

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

FABIANO CAVILHA DE SOUZA

**BANCADA DE TESTE PARA COMPROVAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM  
REBOBINAMENTO DE MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO, COM BASE  
NA LEITURA DO TORQUE DO MOTOR**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA  
2020

FABIANO CAVILHA DE SOUZA

**BANCADA DE TESTE PARA COMPROVAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM  
REBOBINAMENTO DE MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO, COM BASE  
NA LEITURA DO TORQUE DO MOTOR**

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Walter Denis Cruz Sanchez

CURITIBA  
2020



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Curso de Especialização em Automação Industrial



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**BANCADA DE TESTE PARA COMPROVAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM  
REBOBINAMENTO DE MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO, COM BASE NA LEITURA  
DO TORQUE DO MOTOR**

por

**FABIANO CAVILHA DE SOUZA**

Esta monografia foi apresentada em 22 de Fevereiro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Automação Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Walter Denis Cruz Sanchez  
Orientador

---

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas  
Membro titular

---

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## RESUMO

SOUZA, Fabiano Cavilha de. **Bancada de teste para comprovação da eficiência em rebobinamento de motor elétrico trifásico, com base na leitura do torque do motor.** 2020. 53 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Neste trabalho será desenvolvida uma bancada de testes para a comprovação da eficácia na manutenção de motor elétrico trifásico industrial, utilizando dois motores acoplados mecanicamente e acionados por dois inversores de frequência. O objetivo é aplicar no motor a ser testado dois modos de torque, o torque constante e o torque linear, um conjunto motor e inversor vai funcionar como gerador impondo ao outro conjunto um torque controlado, não será utilizado sensor de torque acoplado ao eixo dos motores, pois o próprio inversor de frequência possui em sua eletrônica um processamento com algoritmo de alta precisão capaz de fornecer informação do torque real com exatidão suficiente para avaliar se o motor ao trabalhar nas condições de exigência máxima vai responder adequadamente no que se espera de um motor recondicionado.

**Palavras-chave:** Bancada de testes. Motor elétrico. Inversor de Frequência. Torque Controlado.

## ABSTRACT

SOUZA, Fabiano Cavilha de. **Test bench for quality verification in three-phase electric motor rewinding, based on the reading of the conjugate of motor.** 2020. 53 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

In this work, a bench test will be developed to prove the mechanical maintenance of the industrial electric motor, using two motors mechanically coupled and driven by two frequency inverters. The objective is to apply no motor to be tested with two torque modes, constant torque and linear torque, one motor and inverter set will be run as an imported generator for another controlled torque set, a torque sensor coupled to the shaft will not be used. of the motors, since the frequency inverter itself has in its electronics a processing with high precision algorithm, capable of providing real torque information with sufficient precision so that evaluate the motor when working in the conditions of maximum use that responds to the waiting in the motor reconditioned.

