power intermittency Which are inherent to the electric line.

Keywords: Frequency Inverters. Induction Motors. Drive. Tram. Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trajeto do Bonde elétrico nº1, usina até o porto de Itatinga.....18
Figura 2 - Bonde elétrico nº1.....18
Figura 3 - Diagrama elétrico de acionamento do bonde nº1. 25
Figura 4 - Diagrama elétrico de acionamento do bonde nº1. 25
Figura 5 - Universo tecnológico de motores elétricos.....26
Figura 6 - Motor de rotor bobinado.....27
Figura 7 – Curva de conjugado com variação de resistência rotórica. 28
Figura 8 - Motores de rotor bobinado (anéis) do Bonde nº1.....30
Figura 9 - Motores de rotor bobinado (anéis) do Bonde nº1.....30
Figura 10 - Vista em corte de um motor de indução trifásico em rotor de gaiola.....31
Figura 11 - Conversor de fase - Rotafase. 35
Figura 12 – Principais componentes de um truque motorizado.....37
Figura 13 – Posicionamento de um rodeiro sobre as linhas férreas.....38
Figura 14 - Diagrama de blocos do motor. 39
Figura 15 - Acionamento por variação de frequência.....40
Figura 16 - Modulação de tensão de saída. 41
Figura 17 - Chave pantógrafa com contato deslizante no cabo *trolley*.....43
Figura 18 - Busca rápida de detecção de corrente após perda de energia. 45
Figura 19 - Busca rápida de detecção no início ou comando de busca rápida por entrada digital.....45
Figura 20 - Busca rápida após tempo de *baseblock*. 46
Figura 21 - Busca rápida na inicialização.....47
Figura 22 – Conexão de dispositivos periféricos. 48
Figura 23 - Banco de resistores tipo fio com eixo.....51
Figura 24 - Diagrama elétrico de potência com inversores, motores e banco de resistores.....52
Figura 25 - Circuito de potência do inversor com saída DC para resistor de frenagem. 52
Figura 26 - Bonde Elétrico nº1, preparado para desmontagem 55
Figura 27 - Remoção dos truques e motores sobre rodeiros dos truques.....56
Figura 28 - Remoção dos truques e motores sobre rodeiros dos truques.....56
Figura 29 - Remoção dos truques e motores sobre rodeiros dos truques.....56

Figura 30 - Folga nas guias dos truques e mancais. 57
Figura 31 - Folga nas guias dos truques e mancais. 57
Figura 32 - Colocação, alinhamento e soldagem das guias dos mancais. 57
Figura 33 - Usinagem da ponta de eixo dos rodeiros. 58
Figura 34 - Usinagem da ponta de eixo dos rodeiros. 58
Figura 35 - Deformações e corrosão na estrutura principal do bonde. 59
Figura 36 - Deformações e corrosão na estrutura principal do bonde. 59
Figura 37 - Reforma geral da chave pantógrafa do Bonde. 60
Figura 38 - Coroas dentes duplo com 76 dentes. 61
Figura 39 - Coroas dentes duplo com 76 dentes. 61
Figura 40 - Instalação do moto redutor na base do truque. 62
Figura 41 - Diagrama elétrico de força, rede alimentação 110 e 12 volts. 63
Figura 42 - Diagrama elétrico de força, alimentação dos inversores e motores. 64
Figura 43 - Diagrama elétrico de comando do controle de velocidade. 64
Figura 44 - Diagrama elétrico dos inversores de frequência. 65
Figura 45 - Instalação dos painéis (jusante e montante) de controle de velocidade. 66
Figura 46 - Instalação dos painéis (jusante e montante) de controle de velocidade. 66
Figura 47 - Painel principal de potência e comando do Bonde nº1. 66
Figura 48 - Localização dos painéis de controle de velocidade e potência do Bonde nº1 67
Figura 49 – Gráfico de evolução da potência, corrente e tensão em função do tempo. 69
Figura 50 – Gráfico de evolução % da potência, corrente e tensão em função do tempo. 70
Figura 51 – Conexão de computador externo via porta RS232/485 para comunicação e parametrização. 71
Figura 52 - Gráfico de análise de frequências, corrente e tensão VDC. 72
Figura 53 - Gráfico de análise de frequências, corrente e tensão VDC. 73
Figura 54 - Gráfico de análise de frequências, corrente e tensão VDC no regime permanente. 74
Figura 55 - Gráfico de análise de frequências, corrente, tensão VDC e potência no regime permanente. 75

Figura 56 - Gráfico de análise de frequências, corrente, tensão VDC e potência no regime de desaceleração. 76
Figura 57 - Gráfico comparativo de consumo de corrente (A) e Potência (KW) antes e após a modernização. 78

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Comparação entre os dois tipos de máquinas. 29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Dados dos equipamentos principais do Bonde nº1. 24
Quadro 2: Característica técnicas do motor de indução de alto rendimento. 32
Quadro 3: Característica técnicas do motor conversor de fase “rotafase”. 35
Quadro 4: Característica técnicas dos inversores de frequência. 43
Quadro 5: Característica técnicas do redutor de velocidade. 54
Quadro 6: Ensaios de potência, corrente e tensão. 68
Quadro 7: Ensaios de potência, corrente e censão após a modernização. 77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

KM	–	Quilômetro
KW	–	Potência em Quilo Watts
CV	–	Potência em Cavalo Vapor
HP	–	Potência em Horse Power
S	–	Escorregamento
º	–	Graus
T	–	Tempo
R	–	Resistência elétrica
CA / AC	–	Corrente Alternada
CC / DC	–	Corrente Contínua
RPM	–	Rotações por Minuto
Kg	–	Quilograma
IGBT	–	Transistor Bipolar de Porta Isolada
f.e.m.	–	Força Eletro Motriz
Hz	–	Frequência
VCA / VAC	–	Tensão em Corrente Alternada
VCC / VDC	–	Tensão em Corrente Contínua
W	–	Watts
PWM	–	Modulação de Largura de Pulso
PLC	–	Centro Lógico Programável
CPU	–	Unidade Central de Processamento
Mm	–	Milimetro
IHM	–	Interface Homem Máquina
ASME	–	Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos
SAE	–	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SI	–	Sistema Internacional
P	–	Potência Watts
V	–	Volts
A	–	Amperes
I	–	Corrente Elétrica
T	–	Transistor

Q	–	Calor
Min.	–	Minutos
M	–	Metros

LISTA DE SÍMBOLOS

∞ – Infinito

Ω – Ohms

P – Resistividade Elétrica

ℓ – Comprimento

ϕ – Fluxo eletromagnético

≠ – Diferente

µ – Micro Sinal

% – Percentual

” – Polegadas

$\int_x^y dt$ – Integral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Objetivo 20
1.2 Objetivos Secundários 20
1.3 Justificativa e Relevância do Tema 21
1.4 Organização da Dissertação 22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 24
2.1 Sistema atual de acionamento do Bonde elétrico 24
2.2 Motores elétricos 26
2.3 Motores assíncronos trifásico de anéis 27
2.4 Motores de indução “assíncronos” trifásico de anéis 30
2.5 Conversor rotativo de fase - Rotafase 34
2.6 Truque ferroviário 36
2.7 Conversor de frequência 38
2.8 Escolha do conversor de frequência 42
2.9 Banco de resistência elétrica 48
2.10 Redutor de velocidade 53
3 MATERIAIS E MÉTODOS 55
3.1 Desmontagem dos motores e rodeiros 55
3.2 Preparação dos eixos dos rodeiros 58
3.3 Preparação dos eixos dos rodeiros 59
3.4 Reforma da chave pantógrafa 60
3.5 Substituição do sistema de transmissão 61
3.6 Desenvolvimento do projeto elétrico 63
3.7 Instalação dos painéis de comando 65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 68
4.1 Levantamento de dados do sistema antigo 68
4.2 Parametrização dos inversores de frequência 70
4.3 Ensaio de operação no Bonde nº1 com sistema modernizado 72
4.4 Ensaio de operação no Bonde nº1: Análise de busca automática de velocidade 74
4.5 Análise do comportamento do controle de acionamento no processo de desaceleração 75

4.6 Comparativo de consumo de potência dos acionamentos. 77
5 CONCLUSÃO 80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

1 INTRODUÇÃO

Uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração industrial de energia elétrica que pode ser realizada por meio do uso da energia potencial da água (CREDER, 2009), através de aproveitamento do potencial hidráulico existente num rio. Basicamente, uma usina hidrelétrica compõe-se das seguintes partes: barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e sistema de restituição de água ao leito natural do rio, dependendo da topografia. Cada parte se constitui em um conjunto de obras e instalações projetadas harmoniosamente para operar eficientemente em conjunto. A energia hidráulica é transformada em energia mecânica quando a água passa pela turbina, assim Creder (2009) estabelece que:

> Os geradores de eletricidade necessitam de energia mecânica (cinética) para fazerem girar os rotores das turbinas, nos quais estão acoplados, no mesmo eixo, os rotores dos geradores de eletricidade. Então, a geração necessita de uma turbina (hidráulica ou térmica) e de um gerador síncrono, montados no mesmo eixo, geralmente vertical (CREDER, 2009).

A energia é gerada através de gerador síncrono usado universalmente pelas concessionárias de energia elétrica para fornecer potência trifásica e monofásica aos seus consumidores (DEL TORO, 2013).

A Usina hidrelétrica de Itatinga, no município de Bertioga, que foi inaugurada em 1910, é um complexo estratégico para a geração de energia com baixo impacto ambiental, e ainda garante parte expressiva da movimentação de cargas do Porto de Santos (CASTILHO, 2011).

Desde sua inauguração os empregados passaram a residir na Vila de Itatinga, que é acessada de barco pelo Rio Itapanhaú e daí exclusivamente por bondes elétricos, num trecho de 7,5 km de linhas férreas até a casa de força, conforme mostra a figura 1.

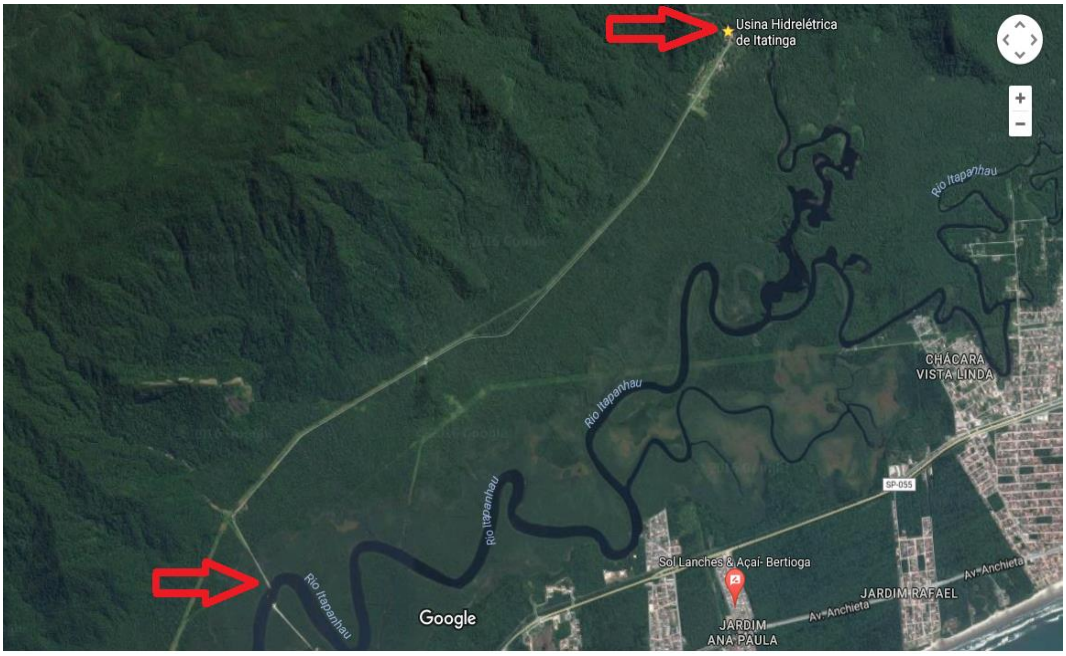


Figura 1 – Trajeto do Bonde elétrico nº1, usina até o porto de Itatinga.
Fonte: (GOOGLE, 2016).

Com a expansão das rodovias, os trabalhadores deixaram de residir na Vila de Itatinga mudando-se para as cidades vizinhas, passando a fazer regularmente o trajeto de bonde do porto até a casa de força, aumentando o número diário de viagens, conforme mostra a figura 2.

Figura 2 – Bonde elétrico nº1.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

O bonde elétrico é um dos principais meios de locomoção sobre as linhas férreas, do píer à margem do Rio Itapanhaú até a usina de Hidrelétrica de Itatinga, como menciona Castilho (2011). O fato é que a via férrea foi e ainda é a principal ligação da hidrelétrica de Itatinga com o Rio Itapanhaú.

> Após o término da construção da usina, foi possível contar com o apoio de bondes elétricos, que diminuíram os custos de operação e se vincularam, desde o início do século 20, ao princípio do uso de uma matriz energética limpa e renovável (CASTILHO, 2011).

A energia produzida na usina hidrelétrica de Itatinga é gerada por cinco alternadores de 3.000 KW, ou 22.250 CV, totalizando 15.000 KW de potência.

Esta energia chega à Santos, por uma linha de transmissão de 30 quilômetros de comprimento, com dois circuitos trifásicos. A energia transmitida é de 44.000 V que é recebida no porto de Santos-SP e rebaixada para 6.600 e 11.400 V, sendo dividida em linhas de consumo à níveis de 127, 220 e 440 V, de acordo com as necessidades das instalações portuárias.

O sistema de transmissão da usina ao porto de Santos-SP conta com cinco subestações, na fazenda Caiubura (em Bertioga), Caetê e Monte Cabrão (área continental de Santos), na Torre Grande (Vicente de Carvalho, na cidade de Guarujá) e no Macuco (na cidade de Santos).

O sistema de transporte da usina de Itatinga conta com 2 bondes elétricos e um trator rodoferroviário, sendo os únicos meios de transporte de cargas e passageiros da margem do Rio Itapanhaú até a usina.

Os sistemas elétricos dos Bondes são antigos e datado de 1945, um sistema moderno para a época e para as características do local.

No cenário atual o sistema necessita de manutenções excessivas, alto consumo de energia elétrica e dificuldades de aquisição de peças de reposição reduzindo confiabilidade do transporte, portanto é fundamental o estudo para desenvolvimento de outros métodos de acionamentos adaptados para condições ambientais. Conforme menciona Franchi (2008).

> O método mais eficiente de controle de velocidade de motores de indução trifásicos, com menores perdas no dispositivo responsável pela variação da velocidade, consiste na variação da frequência da fonte alimentadora através de conversores de frequência, em que o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica (FRANCHI, 2008).

Os estudos e teorias desenvolvidas nesta dissertação serão aplicadas no

Bonde elétrico nº1 com capacidade de transporte de até 40 pessoas. O equipamento foi projetado e construído na década de 40 com dispositivos para controle de velocidade baseados no princípio de variação do conjugado pela inserção ou retirada de resistências no circuito rotórico, em motores com rotor tipo anéis.

Conforme Weg (2016), a inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o escorregamento (s), provocando a variação de velocidade, sendo estas variações responsáveis pelo controle e acionamentos das rodas dos rodeiros de tracionamento.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar e aplicar novo método de acionamento no Bonde elétrico nº1, substituindo o sistema de controle de velocidade que é de adição e retirada de resistência elétrica no circuito rotórico, substituindo, por inversores de frequência, um equipamento eletrônico capaz de variar a velocidade de giro dos motores elétricos alterando a frequência de rede. Para alcançar este objetivo é necessário a substituição dos painéis de comando e controle, os dois motores trifásicos de anéis por 2 motores trifásicos assíncronos de gaiola. Os motores serão acionados paralelamente por cada um dos inversores de frequência.

Também será modificado o tipo de transmissão mecânica do motoredutor para o eixo do truque, sendo que o sistema atual de transmissão é de engrenagem de dentes retos, e serão substituídos por transmissão de corrente, coroa e pinhão.

1.2 Objetivos Secundários

Proporcionar ao meio de transporte de passageiros e cargas da Usina Hidrelétrica de Itatinga um equipamento capaz de atender com segurança e eficiência as viagens de linha, reduzindo os altos custos de manutenção e consumo excessivo de energia elétrica, garantindo eficácia e conforto das viagens com baixo ruído, partidas e paradas de modos suaves.

Apresentar alternativa de acionamento por inversor de frequência, que é um método não usual, considerando que os principais transportes elétricos por vias-férreas são alimentados por corrente contínua e não por corrente alternada, que é o

tema do deste trabalho. Como a alimentação de rede do bonde é bifásica e os motores são trifásicos, pretende-se com o estudo e aplicação dos inversores de frequência poder-se obter soluções não convencionais.

1.3 Justificativa e Relevância do Tema

Entre os diversos tipos de transporte utilizados pela população, estão os meios de transportes aéreos, rodoviários, marítimos e ferroviário. Nas últimas décadas o transporte ferroviário foi perdendo espaço para os crescentes transportes rodoviários e aéreos. No sistema ferroviário as viagens são realizadas sobre linhas férreas, sendo um sistema normalmente utilizado no Brasil para transporte de mercadorias e em grandes centros comerciais, utilizados para malhas metroviárias com transporte de passageiros.

O bonde elétrico foi um dos primeiros meios de transporte coletivo sobre linhas férreas, conforme Dunlop (1973) esclarece:

> O primeiro bonde elétrico do Brasil e de toda América do Sul foi o carro de nº 104 da Cia. Ferro-Carril do Jardim Botânico, que teve sua apresentação e entrada em serviço em 8 de outubro de 1892. Levando diversos convidados ilustres, ele partiu do centro da cidade e terminou a viagem inaugural no escritório da companhia, no Largo do Machado tendo o passeio público ao fundo com a presença do presidente da República, Marechal Floriano Peixoto (DUNLOP, C. J. 1973).

Com a evolução de novas tecnologias os bondes elétricos foram perdendo espaço para os trens e metrôs, que conseguiam quantidade muito superior de transporte de mercadorias e pessoas. Para algumas cidades os bondes elétricos passaram a ser importantes veículos de resgate histórico, haja vista a reativação das linhas de bondes na cidade de Santos-SP.

O principal acesso de materiais e pessoas à Usina Hidrelétrica de Itatinga é efetuado por transporte ferroviário. Isto acontece devido aos diversos rios e terrenos irregulares ao longo dos 7,5 Km de linhas férreas.

A Companhia Docas do Estado de São Paulo CODESP é a responsável pela Usina de Itatinga e utiliza-se de dois bondes elétricos para transporte diários de mercadorias e operários.

A importância dos bondes para a Usina Hidrelétrica de Itatinga é muito mais do que um patrimônio histórico, pois trata-se também do principal meio de locomoção

da usina hidrelétrica ao município de Bertioga-SP.

A necessidade constante de utilização dos bondes elétricos requer diversas manutenções. Considerando o sistema de acionamento antigo e sem peças de reposição, os bondes tornaram-se ineficientes e pouco confiáveis para as operações diárias de viagens.

Diante destes fatos, houve a necessidade de um estudo para aplicação de novos métodos de acionamentos elétricos, que atendam e adapte a estrutura já existente como truques, chaves pantógrafas e dimensões físicas, afim de garantir e preservar as características físicas do bonde elétrico.

Contudo, dada às diversidades e complexidade deste sistema, é interessante apresentar novos métodos e técnicas, com objetivo de melhorar a eficiência de operação para garantia de melhor torque, velocidade, controle, manutenções futuras e baixo consumo de energia.

O acionamento de motores elétricos de indução por inversores de frequência é uma alternativa comum na indústria, porém quando dispõe de uma fonte de energia estável e confiável. Com objetivo de atingir estes resultados será feito um estudo para escolha de um inversor de frequência que atenda as diversas limitações da rede como: baixo nível de tensão, diversas intermitências de energia ao longo da viagem, variações de acionamento das cargas elétricas, rede disponível de entrada bifásica com acionamento de circuito trifásico.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

Na apresentação é introduzido um breve histórico da Usina Hidrelétrica de Itatinga com destaque da importância do bonde elétrico. No capítulo 1 foram apresentados os objetivos do trabalho, a justificativa e relevância do tema. No capítulo 2 é feita a fundamentação teórica dos componentes que fazem parte do acionamento do Bonde, funcionamento dos motores trifásicos de anéis e de indução, conceitos dos conversores rotativo de fase, conceitos básicos do truque ferroviário, estudo das características dos inversores de frequência com análise de busca automática de velocidade, escolha do inversor de frequência, banco de resistores e redutores de velocidade. No capítulo 3 foram apresentados materiais e métodos para os

desenvolvimentos e preparação dos novos acionamentos com a desmontagem dos motores e rodeiros, preparação dos eixos dos rodeiros, reforma da chave pantógrafa, substituição do sistema de transmissão, desenvolvimento de projeto elétrico e instalação dos painéis de comando. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, iniciando-se pela apresentação e avaliação dos dados do sistema antigo, parametrização dos inversores de frequência, ensaios de operação com sistema modernizado, análise do comportamento do controle de acionamento no processo de desaceleração e comparativos de consumo de potência dos acionamentos. São discutidos os resultados finais obtidos com instrumentos elétricos e com o simulador *Trend Recorder* (*software*), do Inversor de frequência Yaskawa instalado no Bonde nº1, avaliando a eficácia do método aplicado. Finalmente no capítulo 5 foram apresentadas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica compreende o novo método de acionamento do bonde elétrico com fundamentação de, motores trifásicos assíncronos de anéis, motores assíncronos de gaiola, conversor rotafase, banco de resistências, chave comutadoras de velocidade, inversores de frequência, moto redutor, chave pantógrafo de captação de corrente elétrica, transmissão mecânica com engrenagem de dentes retos e de corrente coroa e pinhão, truques mancais e rodeiros, bem como o processo preparação e alinhamento mecânico, conceitos parametrização dos inversores de frequência com busca automática de velocidade.

2.1 Sistema atual de acionamento do Bonde elétrico

O Bonde nº1 está equipado com 2 motores trifásicos assíncronos de rotor bobinado (motor de anéis) que são acionados em paralelo, tendo a velocidade controlada através da queda de tensão por bancos externos de resistências. O sistema tem uma alimentação geral bifásica de 440 (V) em corrente alternada, tendo a captação de energia de uma fase através das rodas sobre as linhas férreas (fase aterrada) e a segunda fase pelo sistema de captação denominado pantógrafo que desliza sobre o fio *trolley*. Policicchio (2008) esclarece que:

> Pantógrafo é um órgão que permite, por veículos ferroviários, a recepção de energia elétrica a partir de uma linha aérea acima, afim de unir a equipamentos como motores, aquecimento elétrico, ar condicionado e todos os dispositivos auxiliares eventual tabuleiro (POLICICCHIO, 2008).

Segue descrito no quadro 1, os dados e características dos equipamentos que compõe o sistema de acionamento do Bonde nº1.

Quadro 1: Dados dos equipamentos principais do Bonde nº1.

Equipamento	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (KW)
Motor de anéis nº1	440 trifásico	18	7,5
Motor de anéis nº2	440 trifásico	18	7,5
Conversor Rotafase	440 trifásico	39	15
Banco de resistência nº1	440 monofásico	7	3

Banco de resistência nº2	440 monofásico	7	3
Banco de resistência nº3	440 monofásico	7	6
Banco de resistência nº4	440 monofásico	7	3
Indutor	440 monofásico		
Chave de partida à óleo	440 monofásico		7
Chave de controle montante	440 monofásico		7
Chave de controle jusante	440 monofásico		7

Fonte: (ITATINGA. U, 1945).

O sistema elétrico existente do Bonde nº1, foi adquirido em 1945 conforme o diagrama elétrico abaixo, mostrado nas figuras 3 e 4.

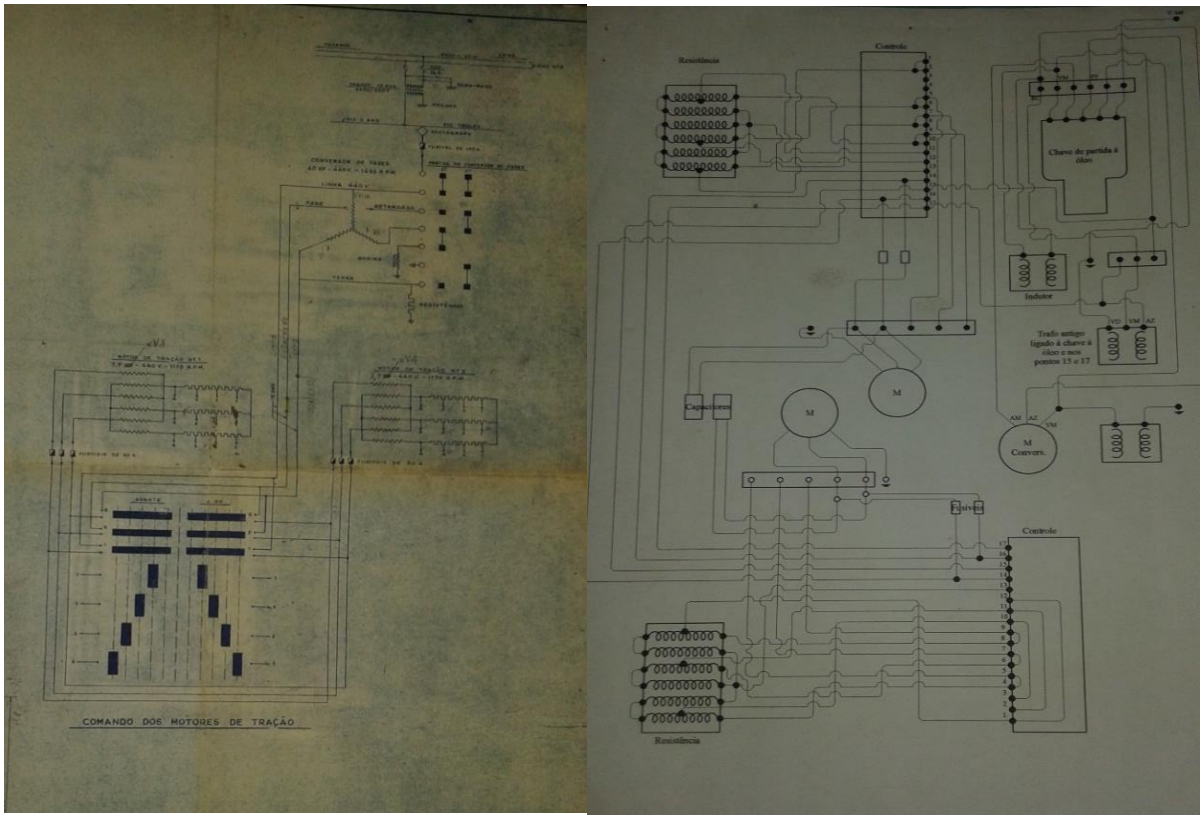


Figura 3 e 4 – Diagrama elétrico de acionamento do bonde nº1.
Fonte: (ITATINGA. 1945).

Na época era um sistema eficiente para um bom controle de velocidade em se tratando de corrente alternada, já que grande parte do sistema de alimentação de bondes, trólebus e metrôs é feito por corrente continua. O sistema hoje utilizado, demanda manutenções excessivas, alto consumo de corrente elétrica e baixa

confiabilidade para condução das viagens com qualidade.

2.2 Motores elétricos

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica de utilização (FILHO, 2007). Os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos, tomada a forma da tensão como base: corrente contínua e corrente alternada.

Para melhor visualização dos diferentes tipos de motores elétricos, segue a figura 5 que representa o universo tecnológico dos motores elétricos.

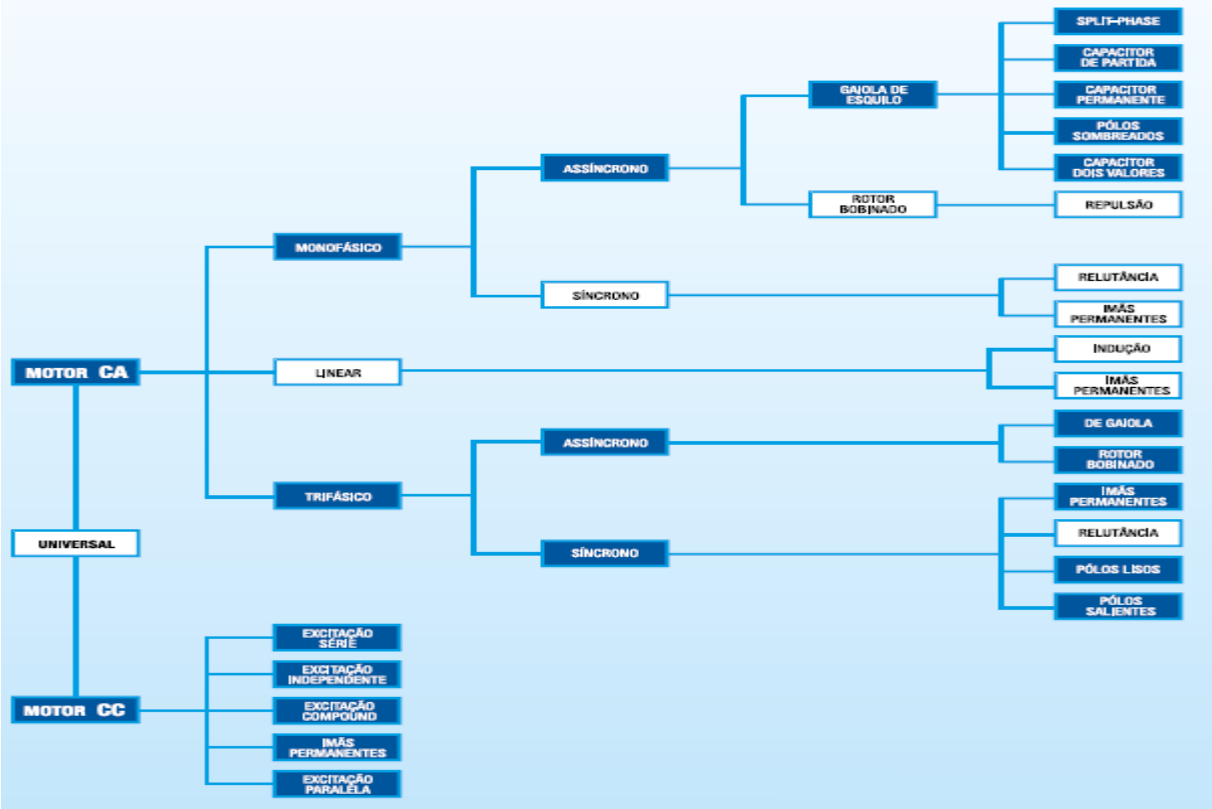


Figura 5 – Universo tecnológico de motores elétricos.
Fonte: (WEG, 2016).

A seguir serão descritos os tipos de motores de corrente alternada, nos quais estão envolvidos no processo de mudança, aplicações, testes e ensaios no Bonde nº1.

2.3 Motores assíncronos trifásico de anéis

O sistema atual instalado está composto de dois motores assíncronos trifásicos de anéis. Os motores elétricos são aqueles alimentados por um sistema trifásico a três fios, em que as tensões estão defasadas de 120º elétricos (FILHO, 2007).

A figura 6 mostra os principais componentes do motor trifásico de rotor bobinado com barra de curto circuito para a variação de resistência para controlar a velocidade.

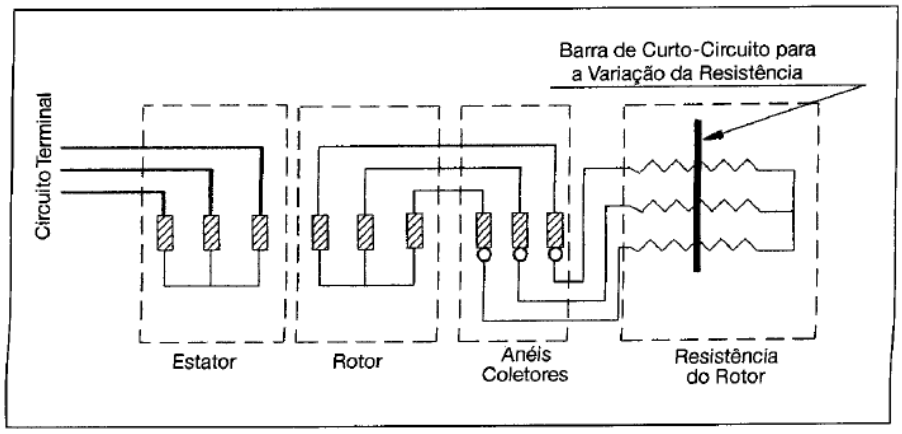


Figura 6 – Motor de rotor bobinado.

Fonte: (FILHO, 2007).

Os motores trifásicos são constituídos de duas partes básicas: o estator e rotor. Conforme Filho (2007) o estator é formado por três elementos: a carcaça; o núcleo e os enrolamentos e o rotor também constituem por três elementos: o eixo; o núcleo e os enrolamentos. As correntes rotóricas são geradas eletromagneticamente pelo estator, único elemento do motor ligado à linha de alimentação.

Os motores de anéis são de emprego frequente nos projetos industriais, principalmente quando se necessita de controle adequado à movimentação de carga ou quando se deseja acionar uma determinada carga através de reostato de partida. De acordo com Franchi (2008):

> O rotor bobinado tem um enrolamento composto por três bobinas, semelhantes ao estator do motor. Essas bobinas são ligadas normalmente em estrela, com os três terminais livres conectados a anéis deslizantes no eixo do rotor. Esses anéis permitem, por meio de escovas, a conexão de reostatos (resistores variáveis) no circuito das bobinas do rotor para manipular as características de partida, como,

> por exemplo, melhorar o conjugado de partida e diminuir o pico de corrente na partida (FRANCHI, 2008).

Para um controle da variação de velocidade, a inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o escorregamento (s), provocando a variação da velocidade (WEG, 2016), baseia-se na equação (1) do escorregamento, onde Pj2 (perdas rotórica em watts); ωo (rotação síncrona em rd/s); T (torque ou conjugado do rotor); R2 (resistência rotórica em ohms); I²2 (corrente rotórica em amperes); s (escorregamento).

$$s = \frac{Pj2}{Wo*T} = \frac{3*R2*I^2 2}{Wo*T} \quad (1)$$

Na figura 7 tem-se o efeito do aumento de R2 que é a resistência rotórica sobre a velocidade.

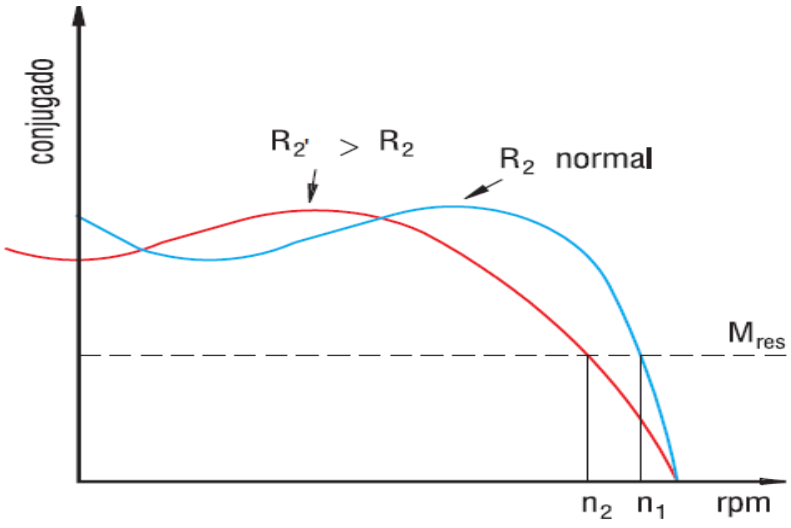


Figura 7 – Curva de conjugado com variação da resistência rotórica.
Fonte: (WEG, 2016).

O motor de rotor bobinado, além de proporcionar arranque satisfatório, tem uma corrente de partida de baixa intensidade cerca de uma vez e meia o valor da corrente nominal conforme (PROCEL ELETROBRAS, 2009). Os motores de rotor bobinado, porém, são menos econômicos que os outros, devido ao elevado custo de seus enrolamentos e ao sistema de conexão das bobinas do rotor composto por anéis, escovas, porta-escovas, condutores e reostato, seguindo grande desvantagem devido

a necessidade de reostato de grande potência e exigência excessiva de manutenções do que os motores de indução rotor gaiola de esquilo.

A tabela 1 mostra a comparação entre os dois tipos de máquinas, conforme Weg (2016).

Tipo	Motor de indução de gaiola	Motor de indução de anéis
Projeto	Rotor não enrolamento	Rotor enrolamento
Corrente de partida	Alta	Baixa
Conjugado de partida	Baixo	Alto
Corrente de partida / corrente nominal	Alta	Baixa
Conjugado máximo	> 160% do conjugado nominal	> 160% do conjugado nominal
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de partida	Simples para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de proteção	Simples	Simples
Espaço requerido	Pequeno	Reostato requer um espaço grande
Manutenção	Pequena	Nos anéis e escovas - frequente
Custo	Baixo	Alto

Tabela 1 – Comparação entre os dois tipos de máquinas.

Fonte: (WEG, 2016).

As figuras 8 e 9 mostram os motores trifásicos de anéis instalado no Bonde nº1, que é alvo de análise e discussões para substituição por motores trifásicos de indução de gaiola de esquilo.

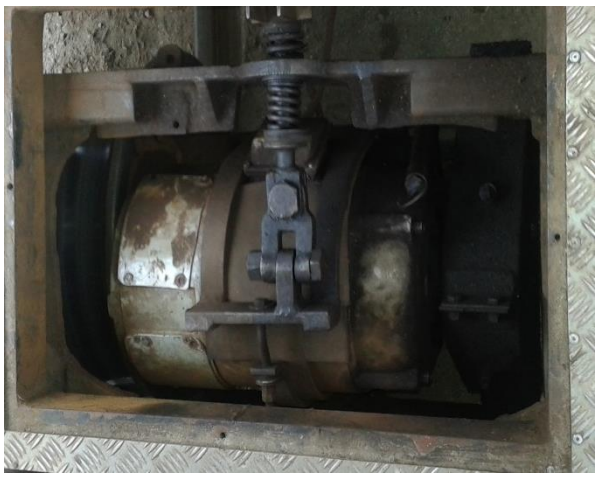
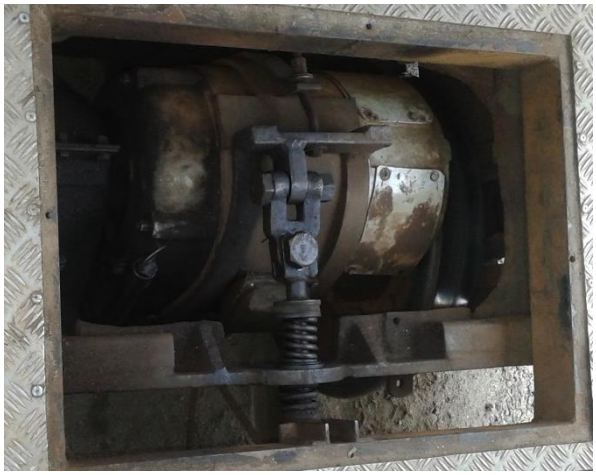



Figura 8 e 9 – Motores de rotor bobinado (anéis) do Bonde nº1.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

2.4 Motores de indução “assíncronos” trifásico de anéis

Motor de indução é um motor elétrico construído de tal maneira que se têm dois campos magnéticos girantes. Os motores de indução são máquinas elétricas, concretamente máquinas assíncronas “motor assíncrono”. A origem do motor de indução foi criada por Nikola Tesla que desenvolveu no período de 1883 em Estrasburgo (França).

O princípio de funcionamento é de um campo magnético girante que provoca a rotação do rotor da máquina, os motores são classificados conforme menciona Henrique (2015).

> Os motores CA são classificados geralmente em dois tipos principais: motores de indução “assíncrono” e motores síncronos. O motor síncrono é um alternador funcionando como motor, aplica-se corrente alternada (CA) ao estator e curto circuita (CC) ao rotor. O motor de indução difere do motor síncrono por não ter o seu rotor ligado a qualquer fonte de alimentação, sendo o seu rotor alimentado por indução magnética (HENRIQUE, 2015).

O motor de indução é o motor CA mais usado, por causa de sua simplicidade, construção robusta, baixo custo de fabricação e boas características de funcionamento, estas características do motor de indução resultam que não necessita de conexões externas. O nome do motor de indução é derivado do fato de serem induzidas correntes alternadas no circuito do rotor, pelo campo magnético girante produzido nas bobinas do estator.

A construção do estator do motor de indução é praticamente igual à do estator do motor síncrono, mas os seus rotores são completamente diferentes. O rotor do motor de indução é um cilindro laminado, com ranhuras na superfície. Os enrolamentos colocados nessas ranhuras podem ser de dois tipos: O tipo rotor de gaiola e rotor bobinado ou rotor enrolado.

O motor de indução trifásico com rotor curto-circuitado, “rotor de gaiola” comumente conhecido, é um dos mais utilizados no mundo.

A figura 10 mostra a vista explodida dos principais componentes de um motor de indução.

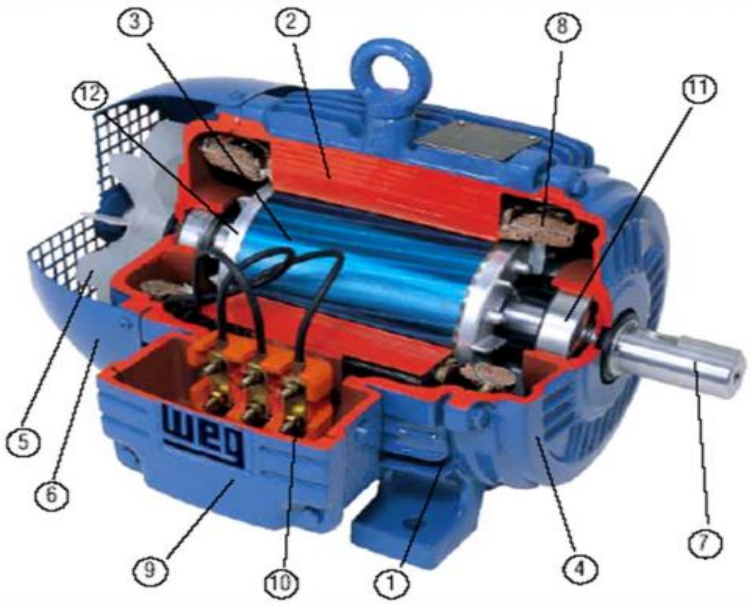


Figura 10 - Vista em corte de um motor de indução trifásico em rotor de gaiola.
Fonte: (WEG, 2016).

Conforme Weg (2016), segue a relação dos principais componentes de um motor de indução trifásico:

(1) Carcaça é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente a corrosão e normalmente com aletas.

(2) Núcleo de chapas, as chapas são de aço magnético.

(3) Núcleo de chapas, as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.

(4) Tampa.

(5) Ventilador.

(6) Tampa defletora.

(7) Eixo, transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

(8) Enrolamento trifásico, três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.

(9) Caixa de ligação.

(10) Terminais.

(11) Rolamentos.

(12) Barras e anéis de curto-circuito, são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

Os motores trifásicos de indução quando operados por inversores de frequência devem tolerar altos conteúdos de harmônicos da tensão fornecida. Conforme a Nbr17094 (2008) esclarece que:

> Quando a tensão de alimentação for significantemente não senoidal, por exemplo, derivada de um conversor estático, o valor eficaz da forma de onda total e da fundamental são ambos relevantes e determinam o desempenho performance do motor de indução. (NBR17094, 2008).

O motor escolhido para aplicação e testes no bonde elétrico é um motor de indução trifásico de alto rendimento de características conforme a quadro 2.

Quadro 2 – Característica técnicas do motor de indução de alto rendimento.

Fonte: (MARATHON, 2016).

Fabricante	Marathon
Modelo	HJN 132M1-4
Potência	12,5 CV
Tensão	220/380/440/760 V
Corrente	31,2/18,1/15,6 A
Nº Fases	3
Ip/In	7,0
Carcaça	132M1
F.S.	1,15
Rotação	1758 RPM
Rendimento	90%
Cos. ϕ	0,86
Massa	88Kg

Rolamentos	6308ZZC3

Conforme Procel Eletrobras (2016), relata as principais vantagens para escolha deste equipamento.

> Entre suas vantagens, estão: menor custo, apresenta menor exigência de manutenção, atendem um grande número de diferentes cargas, são utilizáveis em qualquer ambiente, ligação à rede simples e são cargas equilibradas. Suas desvantagens são: fator de potência baixo em carga parcial, rendimento baixo para cargas inferiores a 50% da sua potência nominal, corrente de partida elevada. Atualmente, a aplicação de controles eletrônicos está fazendo com que os motores especiais, com rotores bobinados ou de corrente contínua, sejam utilizados somente em casos especiais (PROCEL ELETROBRAS, 2016).

A principal desvantagem é a elevada corrente de partida conforme esclarece Weg (2016), entretanto, existem possibilidades para amenizar os efeitos desta corrente, como, por exemplo os conversores de frequência. Estes dispositivos utilizam componentes eletrônicos para controlar a tensão e corrente aplicada no estator do motor.

A partida e o controle da velocidade pode ser programada de forma suave, reduzindo consequentemente, o pico da corrente de partida tendo um resultado de diminuição do estresse térmico e mecânico. Com a eliminação do estresse mecânico aumentamos a vida útil dos motores e equipamentos acoplado principalmente durante a partida, conforme Procel Eletrobras (2009).

A suave operação de um motor elétrico tem impacto positivo em todo o conjunto mecânico evitando folgas e desalinhamento que são os principais causadores de sobrecarga térmica e manutenções corretivas. O funcionamento desta máquina fora dos padrões de normalidade podem anular os benefícios da utilização de um motor de alto rendimento.

A escolha do motor de alto rendimento se dá aos diversos benefícios disponíveis para sua utilização, conforme Annunciação (2011) que esclarece:

> Os motores de alto rendimento são motores projetados para fornecer a mesma potência na ponta do eixo assim como, outros tipos de motores, porém, consumindo menos energia elétrica. Os motores de alto rendimento têm seu projeto modificado, em relação aos motores da linha padrão, objetivando a diminuição da sua perda global. Normalmente, as perdas por efeito joule estatórico do motor de alto rendimento é maior que as mesmas perdas no motor da linha padrão.

> Enquanto que com as perdas suplementares acontece o contrário. (ANNUNCIAÇÃO, 2011).

O autor complementa afirmando que:

> As características dos motores das linhas padrão e alto rendimento são técnica, elétrica e mecanicamente similares e atendem ao acionamento da carga sem que sejam necessárias adequações. A aquisição de um motor de alto rendimento, neste sentido, deve levar em conta o custo de aquisição, em média 30% mais caro que o motor da linha padrão, e o menor custo operacional devido à sua maior eficiência. A substituição, todavia, requer uma avaliação técnico-econômica, de modo a verificar se a economia de energia obtida é suficiente para pagar a diferença de preço em tempo razoável (ANNUNCIAÇÃO, 2011).

2.5 Conversor rotativo de fase - Rotafase

Conversores rotativos de fase são máquinas elétricas com dispositivos capazes de converter uma corrente elétrica monofásica em energia elétrica trifásica. A conversão é feita alimentando na partida com duas fases um motor trifásico e após rotação atingir próxima à nominal, o fechamento interno da máquina induz a terceira fase, ocorrendo um certo desequilíbrio de tensão e corrente com redução aproximada de até 1/3 da potência nominal da máquina.

Existem três principais tipos de conversores de fase: conversores digitais, conversores rotativos e conversores estáticos, conforme esclarece Kay Industries (1987).

> Enquanto os três principais tipos de conversores de fase geram 1/3 de stress, além das duas voltagens presentes e na fase de fornecimento do serviço, cada tipo realiza isso de diferentes maneiras. Conversores de fase rotativos usa um motor trifásico e um grupo de condensadores que funcionam juntos, como uma grande condensador. A fonte monofásica está ligado a dois dos três condutores do motor. O terceiro cabo do motor está ligado a uma das saídas de fase única em série com o condensador de grupo, e os cabos de saída de inversor ligado aos três bornes do motor. Assim, o conversor de fase rotativo gera fontes de energia com 1/3 e simultaneamente combinada com as outras duas correntes a partir da alimentação monofásica. Conversores de fase estáticos produz uma corrente da terceira fase, em complemento às correntes de fonte de alimentação monofásica, somente quando o item que está sendo alimentado é operado e não precisa ser usado para alimentação trifásica a longo prazo (KAY INDUSTRES, 1987).

O tipo mais utilizado e moderno de conversor de fase é o conversor digital, sendo completamente diferente dos outros, uma vez que é totalmente eletrônico. A terceira fase é produzida através de um processo de IGBT de dupla conversão, em que a tensão monofásica AC é convertida para DC e depois volta para AC. Este tipo de processo será apresentado no capítulo 2.4 sobre conversor de frequência.

Segue no quadro 3 os dados de placa do conversor de fase “rotafase” e as características fisícas através da figura 11.

Quadro 3 – Características técnicas do motor conversor de fase “rotafase”.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Fabricante	G.E.
Modelo	156642
Potência	40 HP
Tensão	440V
Corrente	39 A
Nº Fases	3
Rotação	1475 RPM

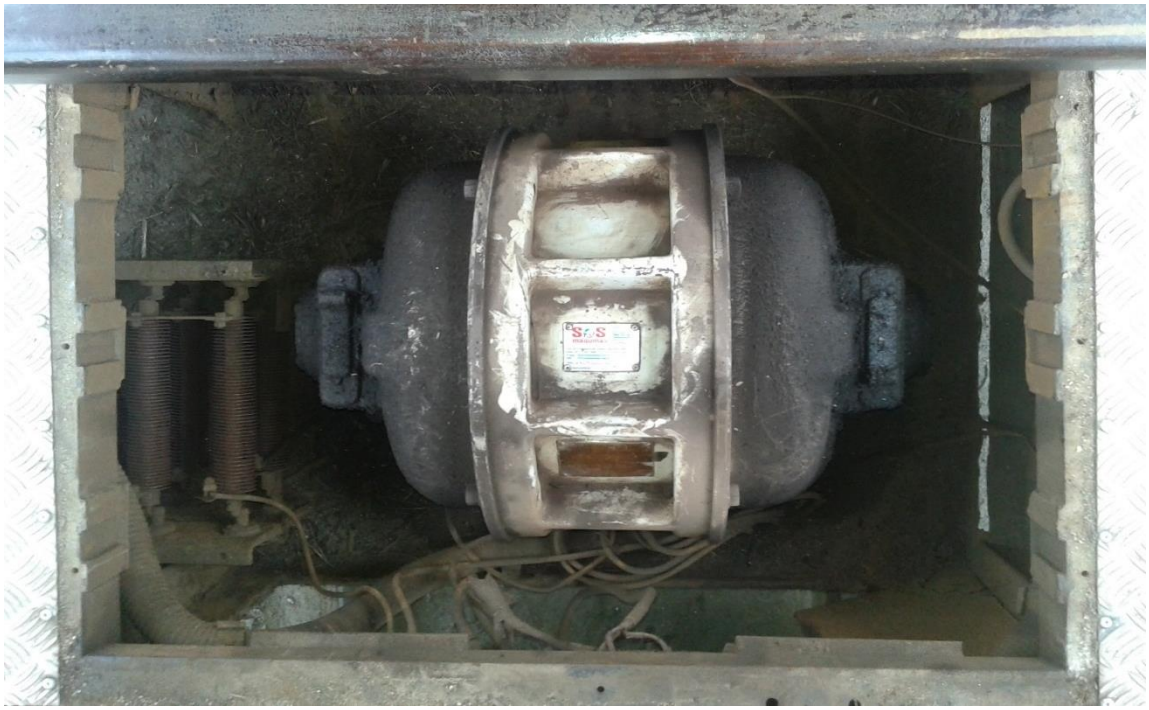


Figura 11 – Conversor de fase - Rotafase.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

São conhecidas as grandes vantagens da utilização de motores trifásicos comparado aos motores bifásicos devido as limitações de potências disponíveis, tamanhos físicos e altas correntes de partidas. Devido as desvantagens tem-se optado por motores trifásicos alimentados por equipamentos que convertem o sistema monofásico em um sistema trifásico. No Brasil, a utilização destes tipos de conversores começou a ser notada no final da década de 70. Estes conversores são de dois tipos: rotativos e estáticos (MIRANDA, 2007).

> As principais desvantagens dos conversores rotativos são o grande volume e a necessidade de manutenção constante, devido as partes móveis do conversor. Todos estes conversores apresentados têm em comum o fato de serem exclusivos para acionamento de motores, não podendo ser aplicados em outros tipos de cargas, sejam elas trifásicas, bifásicas ou monofásicas (MIRANDA, 2007).

2.6 Truque ferroviário

O sistema ferroviário é composto de uma via com trilhos que guia os rodeiros dos veículos ao longo de sua trajetória. Os rodeiros são compostos por rodas cônicas que desenvolvem forças de direcionamento que permite a centralização do rodeiro em retas e a inscrição em curvas (BARBOSA, 1999).

Um veículo ferroviário, sobre sua estrutura de rodagem, é formado basicamente de uma estrutura reforçada apoiada sobre dois truques. Os truques são responsáveis pela transferência da carga imposta pelo veículo aos trilhos e, através dos rodeiros, pela movimentação dos veículos ao longo da linha (SISDELLI, 2006).

A figura 12 mostra os principais componentes de um truque motorizado.

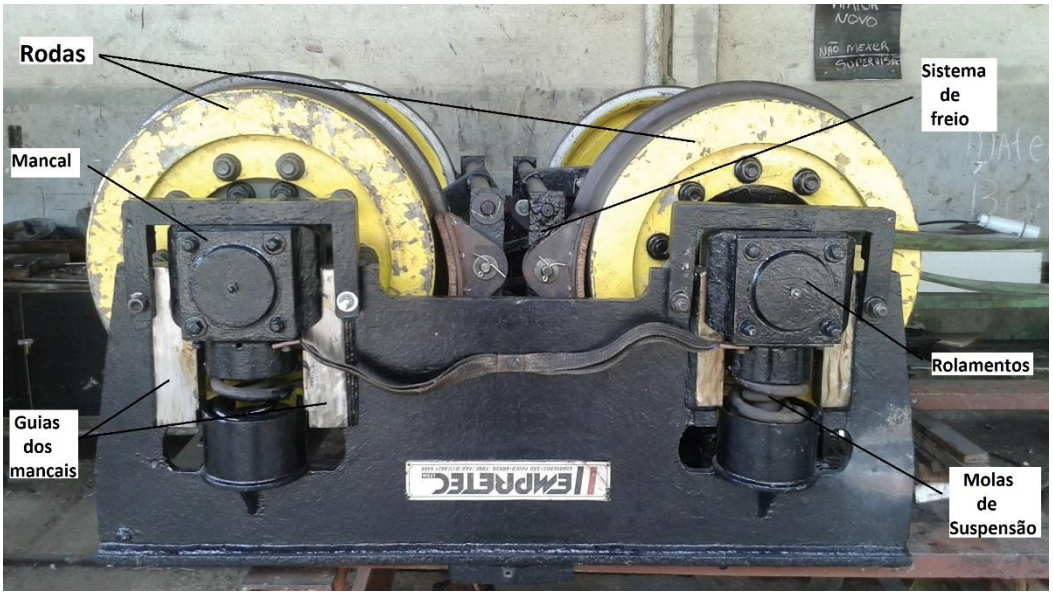


Figura 12 – Principais componentes de um Truque motorizado.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

Cada truque é formado pelo conjunto de rodeiros, mancais, molas, rolamentos, sistema de freio, engrenagem de tracionamento e motor de tracionamento. Os rodeiros é o conjunto formado por eixo, rodas, mancais e rolamentos, conforme define Barbosa (1999):

> O rodeiro ferroviário é um elemento mecânico que suporta a carga vertical dos veículos metro-ferroviários e tem a importante função de direcionar automaticamente o veículo nas curvas. Tal façanha, objeto de desejo dos veículos automotores, é obtido pela conicidade das rodas que são unidas rigidamente ao eixo formando o rodeiro (BARBOSA, 1999).

A distância entre as partes externas dos flanges das rodas do rodeiro, é chamada de bitola ferroviária que é a distância entre as partes internas das superfícies dos trilhos.

A figura 13 mostra o posicionamento de um rodeiro sobre as linhas férreas.

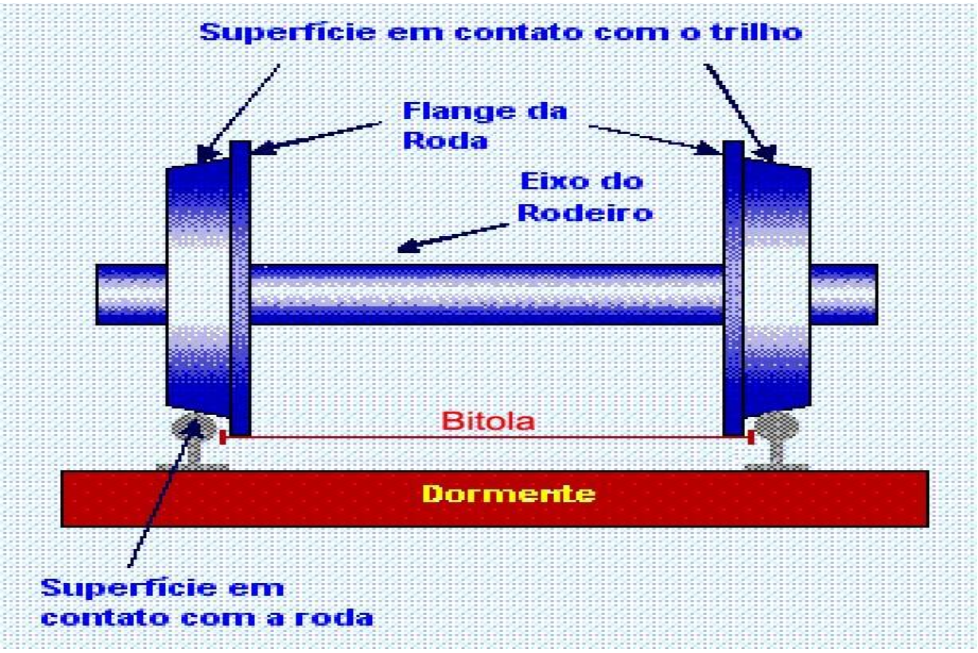


Figura 13 – Posicionamento de um rodeiro sobre as linhas férreas.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

2.7 Conversor de frequência

Os conversores de frequência, também conhecidos como inversores de frequência, são dispositivos elétricos que convertem a tensão da rede alternada senoidal em tensão contínua num barramento CC, e finalmente convertem esta última em uma tensão de amplitude e período variáveis. Clodoaldo (2009) afirma que:

> Desde que os primeiros motores surgiram, os projetistas perceberam uma necessidade básica, controlar sua velocidade, várias técnicas foram utilizadas ao longo dos anos e tiveram seu tempo de glória, com o aperfeiçoamento da eletrônica de potência, e a fácil integração com outros dispositivos, criou-se o inversor de frequência, um dispositivo eletrônico, que é de fundamental importância na indústria. Ideia básica de funcionamento o sinal AC da rede é convertido em DC, e este novamente em AC, porém, agora pulsado e com largura modulada, assim podemos ajustar sua frequência e sua tensão e com isso controlar sua velocidade e seu torque (CLODOALDO, 2009).

Através da descoberta deste método de acionamento para o controle de partida e velocidade, ganhou espaço na indústria através de suas aplicações simplificadas e eficientes. De acordo com Filho (2007), o avanço dos inversores nas diversas indústrias são:

> Nas indústrias química e petroquímicas, cimento, siderurgia, têxtil, bebidas etc. são amplamente utilizadas o controle de velocidade dos

> motores elétricos em função do processo de manufaturação. Até poucos anos atrás estas questões vinham sendo resolvidas com a aplicação de motores de corrente contínua quando se desejava um controle de velocidade contínuo. Porém, com o advento da eletrônica de potência foram desenvolvidos equipamentos apropriados, denominados inversores de frequência, associados à microeletrônica, de forma a permitir o uso de motores de indução com rotor em curto-circuito em substituição aos motores de corrente contínua. Os motores de indução são robustos, de fácil manutenção e de custo reduzido comparado aos demais. Já os motores de corrente contínua são caros e de manutenção frequente e onerosa (FILHO, 2007).

O controle de velocidade dos motores com rotor em curto-circuito é possível com o uso dos inversores de frequência que são equipamentos constituídos basicamente por um retificador e um inverso, conforme mostrado na figura 14.

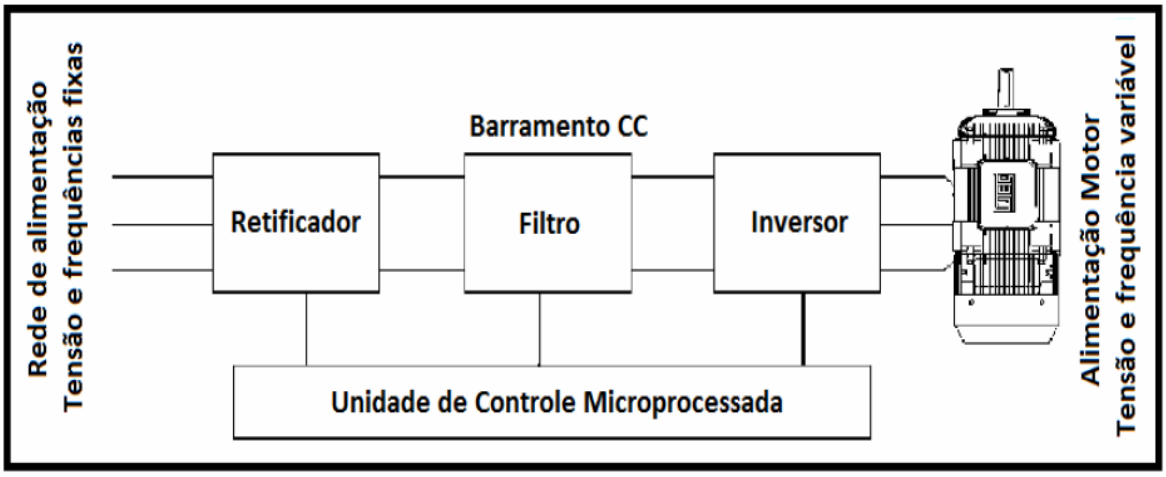


Figura 14 – Diagrama de blocos do motor.
Fonte: (MOLLER, 2016).

Os motores de indução são dispostos de um fluxo alternado $\emptyset_1$ resultante da tensão alternada V_1 no estator induz uma $f.e.m.$ no rotor e esta $f.e.m.$ produz um fluxo $\emptyset_2$, que é proporcional à tensão V_2 e inversamente proporcional à frequência (CREDER, 2009), a equação (2) mostra a relação destas forças.

$$\emptyset_2 \infty \frac{V_2}{f} \tag{2}$$

Para um torque constante, a relação V_2 / f dever ser constante garantindo um fluxo constante. A conversão da frequência aplicada ao motor pode ser visualizada por meio do circuito simplificado, disposto na figura 15.

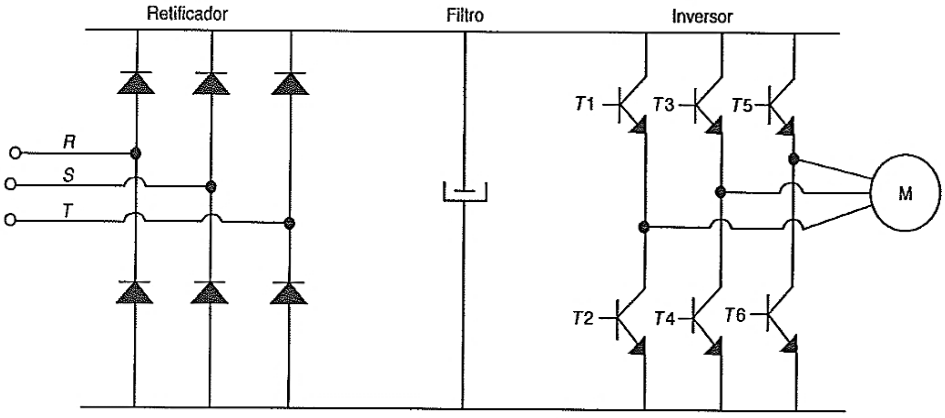


Figura 15 – Acionamento por variação de frequência.
Fonte: (CREDER, 2008).

Pode-se notar que a rede AC em frequência estável de 60Hz é retificada logo na entrada. Através de um capacitor (filtro), forma-se um barramento de tensão contínua (barramento DC). A tensão DC pode chegar a 380 VCC para redes trifásicas de 220VCA, 660 VCC para redes de 380VCA e até 760VCC para redes de 440VCA, extraindo estes valores com aplicação da equação (3), para redes trifásicas.

$$Vdc = \sqrt{3} \, . Vrede \tag{3}$$

Os IGBT's que são o conjunto dos 6 transistores mostrado na figura 13, são chaveados três a três formando uma tensão alternada na saída U, V e W defasadas de 120º elétricos, exatamente como a rede. A única diferença é que ao invés de uma senóide, tem-se uma forma de onda quadrada. Portanto o motor elétrico AC alimentado por um inversor tem em seus terminais uma onda quadrada de tensão. Creder (2008) estabelece que:

> Esta tensão contínua é conectada ciclicamente aos terminais de saída pelos transistores T_1 a T_6 que funcionam no modo corte ou saturação. O controle destes transistores é feito pelo circuito de comando, de modo a obter um sistema de tensão pulsada, cujas frequências fundamentais estão defasadas de 120º. A tensão e a frequência de saída são escolhidas de modo que a tensão V_2 seja

> proporcional à frequência f para que o fluxo $\emptyset_2$, seja constante e o torque também o seja (CREDER, 2008).

As tensões de saída têm forma de ondas quadradas, mas em formato cíclico senoidal, conforme notamos na figura 16.

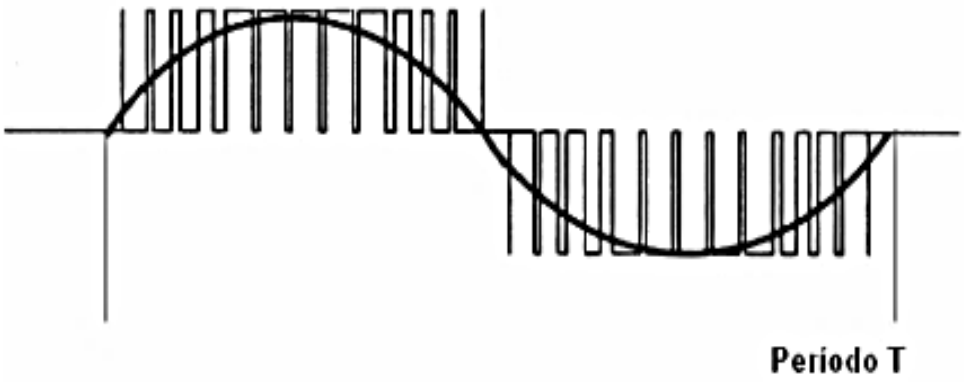


Figura 16 – Modulação de tensão de saída.
Fonte: (WEG, 2016).

O circuito que comanda os IGBT's é o elemento responsável pela geração dos pulsos de controle dos transistores de potência. Atuando sobre a taxa de variação do chaveamento dos transistores, controla-se a tensão e frequência do sinal gerado. Isso permite ao conversor até ultrapassar a frequência da rede. O método de modulação PWM (Pulse With Modulation) fornece ao motor uma corrente senoidal a partir de chaveamentos na faixa de 2KHz.

Este sistema de controle permite o acionamento de motores de indução com frequências compreendidas entre 1 e 60Hz com um torque constante, sem aquecimentos anormais e nem vibrações exageradas. Creder (2008) aponta outras vantagens:

> Rendimentos de 90% em toda a faixa de velocidades;
> Fator de potência de 96%;
> Acionamento de carga constante ou variável;
> Faixa de variação de velocidade podendo chegar a 1:20;
> Eliminação de correntes de partidas elevadas (partida em rampa);
> Aplicação em motores normalizados etc; (CREDER, 2008).

Os inversores de frequência de última geração, não somente variam como regulam a velocidade do eixo de motores de indução C.A. trifásicos, e também, realizam o controle de outros parâmetros inerentes a esse motor, sendo que um deles é o controle de torque. Lenz (2016) esclarece que:

> Através da funcionalidade que os microscontroladores trouxeram, os conversores de frequência hoje, são dotados de poderosas CPUs ou placas de controle micro controladas, que possibilitam uma infindável variedade de métodos de controle, expandindo e flexibilizando o uso dos mesmos. Cada fabricante consegue implementar sua própria estratégia de controle, de modo a obter domínio total sobre o comportamento do eixo do motor, permitindo que em muitas aplicações motores de indução C.A. trifásicos substituam inclusive servos motores. Os benefícios são diversos, como redução no custo de desenvolvimento, custo dos sistemas de acionamento, custo de manutenção (LENZ, 2016).

2.8 Escolha do conversor de frequência

Para escolher um modelo de equipamento é necessário a consulta aos catálogos dos fabricantes, e procurar um que atenda algumas características mínimas necessárias, quanto ao fabricante, o preço e qualidade desejada. O mercado dispõe de uma grande quantidade de equipamentos desenvolvida para as mais diversas variedades de aplicações e setores industriais (FRANCHI, 2008).

No processo de análise para a escolha de um inversor de frequência, seguiram-se duas linhas de problemas existente, sendo os problemas estruturais na infraestrutura de alimentação da linha do cabo *trolley* e no sistema de carga do Bonde nº1.

A primeira é selecionar um inversor que seja capaz de receber uma tensão de alimentação bifásica e acionar uma carga trifásica, considerando um circuito instável com variação de tensão na ordem 12%; a tensão nominal de projeto é 440 V bifásico, mas a tensão de operação varia de 380 V à 420 V bifásicos.

O segundo ponto crítico para seleção do equipamento, é o tipo de carga que será acionada, tendo comportamentos distintos para cada necessidade como: partida em plena carga; partida com carga mínima; partida em aclive e declive.

Mas o item que gerou a maior preocupação foi a intermitência de tensão, conforme figura 17, ocasionada pelo contato deslizante da chave pantógrafa, à linha aérea do fio *trolley*.

Figura 17 – Chave pantógrafa com contato deslizante no cabo *trolley*.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

Para a constante intermitência de sinal de tensão ao longo da viagem de 7,5km de distância, a empresa fabricante Yaskawa ofertou um equipamento com a garantia de operar com as diversas anomalias apresentadas.

No quadro 4 seguem as características técnicas do inversor de frequência escolhido para análise.

Quadro 4 – Característica técnicas dos inversores de frequência.
Fonte: (YASKAWA, 2016).

	Inversor U01	Inversor U02
Fabricante	YASKAWA ELECTRIC	YASKAWA ELECTRIC
Modelo	CIMR VU4A0038FAA	CIMR VU4A0038FAA
Série	V1000	V1000
Input	AC3PH	AC3PH
Tensão Input	380 – 480 V	380 – 480 V
Corrente Input	44 A / 39 A	44 A / 39 A
Frequência Input	50/60 Hz	50/60 Hz
Output	AC3PH	AC3PH
Tensão Output	0 – 480 V	0 – 480 V
Corrente Output	38 A / 31 A	38 A / 31 A
Frequência Output	0 / 400 Hz	0 / 400 Hz

Massa	5,5 Kg	5,5 Kg
File no	E131457	E131457
S/N	1W1535803520065	1W1535803520060
Proteção	IP20	IP20
Type 1	Enclosure	Enclosure
PGR	1025	1025

Durante uma viagem de linha há diversas intermitências de tensão, essas anomalias não devem prejudicar a velocidade durante o percurso da viagem. É importante manter carregado seus parâmetros de controle de torque e velocidade no momento de falhas “ausência de tensão”, conforme Yaskawa (2016) chamando de Inversores de frequência com busca automática de velocidade, haverá redução significativa no tempo para retomada da rotação, quando houver interrupção momentânea no fornecimento de energia. Para Yaskawa (2016):

> A função *Speed Search* (busca rápida) permite que o inversor detecte a velocidade de um eixo de motor girando que seja acionado por força externas e inicie a operação do motor diretamente da velocidade detectada sem ter que parar primeiro a máquina. Exemplo: Quando ocorre uma perda temporária de energia, a saída do inversor desliga e o motor gira por inércia. Quando a energia retoma, o inversor pode localizar a velocidade do motor girando por inércia e reiniciá-lo diretamente.
> Em motores de indução, o inversor oferece dois tipos de *Speed Search* (busca rápida) que podem ser selecionados pelo parâmetro *Speed Estimation* (estimativa de velocidade) e *Current Detection* (detecção de corrente). Ambos os métodos são explicados abaixo, seguidos por uma descrição de todos os parâmetros relevantes (YASKAWA, 2016).

A busca rápida de detecção de corrente, detecta a velocidade do motor examinando a corrente do motor. Quando a busca rápida é iniciada, ela reduz a frequência de saída iniciando a partir da frequência de saída máxima ou da referência enquanto aumenta a tensão de saída usando o tempo definido L2-04, conforme ilustrado na figura 18.

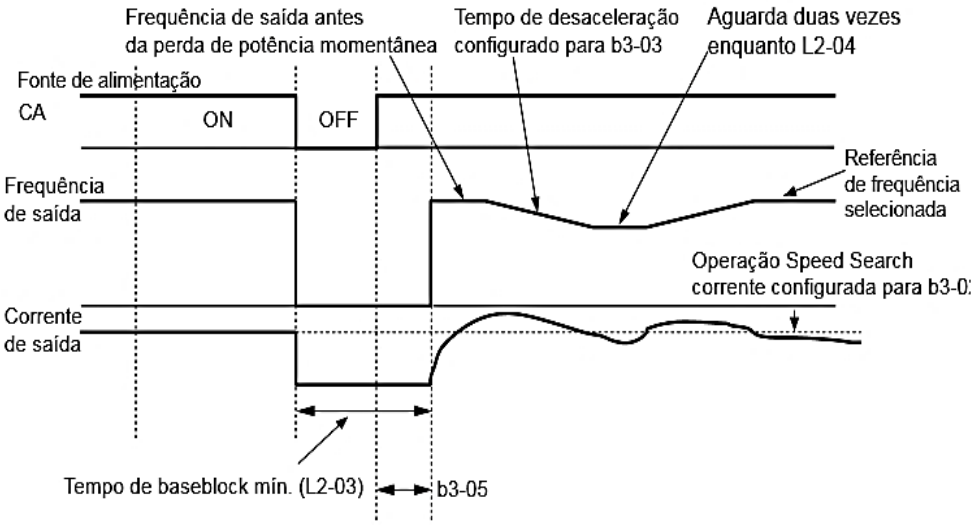


Figura 18 – Busca rápida de detecção de corrente após perda de energia.
Fonte: (YASKAWA, 2016).

Depois de a energia ser restaurada, o inversor aguardará até que o tempo seja definido em b3-05 passe antes de executar a *speed search* (busca rápida). Com isso, a *speed search* (busca rápida) pode não iniciar no fim de L2-03, mas depois.

Quando a *speed search* (busca rápida) é aplicada automaticamente com o comando *Run* (rodar), o inversor aguarda o tempo de *baseblock* (bloco de base) mínimo em L2-03 antes de iniciá-la. Se L2-03 for menor que o tempo definido para o parâmetro b3-05, então b3-05 é usado como tempo de espera, conforme a figura 19.

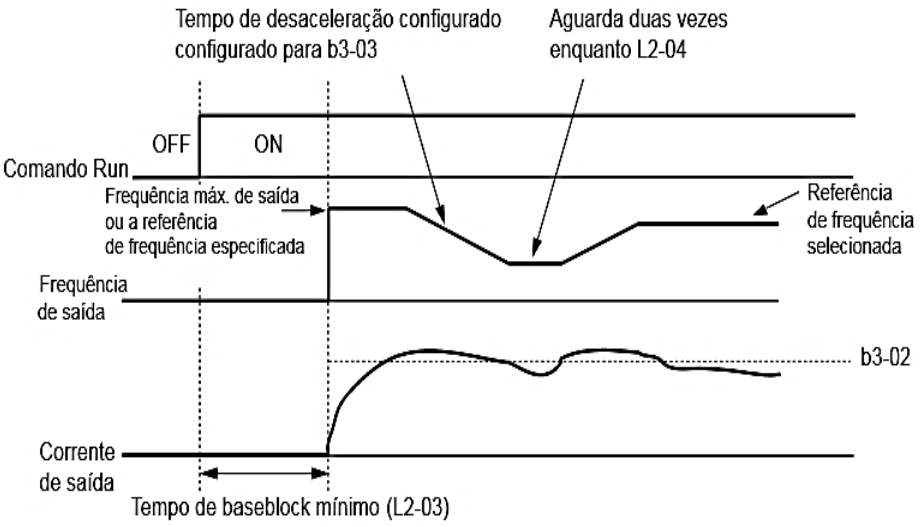


Figura 19 – Busca rápida de detecção no início ou comando de busca rápida por entrada digital.
Fonte: (YASKAWA, 2016).

A estimativa de tensão da força contra eletromotriz é usada quando ocorre uma perda de energia durante o acionamento do CPU do inversor que continua a executar o comando Run (rodar).

O inversor estima a velocidade do motor pela análise da tensão da força contra eletromotriz, a frequência estimada aumenta a tensão usando uma constante de tempo definida no parâmetro L2-04, depois o motor é acelerado ou desacelerado para a referência de frequência a partir da velocidade detectada, conforme mostra a figura 20.

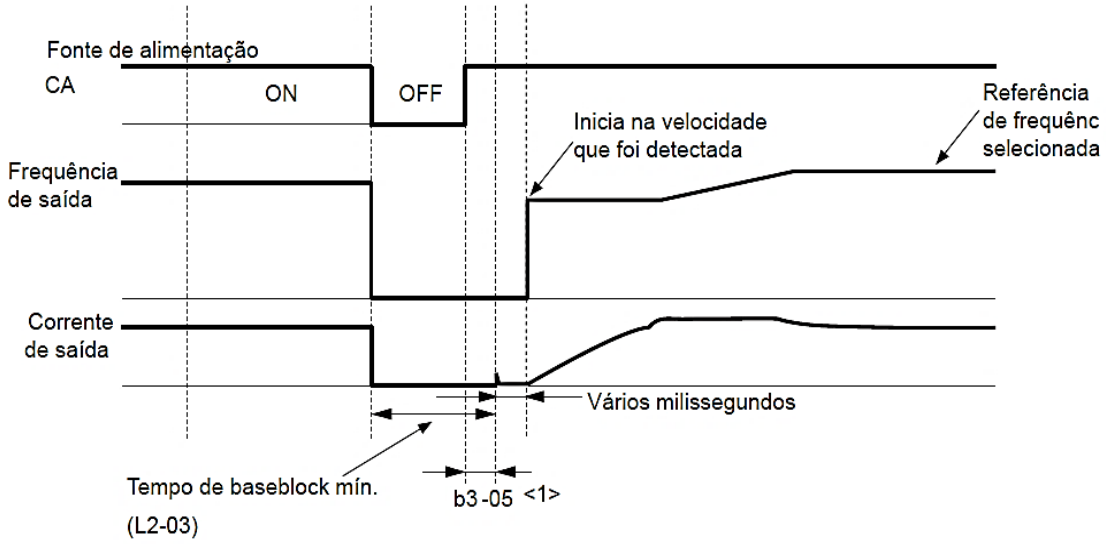


Figura 20 – Busca rápida após tempo de *baseblock*.
Fonte: (YASKAWA, 2016).

Após a energia ser restaurada, o inversor aguardará pelo menos, o tempo definido em b3-05. Se a interrupção de energia for maior que o tempo de *baseblock* mínimo, o inversor aguardará até que o tempo definido em b3-05 passe depois de a energia ter sido restaurada antes de iniciar a *Speed Search*.

A injeção de corrente é executada quando há tensão residual insuficiente no motor depois de perdas de energias estendidas, quando a *Speed Search* é aplicada com o comando *Run*. Este recurso injeta uma quantidade de corrente CC no motor e detecta a velocidade medindo a realimentação atual, o inversor gera a frequência e detectada e aumenta a tensão usando uma constante de tempo em L2-04 enquanto examina a corrente do motor, defini (YASKAWA, 2016).

A frequência de saída será reduzida se a corrente for maior que o nível em b3-02, quando a corrente fica abaixo de b3-02, a velocidade do motor é presumida

como encontrada e o inversor começa a acelerar ou desacelerar a referência de frequência, conforme a figura 21.

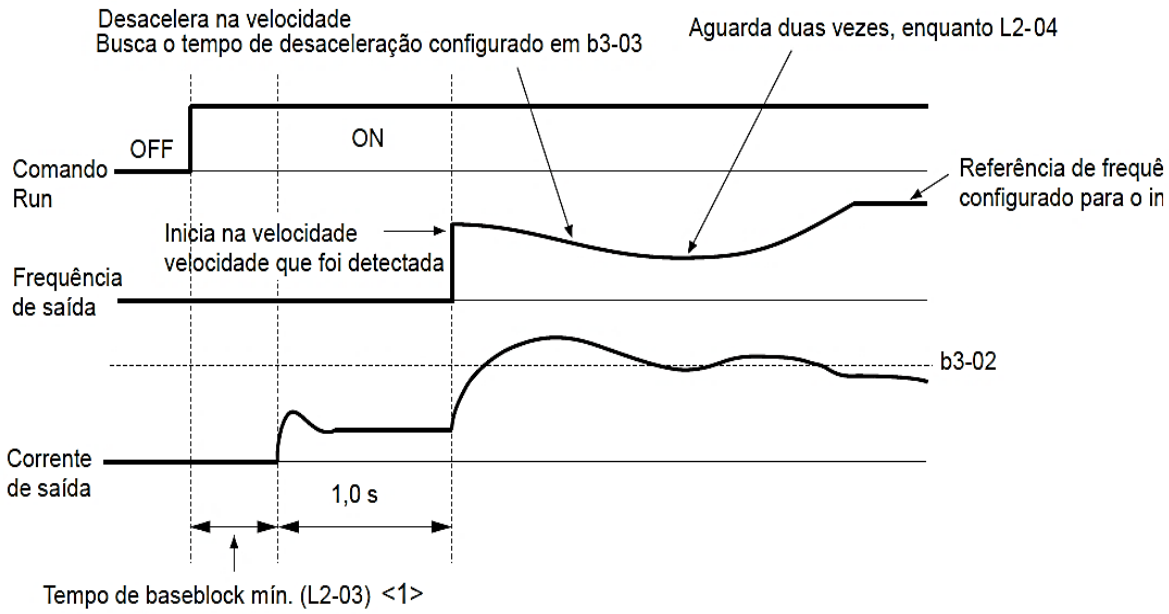
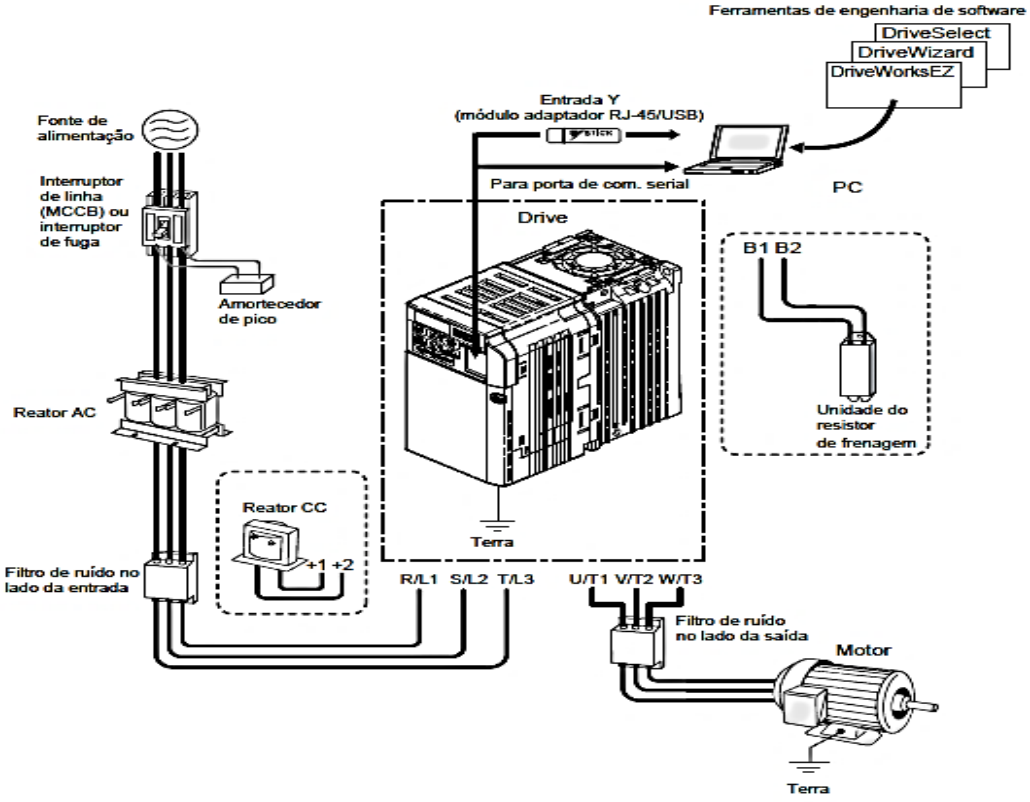


Figura 21 – Busca rápida na inicialização.
Fonte: (YASKAWA, 2016).

As perdas momentâneas de energia são frequentes durante as viagens de linha, então o inversor será configurado para recuperações quando a sua saída for desligada; se a energia retornar dentro do tempo definido, o inversor realiza um *Speed Search* e tenta retornar à sua operação. Se a energia não retornar dentro deste tempo, uma falha Uv1 será acionada. Se a energia retornar e o circuito de controle do inversor tiver energia, o inversor tentará realiza um *Speed Search* e retoma a operação, não acionando nenhuma falha.

A figura 22 mostra as opções de comunicações para parametrização e operações dos principais periféricos, conectados aos inversores de frequências da Yaskawa (2016).



Figuras 22 – Conexão de dispositivos periféricos.

Fonte: (YASKAWA, 2016).

2.9 Banco de resistência elétrica

Resistência elétrica é a capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem de corrente elétrica. O seu cálculo é dado pela primeira Lei de Ohm, e, segundo o sistema internacional de unidades (SI), é medida em ohms (Ω).

Quando uma corrente elétrica é estabelecida em um condutor metálico, um número muito elevado de elétrons livres passa a se deslocar nesse condutor. Nesse movimento, os elétrons colidem entre si e também contra os átomos que constituem o metal. Portanto, os elétrons encontram uma certa dificuldade para se deslocar, isto é, existe uma resistência à passagem da corrente no condutor. Conforme Villate (2013), os fatores que influenciam na resistência de um dado condutor são:

> A resistência de um condutor é tanto maior quanto maior for seu comprimento. A resistência de um condutor é tanto maior quanto menor for a área de sua seção transversal, isto é, quanto mais fino for o condutor. A resistência de um condutor depende da resistividade do material de que ele é feito. A resistividade, por sua vez, depende da temperatura na qual o condutor se encontra (VILLATE, 2013).

Esses fatores que influenciam a resistência de um condutor podem ser resumidos pela segunda lei de ohm conforme a equação 4, onde ρ (resistividade elétrica do condutor); R (resistência elétrica do material); ℓ (comprimento do condutor); A (área da seção do condutor). Conforme (CREDER, 2009) esclarece que cada material tem sua resistência própria, ou seja, a sua resistividade.

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \tag{4}$$

Essa relação vale apenas para materiais uniformes e isotrópicos, com seções transversais também uniformes.

Outro efeito analisado é a “Lei de Joule”, conhecida como efeito Joule ou efeito térmico, que é uma lei física que expressa a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo.

Conforme (CAVALCANTE, 2016), um resistor é um dispositivo que transforma a energia elétrica integralmente em calor. A lei de Joule foi criada por James Prescott Joule (1818-1889) que estudou o fenômeno em 1840. Ela pode ser expressa na equação (5) e (6), onde Q (calor gerado por uma corrente constante percorrendo uma determinada resistência); I (corrente elétrica que percorre o condutor com determinada resistência); R (resistência elétrica do condutor); t (duração ou espaço de tempo em que a corrente elétrica percorreu ao condutor).

$$Q = I^2 . R . t \tag{5}$$

Se a corrente não for constante em relação ao tempo:

$$Q = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 \, dt \tag{6}$$

Conforme Vaz (2000), quando o elétron colide com os átomos, faz com que os núcleos vibrem com maior intensidade. O grau de agitação molecular é chamado

de temperatura, ou seja, quando os elétrons colidem, aumentam a energia cinética dos átomos e sua temperatura. Roldan (2016), esclarece que:

> A passagem da corrente elétrica num condutor provoca o aumento de temperatura liberando calor. A energia elétrica que se transforma em energia calorífica num receptor ou condutor, é diretamente proporcional à resistência elétrica, ao quadrado da intensidade da corrente que o percorre e ao tempo de passagem da corrente (ROLDAN, 2016).

Esta lei é traduzida matematicamente pela equação (7), onde W (trabalho ou a energia dissipada por efeito joule medida em joules); R (resistência elétrica medida em Ω); I (intensidade de corrente que percorre o receptor ou condutor em amperes); t (tempo de passagem da mesma corrente medida em segundos). Conforme afirma (CREDER, 2009) que ao executarmos qualquer movimento ou produzir calor, luz, radiação etc., precisamos desprender energia e a energia aplicada por qualquer destas atividades chamamos de potência.

$$W = R.I^2.t \tag{7}$$

A corrente elétrica ao atravessar um condutor, provoca nele um aumento de temperatura (FILHO, 2007). Este efeito é aproveitado em ferros de passar, aquecedores, soldadores elétricos, secador de mãos, fogões, fornos, iluminação, proteção de instalações elétricas (fusíveis e disjuntores), etc.

Nos resistores elétricos pode-se calcular a potência dissipada utilizando a Lei de Joule mostrada na equação 8, onde P (potência medido em watts); U (tensão elétrica medida em volts).

$$P = \frac{Q}{t} = I^2 . R = U . I \tag{8}$$

Nos sistemas elétricos são condições normais em alguma parte do circuito a utilização de um conjunto de resistências, podendo ser confeccionadas de diversas formas dependendo de sua utilização.

Conforme o catálogo de produtos Eletele (2016), pode-se representar um

universo de modelos de resistores para diversas aplicações, tendo em seus modelos de fabricação os principais tipos de resistores sendo estes, resistores de aterramento, resistores de desumidificação, resistores de frenagem, resistores harmônicos, banco de resistores para partida de motores e banco de resistores de carga.

O banco de resistores que será utilizado no sistema de potência do Bonde nº1 é fixo com suporte metálico fixado por eixo passante com potência de 4000 watts, conforme mostra a figura 23.

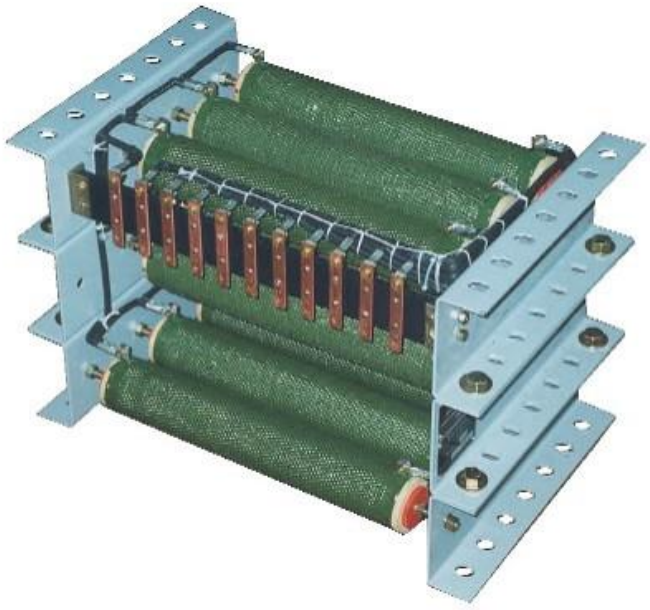


Figura 23 – Banco de resistores tipo fio com eixo.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

A instalação do banco de resistores será no circuito intermediário que abriga o circuito atuador da frenagem (módulo de frenagem), que é constituído normalmente de um único transistor IGBT, através do qual pode se comandar a operação de um resistor de potência do tipo fio ou do tipo fita. Lenz (2016) esclarece que:

> O valor ôhmico do resistor de frenagem é definido pelo fabricante do conversor de frequência e sua potência nominal deve corresponder a aproximadamente 30% da potência do motor (para aplicações leves), podendo chegar até aproximadamente 60%, ou mesmo 70% da potência do motor (para aplicações mais pesadas); por esse resistor drena-se a energia regenerada pelo motor durante a execução de uma Rampa de Desaceleração (frenagem reostática) (LENZ, 2016).

Regeneração deve ser entendida como uma reação que ocorre durante a frenagem de um motor elétrico. A corrente regenerativa, é inicialmente absorvida pelo

banco de capacitores, fazendo com que esse banco aumente sua carga elétrica e consequentemente dissipando esta energia para o banco de resistores.

As figuras 24 e 25 mostram o diagrama de potência com os inversores motores e nas saídas B1 e B2 alimentando o banco de resistores de frenagem.

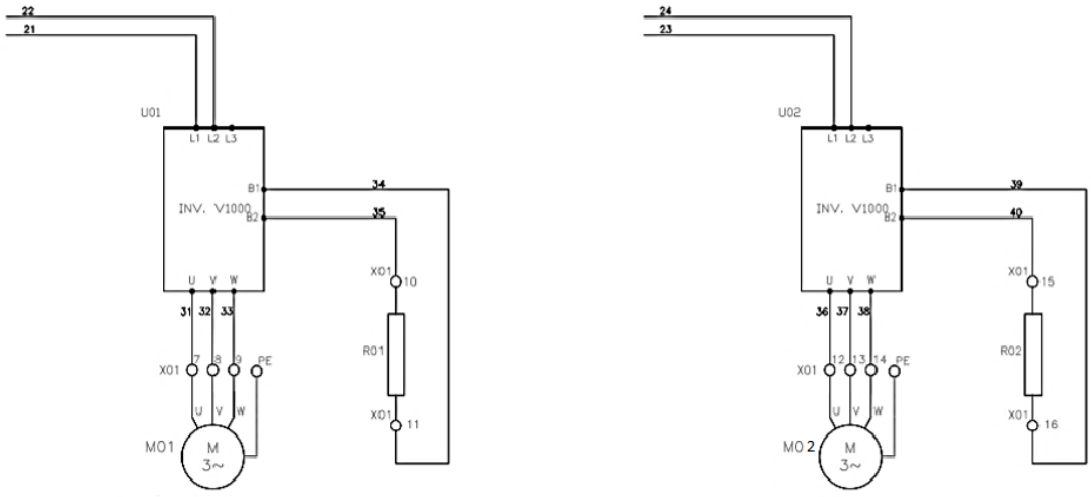


Figura 24 – Diagrama elétrico de potência com inversores, motores e banco de resistores.
Fonte: (BONDE Nº1, 2016).

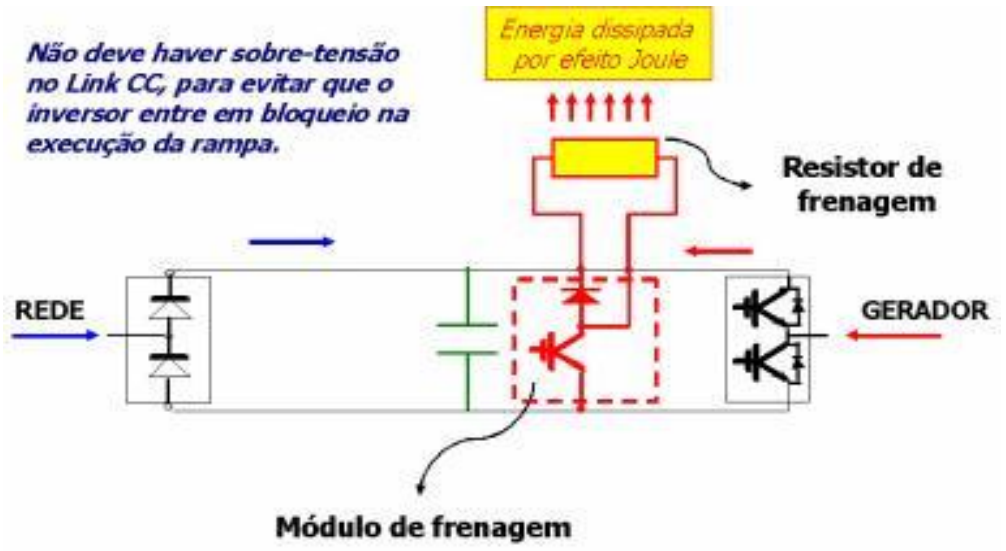


Figura 25 – Circuito de potência do inversor com saída DC para resistor de frenagem.
Fonte: (LENZ, 2016).

Como não deve haver sobre tensão no circuito de controle do inversor o IGBT do circuito atuam os resistores de frenagem, colocando-os em condução. Esta ação

do IGBT faz descarregar parcialmente no banco de capacitores, fazendo dissipar, por efeito joule, em cima do resistor de frenagem, a energia excessiva.

2.10 Redutor de velocidade

Redutor de velocidade é um dispositivo mecânico que tem como finalidade reduzir a velocidade (rotação) de um motor. Seus principais componentes são basicamente: eixo de entrada e saída, rolamentos, engrenagens e carcaças.

O redutor de velocidade é utilizado quando é necessária a redução ou aumento da rotação requerida no dispositivo a ser acionado. Devido as leis da física quando há redução de rotação, aumenta-se o torque disponível. Bigaton (2016) esclarece que:

> Redutor de Velocidade são máquinas empregadas para se obterem grandes redução de transmissões, sem necessidade de recorrer a engrenagens de grandes diâmetros ou motoras de poucos dentes. Os redutores podem ser constituídos de engrenagens paralelas, cônicas e com cora e rosca sem-fim, (BIGATON, 2016).

Existem diversos tipos de redutores de velocidade, sendo os mais comuns os redutores de velocidade por engrenagens. Essas engrenagens, por sua vez, podem ser cilíndricas ou cônicas. Pode-se ainda utilizar o sistema coroa e rosca sem fim. Já os dentes das engrenagens podem ser retos ou helicoidais. Quando há intenção de se reduzir a vibração e ruído utilizam-se, nos redutores, engrenagens de dentes helicoidais, já que a transmissão de potência, nesse caso, é feita de maneira mais homogênea.

Por outro lado, as engrenagens de dentes retos são mais simples de serem fabricadas e por isso de menor custo. Existe ainda o redutor do tipo epicicloidal, que utiliza em sua configuração, engrenagens comuns de dentes retos e uma ou mais engrenagens de dentes internos (SEW, 2016).

Os redutores epicicloidais são normalmente indicados quando se procura um sistema mais compacto e com capacidade para trabalhar com altas taxas de redução.

Os redutores de velocidade trabalham normalmente com apenas uma taxa de redução, no caso de existir a possibilidade de atuar no dispositivo e alterar a taxa de redução, este passa a ser chamado de câmbio ou caixa de marchas (BIGATON, 2016).

Nessa pesquisa foi selecionado um redutor que atendesse a capacidade de torque e redução compatível com o sistema do Bonde nº1. Um grande desafio foi selecionar, entre os diversos fabricantes, um redutor que garantisse as condições operacionais e as dimensões físicas, devido as limitações de espaços nos truques.

Depois de efetuarmos estudos foram selecionados os redutores do fabricante Tramec (2016), conforme a quadro 5.

Quadro 5 – Característica técnicas do redutor de velocidade.

Fonte: (TRAMEC, 2016).

Fabricante	Tramec
Codigo	2013633001 010001
Type	TC112B
Ratio	10
Spec.	0 B3
In.	300/38
Lubrificante	Shell Omala S4 WE 320

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução dos objetivos, iniciou-se o processo de desmontagem de todo sistema elétrico e mecânico instalado no Bonde nº1. Por se tratar de um conjunto de peças dependentes uma das outras foram necessárias várias etapas de desmontagem contando com equipes de caldeireiros, soldadores, carpinteiro, eletricistas, mecânicos e engenheiro.

A figura 26 mostra o Bonde nº1 preparado para o início dos trabalhos de desmontagem.

Figura 26 – Bonde Elétrico nº1, preparado para desmontagem.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

3.1 Desmontagem dos motores e rodeiros

Foi iniciada a desmontagem dos motores, sendo dois motores de tração de anéis e um motor conversor de fase “rotafase” e demais acessórios que constituem o sistema de tração do Bonde nº1.

As figuras nº27, 28 e 29 mostram as remoções dos motores instalados nos truques e remoção dos dois truques.

Figuras 27, 28 e 29 – Remoção dos truques e motores sobre rodeiros dos truques.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

O sistema atual de tração é acionado por um conjunto de engrenagem de dentes do tipo reto sendo a do motor instalada na ponta de eixo.

A engrenagem tem 15 dentes e diâmetro de 102mm e a engrenagem do rodeiro tem 76 dentes e diâmetro de 465mm. O motor está fixado em suspensão “deslizante” sobre o eixo do rodeiro e o suporte fixo na base do truque com absorção de tração através de molas compressão.

O sistema atual de tração, que é de engrenagem de dentes retos será substituído por um sistema de transmissão tipo corrente, coroa e pinhão. Essas, por sua vez, muito comuns em máquinas permitindo transmissões de potências elevadas (NIEMANN, 1971).

No processo de desmontagem do conjunto motor e rodas dos rodeiros foi averiguado folgas excessivas no suporte guia dos mancais dos eixos dos rodeiros.

A folga, na ordem de 13mm, foi ocasionada pelo desgaste ao longo de anos de utilização. Para adequação e instalação dos motoredutores nos truques foi necessária uma recuperação com aumento de material nos guias fixo de alojamento dos mancais e usinagem das guias dos mancais.

As figuras 30 e 31 mostram as folgas e imperfeições nos guias dos truques e mancais.

Figuras 30 e 31 – Folga nas guias dos truques e mancais.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

Para adaptação do sistema foram refeitas as guias dos truques, adicionando peças usinadas em formato de “U”, a peça é de aço SAE 1045 com dimensões de 250mm x 80mm e rebaixo para fixação de 25mm x 30mm, conforme representadas na figura 32. As peças guias foram alinhadas e soldada na estrutura dos truques.

Figuras 32 – Colocação, alinhamento e soldagem das guias dos mancais.
Fonte: (ITATINGA, 2016).

Aplicando o mesmo procedimento para os dois truques, foram instaladas 16 peças formato “U” para o guia fixo e usinado os 8 mancais dos rodeiros.

Foi iniciado alinhamento mecânico geométrico das guias dos truques e mancais, recurso utilizado pela mecânica, em conjunto de equipamentos rotativos, com a finalidade de deixar as faces do acoplamento sempre com a mesma distância, em qualquer ponto, e no mesmo plano (SHIGLEY, 1980).

O alinhamento de correção foi feito de modo simples executando a seguinte

sequência prática: correção do angular vertical; correção do paralelo vertical; correção do angular horizontal e correção do paralelo horizontal.

O objetivo do alinhamento de eixos é garantir e aumentar o período de operação de máquinas rotativas, tendo como característica principal eliminar vibrações e aquecimento.

Para atingir esse objetivo, os componentes dos truques e rodeiros que estavam mais sujeitos a falhas foram alinhados dentro dos seus limites de projeto.

Os componentes que estão mais sujeitos as falhas pela falta de alinhamento são os mancais, selos, acoplamentos e eixos.

3.2 Preparação dos eixos dos rodeiros

Após a desmontagem dos eixos dos rodeiros foi detectado folga excessiva na ponta do eixo no qual estavam alojados os rolamentos. As folgas medidas estavam excessivas na ordem 15 décimos havendo necessidade de recuperação da ponta de eixo. Efetuou-se aumento de materiais na ponta de eixo utilizando método básico de enchimento por solda elétrica utilizando eletrodo OK 48.04 básico ASME SFA 5.1 E7018 com diâmetro de 4mm, referência do fabricante (ESAB, 2016).

O procedimento de enchimento de metal foi efetuado nos 4 eixos dos dois truques. As pontas de eixos foram rebaixadas pelo processo de usinagem, reduzindo para o diâmetro de 60 mm, conforme mostram as fotos 33 e 34.

Figuras 33 e 34 – Usinagem da ponta de eixo dos rodeiros.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Em seguida foram substituídos todos os rolamentos e retentores das pontas de eixo que estavam equipados com 4 rolamentos de rolete cônico de ø externo 95mm, ø interno 60mm e espessura 27mm, referências do fabricante (SKF, 2016) e 2 retentores com dimensões de ø externo 100mm, ø interno 70mm e espessura 12mm, referências do fabricante (SABÓ, 2016), utilizando nos 4 eixos um total de 16 rolamentos cônicos e 8 retentores.

3.3 Preparação dos eixos dos rodeiros

Durante toda as desmontagens elétricas e mecânicas foram averiguadas situações críticas na estrutura principal do bonde que se encontrava com corrosões em pontos localizados diminuindo a resistência mecânica de toda a estrutura.

Através de pontos de soldas partidas e corrosões, a estrutura principal, que é constituída de dois perfis tipo U de 6”, sofreram deformações excessivas, conforme mostram as figuras 35 e 36.

Figuras 35 e 36 – Deformações e corrosão na estrutura principal do bonde.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Efetuou-se uma recuperação geral com reforço da estrutura metálica trocando as cantoneiras, chapas e perfis tipo U. Foi alinhada a longarina principal e adicionado duas vigas de perfil tipo ”U” com dimensões de: altura da alma 6”, largura das abas de 51,66 mm e comprimento de 5,20 m para reforço de toda a estrutura principal. As dimensões seguiram o catálogo do fabricante Gerdau (2016).

3.4 Reforma da chave pantógrafa

Houve necessidade da reforma geral da chave pantógrafo que tem a função de captar corrente elétrica do fio *trolley* transmitindo para o painel geral de alimentação do sistema do bonde.

A estrutura da base, braço e chapa deslizante estavam em mal estado de conservação sendo necessário a reforma geral de toda a chave pantógrafa, conforme mostra a figura 37.

Figuras 37 – Reforma geral da chave pantógrafa do Bonde.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Foi substituída a chapa de contato elétrico, chapa confeccionada sobre medida e com material tipo latão com espessura de 3/8”. Substituídas as 8 molas de tração que tem a função de pressionar o pantógrafo para a posição de trabalho “contato no fio *trolley*”.

Foram substituídos os isoladores localizados na base da chave e um pára-raios de linha, trocado partes da estrutura metálica e tratamento da superfície e ajustes mecânicos das partes móveis, finalizando com lubrificação e pintura geral da estrutura.

3.5 Substituição do sistema de transmissão

Iniciou-se a substituição do sistema de transmissão de dentes tipo reto pelo sistema de coroa dentada. Foi executado a retirada do cubo de roda dos dois eixos de tração.

Para esta operação foi utilizada uma prensa hidráulica industrial de 200 toneladas de força, com objetivo de remoção da transmissão de dentes retos e adaptação do flange do cubo através de usinagem e furações para alojamento da coroa de dentes duplo equipada com 76 dentes e diâmetro de 650 mm.

As figuras 38 e 39 mostram os equipamentos prontos para a montagem no eixo do redutor.

Figuras 38 e 39 – Coroas dentes duplo com 76 dentes.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Executando-se a montagem do moto redutor com características do conjunto, sendo o motor de alto rendimento de 12,5 (CV), de potência e 440 (V), trifásico com 4 pólos e rotação de 1748 (RPM) montado na carcaça modelo 132M do fabricante MARATHON.

O redutor do fabricante TRAMEC tipo TC112B com redução de 300/38 confeccionado no modelo “T” no qual o eixo do motor está perpendicular ao eixo de saída do redutor.

Foi verificada a saída do eixo do redutor acoplada com uma coroa de dentes duplo equipada com 76 dentes e diâmetro de 650 mm, seguindo a relação de 1/1 do motor redutor e a coroa do eixo de transmissão.

Para fixação do moto redutor na estrutura do truque efetuaram-se vários

ajustes mecânicos devido ao pequeno espaço disponível na estrutura do truque, sendo desenvolvido uma base de fixação com furos oblongos.

Os furos oblongos são necessários para o ajuste de tensão da corrente, durante à utilização (viagens) acentua os desgastes gerando folga no sistema de transmissão da corrente coroa e pinhão.

Tornam-se necessários nas manutenções preventivas os ajustes de tensão (folga) da corrente, considerando que os movimentos são de direção e reversão (jusante e montante).

A figura 40 mostra a instalação do moto redutor na base do truque.

Figura 40 – Instalação do moto redutor na base do truque.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Após todo processo de montagens e alinhamento das guias dos mancais dos truques, motor redutor e suporte de fixação dos freios mecânicos, foi efetuado um teste de giro da transmissão, acionado pelo conjunto do motor redutor.

Os ensaios foram executados em bancada, com velocidade de partida controlada por um *Soft Start*, afim de observar possíveis anomalias e garantir a segurança durantes os ensaios preliminares.

3.6 Desenvolvimento do projeto elétrico

Iniciou o desenvolvimento dos diagramas elétricos, adaptados as condições de infraestrutura existente e acionamento dos periféricos já instalados, sendo faróis, buzinas, tomadas de serviços e iluminação interna.

Os diagramas elétricos foram desenvolvidos em parceria com a empresa Mc Tech Automação divididos em diagramas de comando e potência, conforme mostram as figuras 41, 42, 43 e 44.

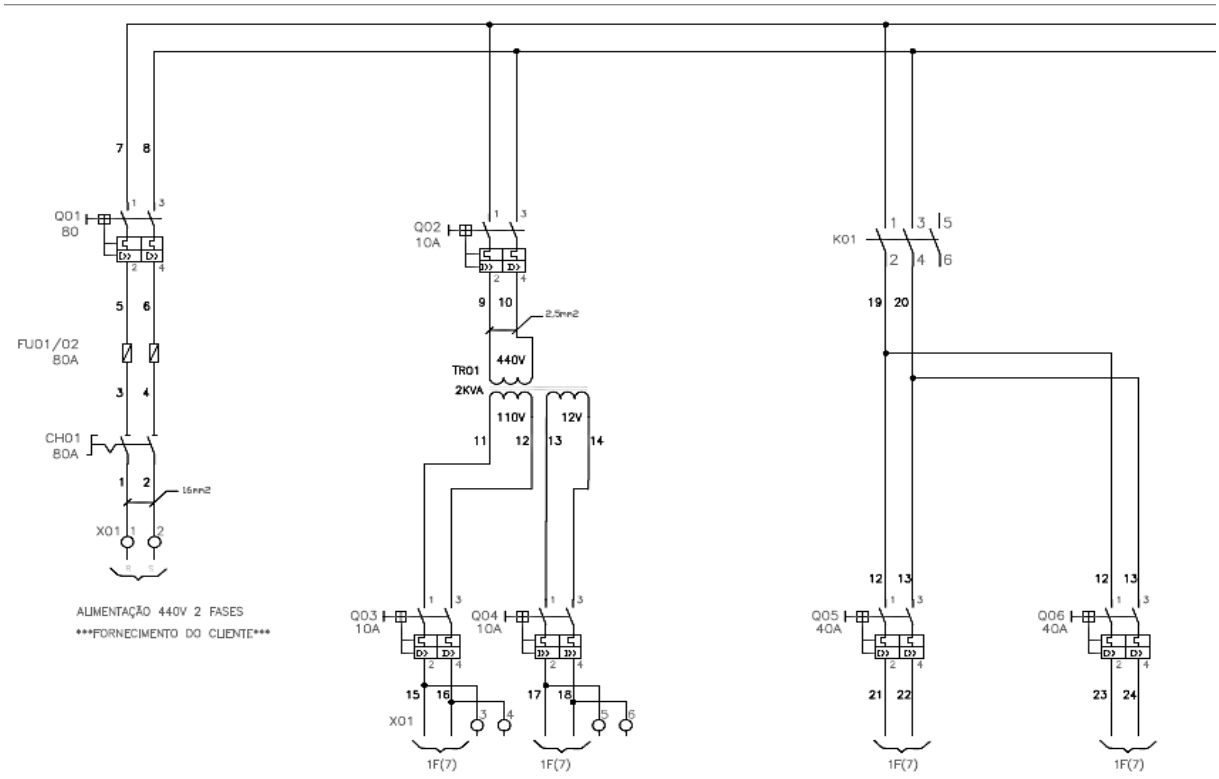


Figura 41 – Diagrama elétrico de força, rede alimentação 110 e 12 volts.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

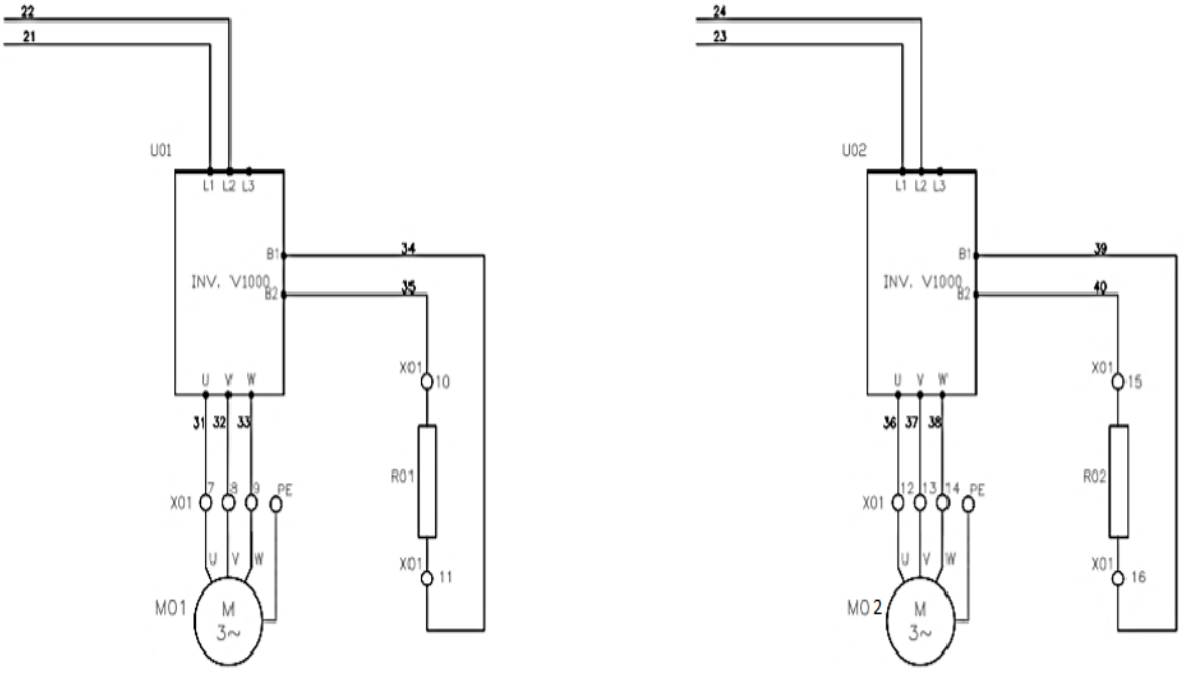


Figura 42 – Diagrama elétrico de força, alimentação dos inversores e motores.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

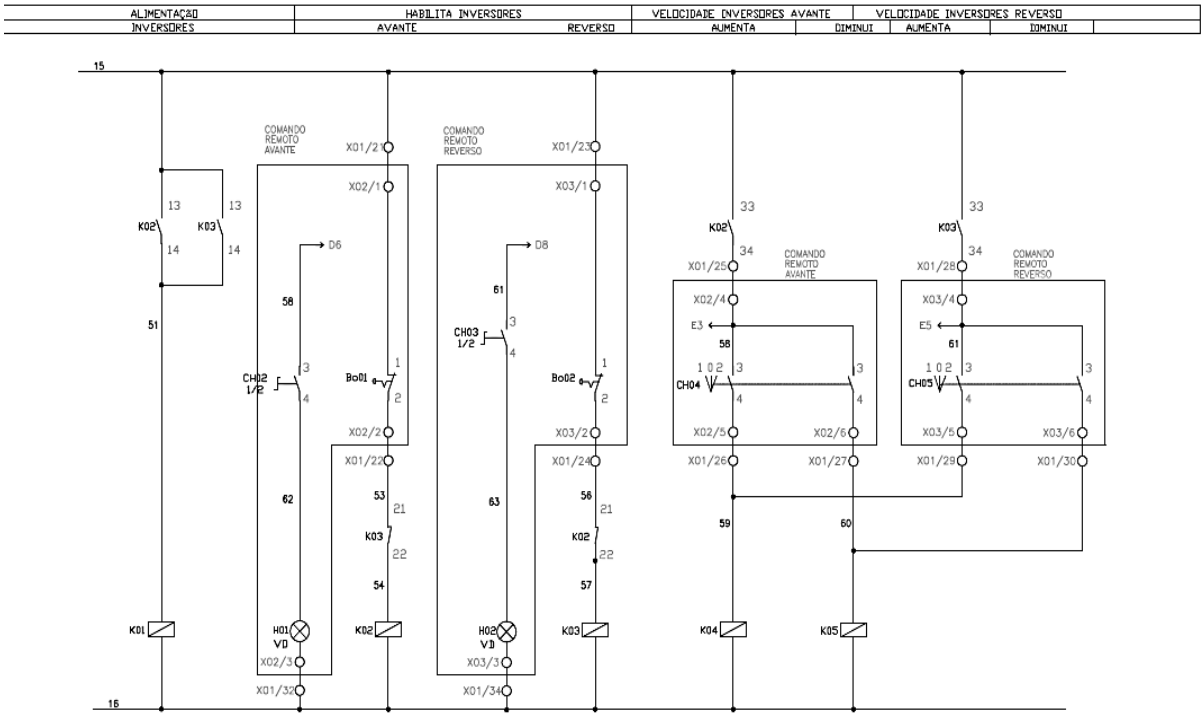


Figura 43 – Diagrama elétrico de comando do controle de velocidade.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

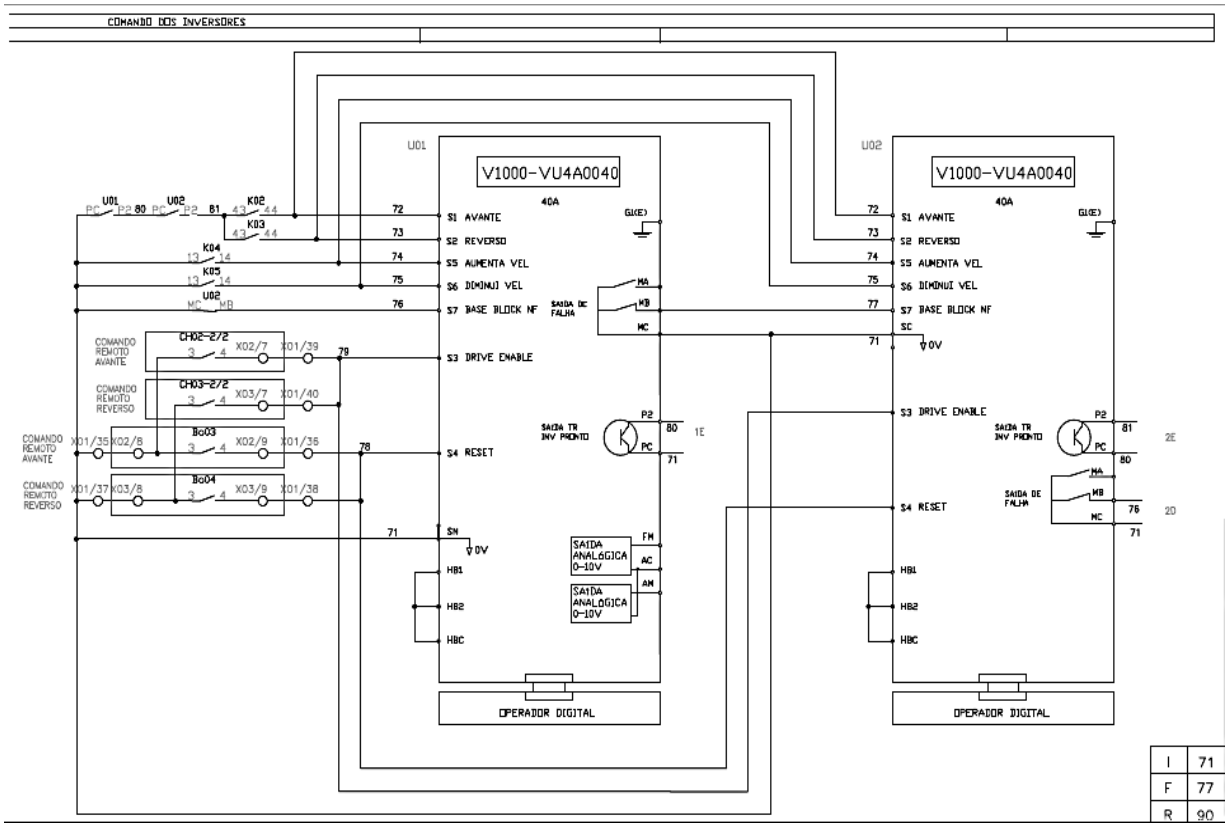


Figura 44 – Diagrama elétrico dos inversores de frequência.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

3.7 Instalação dos painéis de comando

Iniciou a instalação dos painéis de comando e controle de velocidade, sendo 2 painéis de controle de velocidade “jusante e montante” instalados na cabine e um painel de potência instalado no centro da estrutura do bonde.

Os 2 painéis de comando e controle de velocidade tem dimensões de 300 x 150 x 100 mm equipados com chaves liga e desliga, alavanca com potenciômetro para o controle da velocidade, IHMs para visualização dos parâmetros e botão de emergência, conforme as figuras 45 e 46.

Figuras 45 e 46 – Instalação dos painéis (jusante e montante) de controle de velocidade.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

O painel principal de potência tem dimensões de 800 x 800 x 350 mm equipado com diversas chaves, disjuntores, transformador, fusíveis, contatoras e os dois inversores de frequência, conforme ilustrado na figura 47.

Figura 47 – Painel principal de potência e comando do Bonde nº1.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Na instalação dos painéis houve preocupação com os espaços disponível para instalação, nas cabines de operação jusante e montante os espaços são limitados.

Fez-se um estudo para combinar o melhor posicionamento do painel afim de garantir boas condições ergonômicas de operação e manutenção.

O painel principal foi instalado dentro de uma caixa metálica com dimensões de 900 x 1000 x 400 mm com tampa removível.

A caixa de proteção do painel foi instalada visando um melhor

acondicionamento e proteção do núcleo do painel contra as impurezas, umidade e sujeiras, causada durante as viagens e as condições climáticas desfavoráveis.

A figura 48 mostra a localização dos painéis de controle de velocidade e painel de potência.

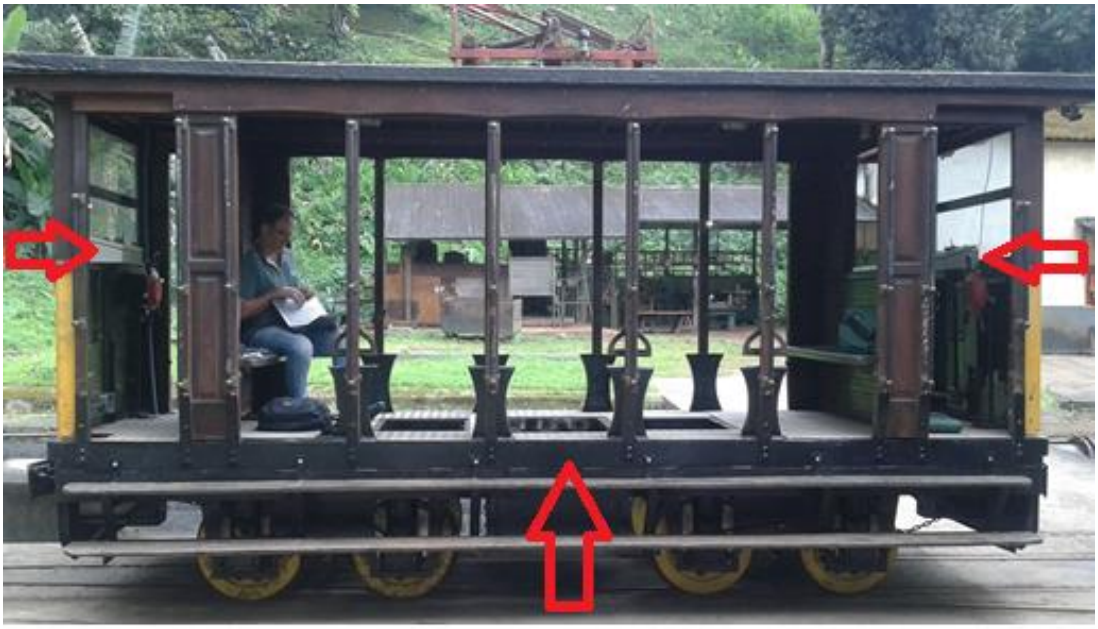


Figura 48 – Localização dos painéis de controle de velocidade e potência do Bonde nº1.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Garantir as proteções dos componentes dos painéis, que são sensíveis impurezas, e boas condições ergonômicas para os maquinistas são fatores empregados para associar as poucas mudanças estéticas, afim de garantir aspecto, detalhes do modelo original sendo de grande valor histórico para a Usina Hidrelétrica de Itatinga e a Companhia Docas do Estado de São Paulo - CODESP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Levantamento de dados do sistema antigo

Considerando a análise executada antes da implementação dos novos equipamentos, analisou-se alguns dados elétricos extraídos do Bonde nº1 antes de sua parada.

Para a simulação considerou-se a totalidade da viagem de ida da casa de força “usina” até no porto de Itatinga.

A viagem foi efetuada em condições normais com transporte de pessoas e materiais, onde o percurso de 7,5km de distância foi efetuado com o tempo total de 28 minutos.

Os dados foram extraídos da entrada geral do Bonde nº1 sendo monitorado o sistema bifásico de 440 volts. Monitoraram-se os valores de tensão, corrente e potência dando ênfase nos valores do ciclo de partida do Bonde nº1, sendo ponto crítico para o sistema de potência de acionamento.

Verifica-se no quadro 6 o monitoramento e a evolução dos principais dados para análise, sendo a potência, corrente e tensão do sistema em função do tempo em minutos.

Quadro 6 – Ensaios de potência, corrente e tensão.
Fonte: Bonde nº1, ITATINGA, 2016).

Tempo (minutos)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (KW)	
0	390	87	33,93	Momento de partida
0,1	391,00	92,00	35,97	
0,2	389,00	93,00	36,18	
0,3	391,00	95,00	37,15	
0,4	390,00	91,00	35,49	
0,5	392,00	90,00	35,28	
6	407,00	61,00	24,83	Regime permanente de viagem.
7	411,00	59,00	24,25	
8	411,00	63,00	25,89	
9	414,00	65,00	26,91	
10	420,00	56,00	23,52	
11	410,00	68,00	27,88	
12	409,00	69,00	28,22	

13	406,00	69,00	28,01	
14	407,00	68,00	27,68	
15	411,00	66,00	27,13	
16	413,00	64,00	26,43	
17	414,00	63,00	26,08	
18	420,00	66,00	27,72	
19	410,00	67,00	27,47	
20	409,00	67,00	27,40	
21	422,00	57,00	24,05	
22	421,00	55,00	23,16	
23	420,00	52,00	21,84	
24	415,00	49,00	20,34	
25	413,00	46,00	19,00	
26	414,00	48,00	19,87	
27	415,00	46,00	19,09	
28	411,00	52,00	21,37	

No quadro 6 apresenta-se os ensaios com uma tendência de crescimento dos valores de corrente e potência (KW) no instante da partida, analisando nos tempos de 0 a 30 segundos.

Observa-se no gráfico da figura 49 que ocorre uma redução da tensão elétrica e um aumento de corrente no momento de partida do sistema. Estes valores tendem-se manterem estáveis após um tempo de 5 minutos.

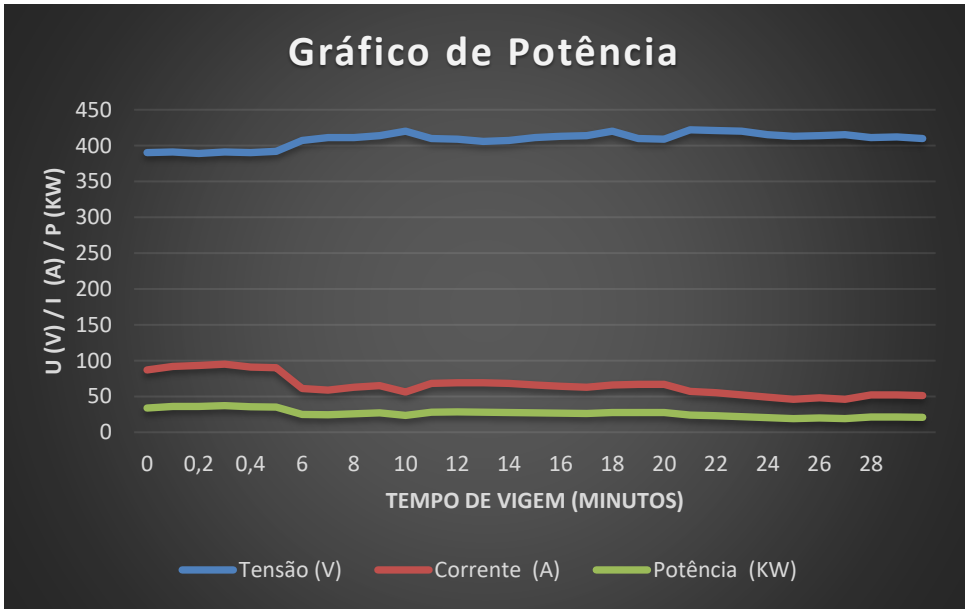


Figura 49 – Gráfico de evolução da potência, corrente e tensão em função do tempo.

Ao ser analisado o gráfico da figura 50, que representa os dados do quadro 6, visualizam-se a variação dos valores de corrente, tensão e potência em função da capacidade nominal, medido em percentual (%) dos valores nominais dos equipamentos elétricos do Bonde nº1.

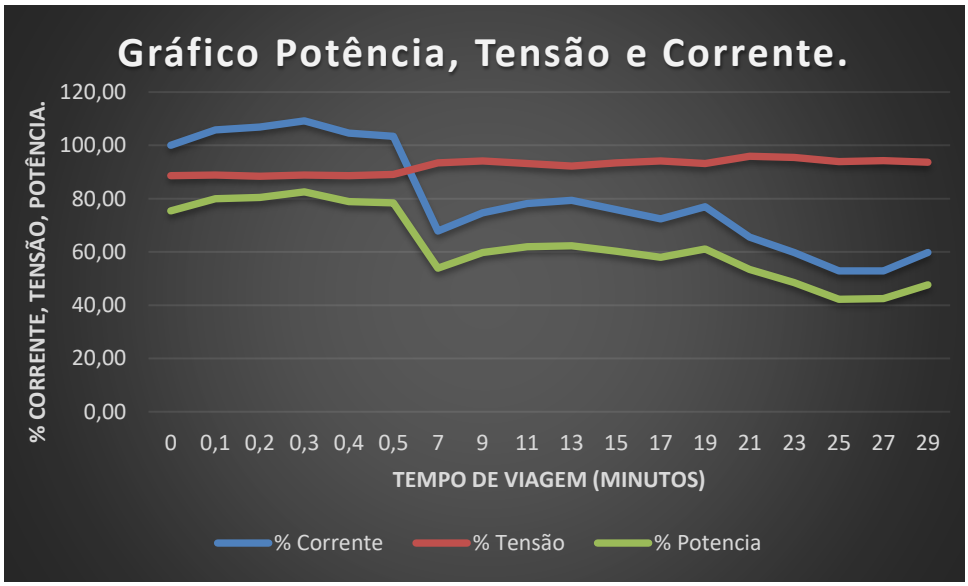


Figura 50 – Gráfico de evolução % da potência, corrente e tensão em função do tempo.

Os valores de corrente elétrica estão na ordem de 93 (A) no regime de partida e 60 (A) no regime permanente.

Estes valores são considerados níveis altos para todo o sistema elétrico do Bonde nº1, desde a captação elétrica através da chave pantógrafa, que é baseada num contato de chapa deslizante sobre o fio *trolley* para captação de energia elétrica ao disjuntor que controla a passagem de corrente.

Em um sistema elétrico os altos valores de corrente elétrica têm efeitos danoso para todo o sistema como: reparos e manutenções excessivas, desgaste acelerado dos contatos elétricos, diminuição da vida útil dos equipamentos e demais efeitos que poderão causar quebras e paradas não programadas, resultando na interrupção do transporte.

4.2 Parametrização dos inversores de frequência

A instalação do sistema de inversores de frequência, teve como possibilitar

várias análises de grandezas elétricas como: corrente, tensão, potência, frequência, torque e conjugado em função do tempo. Utilizou-se o *software* da YASKAWA DRIVE WIZARD INDUSTRIAL através programa TREND RECORDER, que é um analisador e simulador de grandezas elétricas de sistemas.

A comunicação e parametrização dos inversores foi concebida através da porta RS232/485 para comunicação com um computador externo, conforme a figura 51.

Os inversores de frequência da Yaskawa (2016) têm opção de parametrização através da IHM (display) do inversor modo *Mod Bus* e a parametrização com computador externo, sendo esta opção uma praticidade de operação.

A comunicação serial pode então ser realizada com os Controladores Lógicos Programáveis (PLCs). Poderá ser utilizado equipamentos semelhantes usando o protocolo *Memobus/Modbus*.

Figura 51 – Conexão de computador externo via porta RS232/485 para comunicação e parametrização.

Fonte: (ITATINGA, 2016).

Os parâmetros de ajustes dos inversores de frequência, foram inseridos conforme as particularidades do equipamento e infraestrutura existente.

Alguns parâmetros foram acionados para suprir e corrigir problemas sistêmicos como: alta intermitência de tensão, variações constante de conjugado e torque,

geração da 3º fase (rede de alimentação do inversor é bifásica e o sistema de motorização é trifásico) e a busca automática de velocidade, devido as quedas constantes de energia.

4.3 Ensaio de operação no Bonde nº1 com sistema modernizado

Após introduzidos os dados e parâmetros nos inversores, preparado e ajustado todo o sistema motriz, iniciou-se uma viagem teste para análise do comportamento de todo sistema de acionamento.

A viagem foi monitorada via computador conectada no *drive* do inversor de frequência, através programa *Trend Recorder software* da Yaskawa.

O gráfico da figura 52 mostra a evolução do sistema de acionamento no ponto partida.

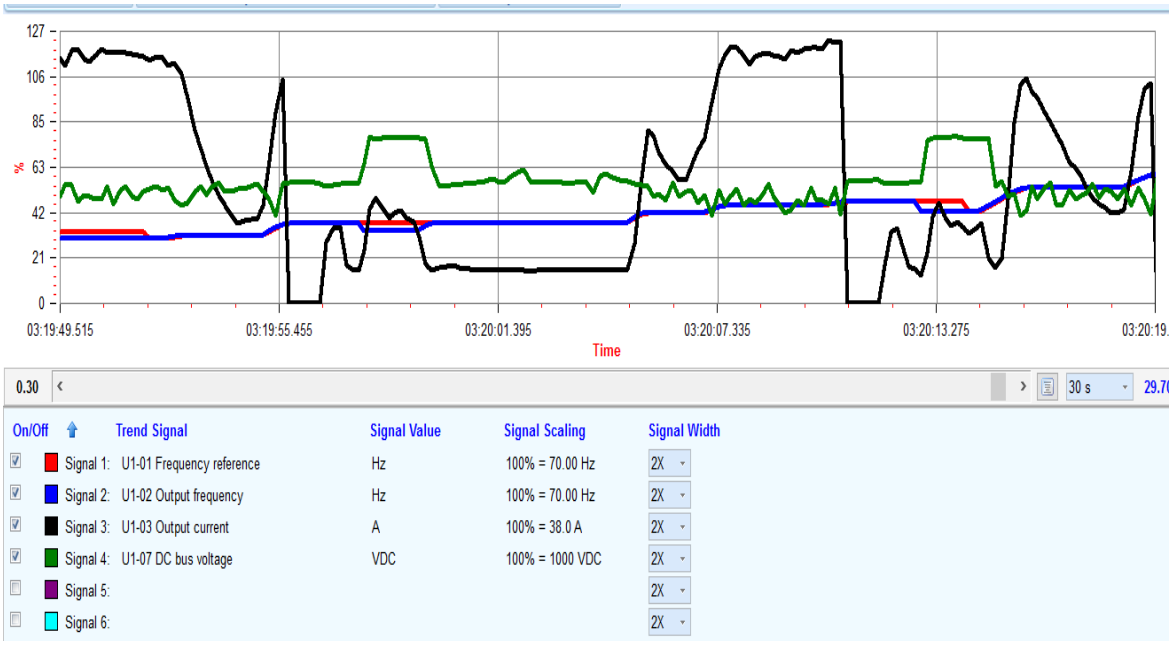


Figura 52 – Gráfico de análise de frequências, corrente e tensão VDC.

Foi iniciado o teste de operação no Bonde nº1 transportando dois reboques de carga, simulando uma condição ocasional de necessidade operativa onde é exigido esforço máximo do equipamento.

No momento de partida do equipamento o valor de corrente chegou-se a 110% da nominal do equipamento, mas o controle de potência do inversor rapidamente

corrigiu para níveis menor que 50% da nominal num intervalo máximo de 4 segundos, garantindo um torque suficiente para suportar a inércia.

No gráfico da figura 49, o sinal 1 é a frequência de referência (velocidade de operação), sendo solicitado no momento de partida uma velocidade de 30% da velocidade nominal.

O sinal 2 é a frequência de *output* que é a velocidade momentânea que sempre busca igualar à frequência de referência (sinal 1).

Analisando o gráfico da figura 53, notou-se que foi solicitado um aumento de velocidade (aceleração) através dos sinais 1 e 2.

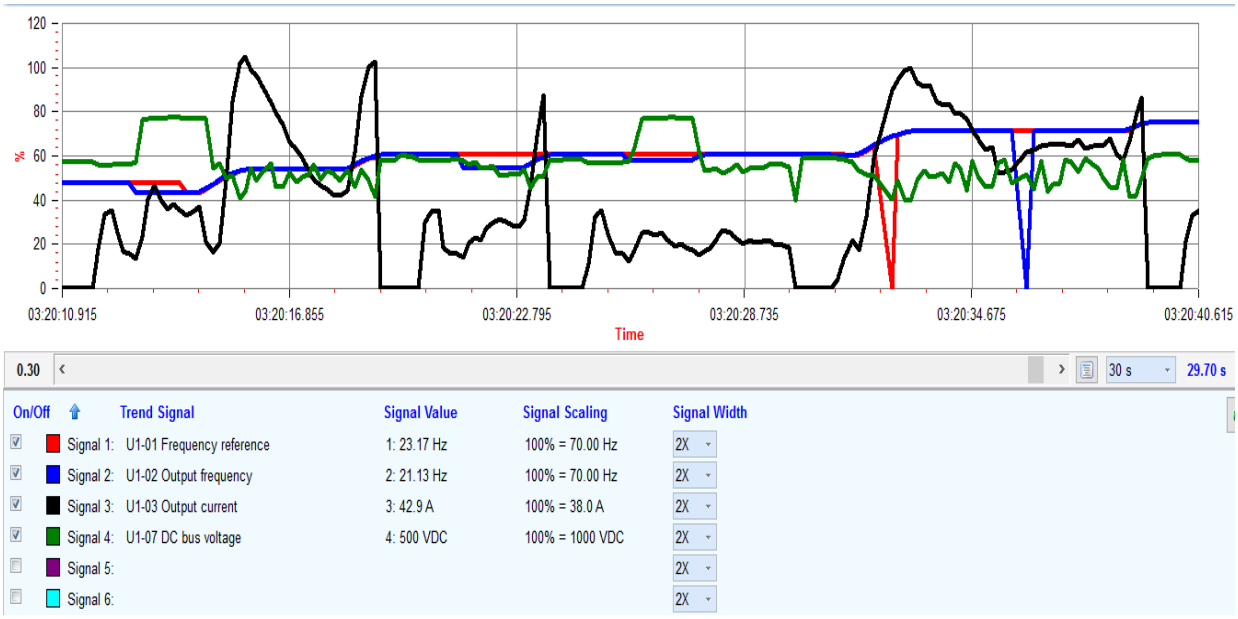


Figura 53 – Gráfico de anál/lise de frequências, corrente e tensão VDC.

Nota-se que os sinais 4 DC bus (barramento VDC) e o sinal 3 *output current* (corrente de saída), sofrem diversas variações nos momentos de aceleração do sistema, combinado com falhas de contato (tensão) simultânea ao longo da linha *trolley* de captação de energia, o *drive* do inversor busca cessante mente a correção aos níveis que foram parametrizados.

4.4 Ensaio de operação no Bonde nº1: Análise de busca automática de velocidade

A infraestrutura elétrica de alimentação bifásica 440 volts, sendo uma fase na linha aérea captada por contato deslizante (chave pantógrafa) e a segunda fase aterrada conduzida pelos trilhos, tendo esta fase captada pelas rodas do bonde.

As duas fases são carentes de contatos perfeitos para captação de energia para o Bonde, gerando picos de falhas na tensão e corrente.

As falhas mais persistentes e prolongadas, em trechos aleatórios das linhas férreas, ocasionam severos picos e interrupções de energia e o *drive* do inversor de frequência busca a correção destas falhas.

No gráfico da figura 54 mostra-se o cenário onde o Bonde nº1 estava em regime constante com velocidade máxima de operação.

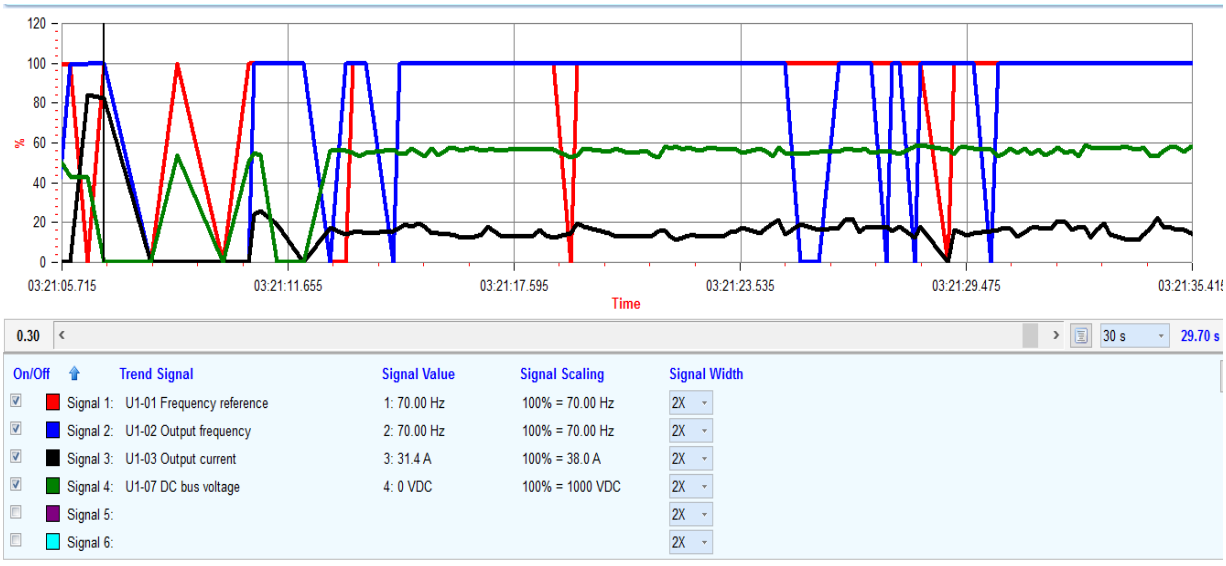


Figura 54 – Gráfico de análise de frequências, corrente e tensão VDC no regime permanente.

Durante a viagem analisou-se o instante de plena velocidade no qual os valores dos sinais 1 e 2 estavam com a capacidade máxima de frequência (velocidade), houve uma grave interrupção de energia.

Num período de 8 segundos ocorreu 4 interrupções sendo a mais prolongada 2 segundos. Nota-se que a perda prolongada de energia se perde os sinais de referências.

No retorno de energia o *drive* do inversor restabelece a frequência de referência

(sinal 1) e analisa-se a velocidade do bonde (frequência Output do sinal 2) de saída e introduz-se a busca automática de velocidade retomando aos valores de referência, equilibrando os valores do barramento DC, corrente e torque necessário.

Foi acrescentado no gráfico do simulador *Trend Recorder* da Yaskawa o sinal 5, que corresponde a *Output Power* (potência de saída).

Analisa-se o gráfico da figura 55, verifica-se os sinais elétricos no regime em que o bonde estava em velocidade permanente. Observa-se o comportamento do sinal 5 *Output Power* (potência de saída) em relação aos demais sinais e as ocorrências operativas durante a viagem.

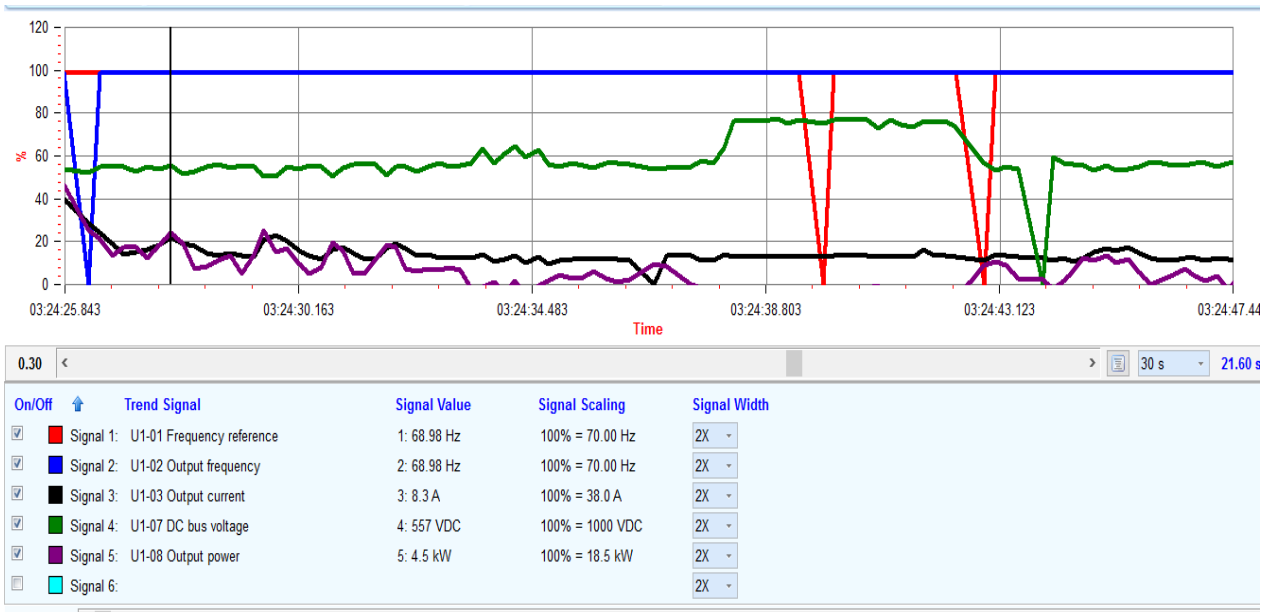


Figura 55 – Gráfico de análise de frequências, corrente, tensão VDC e potência no regime permanente.

4.5 Análise do comportamento do controle de acionamento no processo de desaceleração

No gráfico da figura 56 mostra o processo gradual de desaceleração (redução de velocidade) e o comportamento dos sinais com adição das falhas intermitentes de captação de energia.

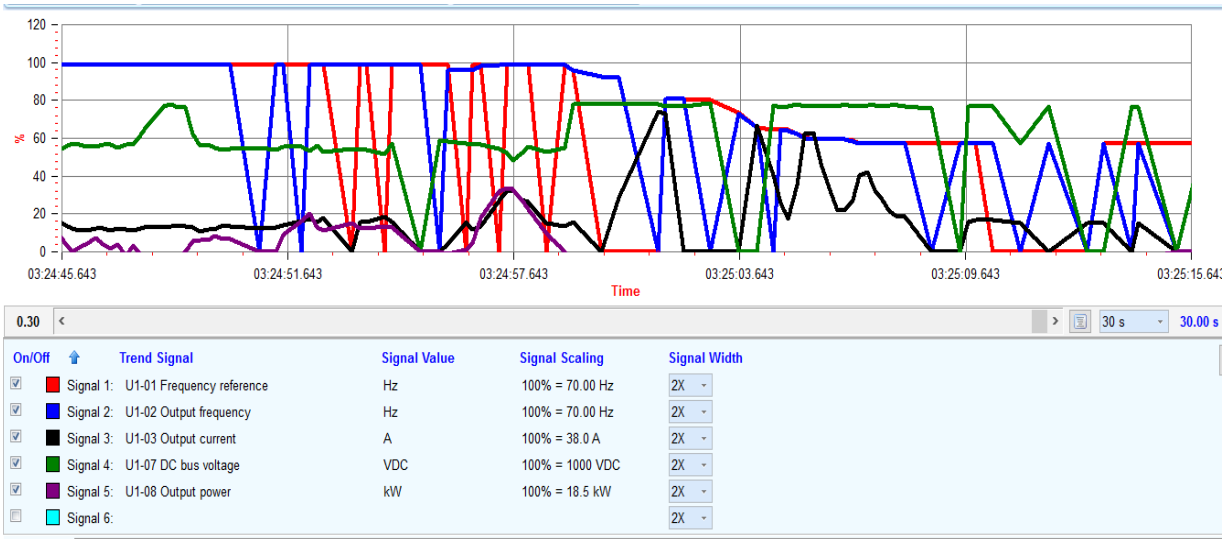


Figura 56 – Gráfico de análise de frequências, corrente, tensão VDC e potência no regime de desaceleração.

Na desaceleração do bonde, o sinal 1 (frequência de referência) é reduzido e o sinal 2 (frequência de saída) busca os novos valores de referência.

No período de busca de velocidade de referência (inferior a velocidade do motor), o motor passa a funcionar como um gerador descarregando a energia sobressalente no resistor (resistor de frenagem).

Neste período os motores não consomem potência e passam a gerar energia para a rede.

A corrente de circulação é consumida pelo resistor de frenagem, sendo transformada em energia calórica.

Segundo Lenz (2016) esclarece que, por esse resistor drena-se a energia regenerada pelo motor durante a execução de uma rampa de desaceleração (frenagem reostática).

Observa-se no gráfico da figura 53 que o sinal 5 *Output Power* (potência de saída) desaparece (não consome potência da rede) no momento de desaceleração, e simultaneamente o sinal 3 *Output current* (corrente de saída) registra valores, mostrando que neste instante o motor funciona como gerador e esta energia é descarregada nos resistores de frenagem.

4.6

4.7 Comparativo de consumo de potência dos acionamentos.

Verificou-se evolução em vários aspectos comparativos de funcionamento no Bonde nº1.

No quadro 7 mostra-se o comparativo de consumo de corrente (A) e potência (KW) durante uma viagem, usando os mesmos critérios de medições nos dois sistemas afim de se comparar com realidade dos dois sistemas de acionamento.

Quadro 7 – Ensaios de potência, corrente e tensão após a modernização.
Fonte: (Bonde nº1, ITATINGA, 2016).

Tempo (minutos)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (KW)	
0	406	76	30,86	Momento de partida
0,1	405,00	78,00	31,59	
0,2	406,00	79,00	32,07	
0,3	408,00	61,00	24,89	
0,4	420,00	49,00	20,58	
0,5	421,00	29,00	12,21	Regime permanente de viagem.
6	420,00	11,00	4,62	
7	418,00	12,00	5,02	
8	419,00	15,00	6,29	
9	414,00	12,00	4,97	
10	413,00	9,00	3,72	
11	416,00	14,00	5,82	
12	419,00	16,00	6,70	
13	418,00	19,00	7,94	
14	409,00	8,00	3,27	
15	423,00	5,00	2,12	
16	411,00	10,00	4,11	
17	415,00	11,00	4,57	
18	416,00	11,00	4,58	
19	417,00	13,00	5,42	
20	419,00	12,00	5,03	
21	413,00	14,00	5,78	
22	410,00	16,00	6,56	
23	414,00	18,00	7,45	
24	415,00	14,00	5,81	
25	413,00	16,00	6,61	

Para a simulação considerou-se o mesmo critério aplicado nos ensaios no Bonde nº1 com o acionamento antigo, consideramos o percurso total da casa de força “usina” até o porto de Itatinga com carga de pessoas e materiais.

A viagem foi efetuada em condições normais com transporte de pessoas e materiais. O percurso de 7,5km de distância foi efetuada com o tempo total de 25 minutos.

Os dados do quadro 7 foram extraídos da entrada geral do Bonde nº1, sendo monitorado o sistema bifásico de 440 volts. No gráfico da figura 57 mostra-se os valores de corrente e potência durante a viagem, comparando a evolução de dados antes e após a aplicação do novo acionamento.

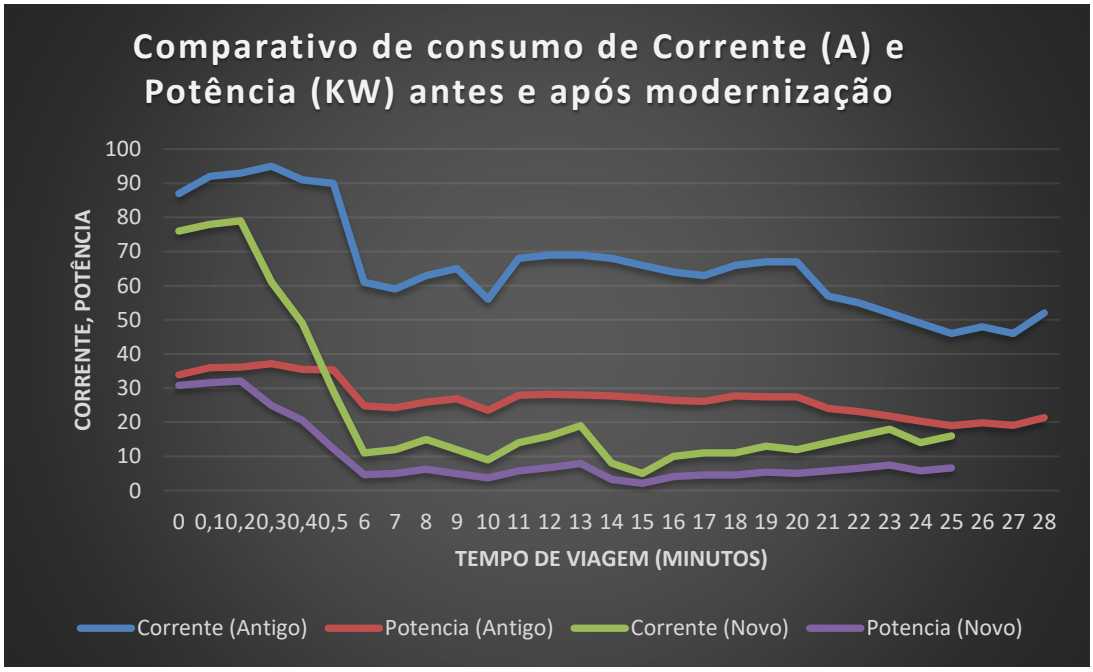


Figura 57 – Gráfico comparativo de consumo de corrente (A) e potência (KW) antes e após a modernização.

Os comportamentos dos sistemas de acionamento são parecidos nos primeiros segundos.

A corrente elétrica de partida do acionamento novo, tem um menor período de tempo, mostrando a eficiência do controle da corrente de partida, administrada pelo *software* do inversor de frequência e controlando a potência necessária para vencer a inércia, garantindo uma resposta rápida e eficiente.

Passado o momento crítico de partida, a corrente e potência do sistema se

mantém uniforme com níveis baixos em relação ao sistema antigo de acionamento.

A velocidade de resposta do novo acionamento, garantiu uma agilidade efetiva nas tomadas de decisões, tendo como resultado a redução do tempo total de viagem, caindo para 25 minutos o tempo total do percurso da casa de força ao porto de Itatinga.

5 CONCLUSÃO

A eletrônica de potência é um método muito empregado nas indústrias, utilizando diversos fatores para um bom controle produtivo e que facilitam na análise de processos e tomadas de decisões, garantindo o supervisionamento das condições fiéis para o gerenciamento das informações. Mesmo com as diversas vantagens de aplicação da eletrônica de potência sobre um processo de controle, houveram diversos obstáculos para aplicação final do acionamento, tais como os investimentos na infraestrutura, diversas adaptações mecânicas, limitações de espaços físicos, carência de dados comparativos, aquisição de novos equipamentos. Foram inúmeros os desafios para prosseguir num projeto onde faltavam dados confiáveis para o sucesso de aplicação. Neste trabalho foi definido um método de acionamento, através de um inversor de frequência que garantisse o bom funcionamento de operação considerando as constantes intermitências de energia, rede elétrica bifásica com baixos níveis de tensão acionando de motores de indução trifásicos. Estes foram pontos primordiais que auxiliaram o estudo e a busca de equipamentos especiais para ensaios aplicativos que garantissem melhor funcionamento que o acionamento anterior e condições de monitoramento para as manutenções preventivas. Ao aplicar-se o novo acionamento no Bonde nº1 com o uso dos inversores de frequência controlado pelo *drive Yaskawa Wizard Industrial*, obteve-se bons resultados, garantindo a eficiência e controle das grandezas elétricas necessárias para o bom acionamento do Bonde nº1. Os dados comparativos extraídos através do simulador *Trend Recorder software* do inversor de frequência e instrumentos de grandezas elétricas, mostraram a eficiência com notável elevação do desempenho. A possibilidade de ajustes rápidos dos parâmetros e a visualização dos resultados, possibilitaram interação fácil e assertiva para solução de problemas que venham a ocorrer. Os ajustes de rampa de aceleração, busca automática de velocidade, controle de corrente, potência, torque e supervisionamento das constantes intermitências de tensão permitiram a garantia do controle de operação, eficiência e qualidade da viagem ao longo dos 15 Km do percurso de ida e volta. Os resultados obtidos demonstram diversas vantagens para o novo método de acionamento e controle de velocidade com inversores de frequência, garantindo vantagens já citadas e adicionadas com o ganho de potência (torque), redução do consumo de energia elétrica, facilidade de operação (função restrita aos Maquinistas) e monitoramento do

comportamento do bonde durante a viagem. Verificou-se que os dados de monitoramento ajudaram os maquinistas a tomarem decisões assertivas durante as viagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNUNCIAÇÃO, L. **Estudo do impacto do sistema de acionamento de um motor de indução trifásico na eficiência energética e na qualidade da energia elétrica: um estudo de caso – elevador de canecas.** Cuiabá - MT, 2011. (Dissertação) – Universidade Federal de Mato Grosso.

BARBOSA, R. S. **Aplicação de sistemas multicorpos na dinâmica de veículos guiados**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1999.

BARBOSA, R. S. **Dinâmica do rodeiro ferroviário – Railway Wheelset Dynamics**. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas (RBCM) da associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM), Vol. XVIII, nº4, 1997.

BIGATON, C. **Projetos Mecânicos**. Material didático. ETC de Piracicaba "Cel. Fernando Febeliano da Costa". 2016. Disponível em: http://www.etepiracicaba.org.br/cursos/apostilas/mecanica/3_ciclo/projetos_mecanicos.pdf. Acesso em 21 de novembro de 2016.

CASTILHO, A. L. H. **ITATINGA. A hidrelétrica e seu legado**. 1ª Edição. São Paulo: Neotrópica. 2011.

CAVALCANTE, K. G. **Energia elétrica; Brasil Escola**. Disponível em <http://brasilescola.uol.com.br/fisica/energia-eletrica.htm>. Acesso em 04 de dezembro de 2016.

CAVALCANTE, K. G. **Lei de Joule**. Terra. Mundo Educação. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Joule. Acesso em 01 de novembro de 2016.

CLODOALDO. **Automação e controle** – Inversor de frequência. 2009. Disponível em: http://www.clubedaeletronica.com.br/Automacao/PDF/Apoio%20004%20-%20Inversores%20de%20frequencia.pdf. Acesso em 14 de setembro de 2016.

CREDER, H. **Instalações elétricas**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Ltc. 2008.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Ltc. 2013.

DUNLOP, C. J. **Os Meios de Transporte do Rio Antigo.** Museu Dantu. Disponível em: http://www.museudantu.org.br/brasil3.htm. Acesso em 27 de novembro de 2016.

ELETELE. **Catálogo de produtos.** 2016. Disponível em: http://www.eletele.com.br/catalogos.asp. Acesso em 25 de novembro de 2016.

ELETROBRAS PROCEL. **Motor elétrico guia básico.** 2009. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_eletrico.pdf. Acesso em 11 de setembro de 2016.

ESAB. **Catálogo de consumíveis eletrodos revestidos.** V1, 2013. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-

esab.pdf. Acesso em 01 de setembro de 2016.

FILHO, J. M. **Instalações elétricas industriais.** 7º Edição. Rio de Janeiro: Ltc. 2007.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos.** 4ª Edição. São Paulo: Érica. 2008.

GERDAU. **Catálogo técnico de perfis tipo U.** 2016. Disponível em: https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/barras-e-perfis-lamina-perfil-i-e-u.pdf. Acesso em 08 de setembro de 2016.

HENRIQUE, H. **Apostila de automação** – Máquinas e automação elétrica. 2015. Disponível em: https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/aula-de-motores-trifasicos-de-ca. Acesso em 14 de setembro de 2016.

KAY INDUSTRIES. **Manual de funcionamento e instalação - Rotafase**. Disponível em: file:///C:/Users/junior/Downloads/generadordetercerafase-instalacion.pdf. Acesso em 17 de setembro de 2016.

LENZ, A. L. **Apostila de tecnologia em Automação industrial**. Disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAcPYAC/conversores-frequencia-filosofia-controle-escalar. Acesso em 02 de novembro de 2016.

MIRANDA, U. A. **Análise e implementação de conversores monofásico- trifásico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007032901.pdf. Acesso em 03 de outubro de 2016.

NBR17094/2008. **Máquinas elétricas girantes, motores de indução.** Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=305704. Acesso em 03 de dezembro de 2016.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. São Paulo, Edgar Blücher, 1971, 3v.

POLICICCHIO, F. **Esboços de infraestrutura ferroviária**. Florence University Press. 2008. p 147.

ROLDAN, J. **Efeito Joule, eletricidade eletrônica.** Lisboa: Editora Plátano. Disponível em: http://www.sewanhaka.k12.ny.us/Domain/2802. Acesso em 28 de novembro de 2016.

SABÓ. **Catálogo técnico de retentores**. 2016. Disponível em: http://www.sabogroup.com.br/arquivos/catalogo_tecnico_1_70.pdf. Acesso em 08 de setembro de 2016.

SEW EURODRIVE. **Manual de instruções redutores e moto-redutores**. 2016. Disponível em: http://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11358858.pdf. Acesso em 10 de setembro de 2016.

SHIGLEY, Joseph E. **Elementos de Máquinas.** Volume I e II. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1980.

SKF. **Catálogo de rolamentos**. 2015. Disponível em: http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row-tapered-roller-bearings/single-row/index.html. Acesso em 02 de setembro de 2016.

TRAMEC. **Catálogo completo de redutores série T**. 2016. Disponível em: http://www.tramec.it/System/11285/02_T_IT-EN-DE_160615_WEB.pdf. Acesso em 10 de setembro de 2016.

VAZ, G. **Manual a lei de joule.** Faculdade de engenharia da universidade do Porto, Portugal, 2000. Disponível em: http://www.electronica-pt.com/pdf/lei-joule.pdf. Acesso em 28 de novembro de 2016.

VILLATE, J. E. **Eletricidade, Magnetismo e Circuitos.** ISBN 978-972-99396-2-4, Porto. 2013.

WEG. **Especificação de motores elétricos**. 19ª Revisão. Santa Catarina: 2016. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf. Acesso em 12 de julho de 2016.

YASKAWA. **Manual técnico de inversor de frequência, série V1000.** Disponível em: http://catalogo.yaskawa.com.br/Asset/MAN_PORT_V1000.pdf. Acesso em 02 de novembro de 2016.