**Keywords:** Testicle bench. Electric motor. Frequency inverter. Controlled torque.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de célula de carga .....	11
Figura 2 - Bobinado polifásico .....	14
Figura 3 - Campo girante .....	14
Figura 4 - Vista explodida motor elétrico trifásico .....	15
Figura 5 - Curto-circuito na bobina do motor: [A] curto de espiras; [B] bobina curto-circuitada; [C] curto entre fases .....	17
Figura 6 - Curto contra a massa: [A] curto na conexão; [B] curto na saída da ranhura; [C] curto interior da ranhura .....	17
Figura 7 - Danos causados por sobrecarga: [A] rotor travado; [B] sobreaquecimento .....	18
Figura 8 - Falhas causadas por problemas na rede de alimentação: [A] pico de tensão; [B] desbalanceamento de tensão; [C] falta de fase ligação estrela .....	19
Figura 9 - Ponto quente em motor elétrico .....	20
Figura 10 - Estator bobinado manualmente e máquina de bobina automatizada .....	23
Figura 11 - Sistema de impregnação por gotejamento indicando o bico aplicador de resina .....	24
Figura 12 - Exemplo de um tanque de imersão (impregnação por imersão) .....	25
Figura 13 - Auto clave para impregnação a vácuo .....	25
Figura 14 - Cálculo para motor operando em 30 Hz .....	27
Figura 15 - Cálculo para motor operando em 90 Hz .....	27
Figura 16 - Diagrama de potência do inversor .....	28
Figura 17 - Forma de onda produzida pelo inversor de frequência .....	29
Figura 18 - Inversores interligado pelo link CC .....	30
Figura 19 - Curva carga de torque variável .....	32
Figura 20 - Curva carga de torque constante .....	32
Figura 21 - Exemplo de um diagrama Ladder .....	37
Figura 22 - Foto da bancada .....	39
Figura 23 – Diagrama Ladder torque constante .....	42
Figura 24 - Diagrama Ladder torque linear .....	44
Figura 25 - Fluxo da bancada .....	45
Figura 26 - Gráfico de torque constante .....	47
Figura 27 - Gráfico de torque linear .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de resistência de isolação de um motor elétrico .....	21
Tabela 2 - Parâmetros utilizados.....	36
Tabela 3 - Parâmetros do inversor de frequência CFW700 .....	40
Tabela 4 - Parâmetros do inversor de frequência CFW-11 .....	41
Tabela 5 - Valores coletados no teste com torque constante.....	45
Tabela 6 - Torque em Nm em modo constante .....	46
Tabela 7 - Valores coletados no teste com torque linear .....	47
Tabela 8 - Torque em Nm em modo linear.....	48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 PROBLEMA .....	9
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.2.1 Objetivo Geral .....	10
1.2.2 Objetivos Específicos .....	10
1.3 JUSTIFICATIVA .....	11
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
2.1 MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS .....	13
2.2 PRINCIPAIS FALHAS .....	16
2.3 EQUIPAMENTOS PARA TESTE DO MOTOR.....	20
2.4 EQUIPAMENTOS PARA TESTE DO MOTOR COM CARGA.....	22
2.4.1 Dinamômetros .....	22
2.5 MÉTODOS DE MANUTENÇÃO .....	23
2.6 INVERSORES DE FREQUÊNCIA .....	26
2.7 DIAGRAMA DE UM INVERSOR .....	28
2.8 LÓGICA DE CONTROLE .....	30
2.9 ENTRADAS E SAÍDAS DIGITAIS .....	31
2.10 ENTRADAS E SAÍDAS ANALÓGICAS .....	31
2.11 CONTROLE DE TORQUE .....	31
2.12 AQUISIÇÃO DO VALOR DE TORQUE.....	33
2.13 SOFTWARE WLP .....	36
2.14 SOFTWARE SUPERDRIVE.....	37
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>38</b>
3.1 AJUSTES DA BANCADA PARA TESTES .....	40
3.1.1 Ajuste da Bancada para Ensaio em Torque Constante.....	42
3.1.2 Ajuste da Bancada para Ensaio em Torque Linear .....	43
3.3 ENSAIOS COM CARGA .....	45
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>50</b>
<b>5 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Em uma sociedade cada vez mais interligada, próxima, globalizada, com fronteiras sendo rompidas, a indústria é muito exigida, seja pelo seu consumidor querendo o melhor produto, com menor preço no menor prazo, pelo seu concorrente que está sempre otimizando sua produção para poder estar um passo a frente nos quesitos citados e também as regulações dos órgãos fiscalizadores que impõe novas normativas exigindo dos equipamentos, segurança, rendimento e equilíbrio com o meio ambiente.

Esse modelo operacional em que a indústria está inserida vem exigindo uma atenção muito grande na concepção, especificação e implantação dos projetos, um projeto bem executado garante vantagens competitivas com a redução das perdas durante o processo produtivo.

Em se tratando de redução de perdas e ganhos de produção a manutenção industrial vem evoluindo gradativamente, e se firmando como setor importante na indústria, historicamente a manutenção é subordinada a operação onde no início o objetivo básico era realizar manutenções corretivas. Com o crescimento da produção a manutenção se tornou mais importante, a intervenção para realizar corretivas não são mais aceitáveis, com isso surgiu a manutenção preventiva, a preventiva até hoje é a mais usual baseada em estatísticas como tempo ou horas trabalhadas, podendo desta forma planejar e controlar a manutenção e determinar suas causas e efeitos.

Em um ambiente industrial a vários equipamentos catalogados e que são inspecionados rotineiramente a fim de garantir sua integridade e funcionalidade durante o tempo planejado pela manutenção, neste contexto será abordado durante este trabalho os aspectos que envolvem a manutenção de um equipamento em especial, comum e necessário em todas as fábricas, ele é o motor elétrico, seja para movimentar, triturar, bombear, ventilar, não importa a aplicação, é um equipamento fundamental na arquitetura de uma indústria, segundo informações do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) o uso de motores elétricos é responsável por cerca de 62% da energia elétrica consumida em uma empresa.

Dados do Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável e do CNI, indicam que em média um motor elétrico no Brasil é utilizado por 17 anos é o dobro do utilizado em países desenvolvidos, e ao longo de sua vida

útil estes motores são em média rebobinados 4 vezes, baseado nisso pode-se ter idéia da movimentação e da importância deste mercado.

Segundo Reis (2018) o Ministério de Minas e Energia, em seu Plano de Eficiência Energética (PEE), motores elétricos correspondem ao maior custo de energia elétrica da indústria, cerca de 30% de toda a energia elétrica consumida no Brasil. Com isso a várias ações para atualizar o parque de motores no Brasil, planos de troca de motores e portarias do governo federal determinando níveis mínimos de eficiência na fabricação e comercialização de motores elétricos.

A prática recorrente de rebobinamento de motores elétricos industriais não atende os requisitos mínimos de eficiência, um levantamento realizado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) em 2014, indica que o rebobinamento de motores elétricos é responsável por 7.1 TWh/ano de perdas de energia elétrica, a pesquisa ainda cita que a cada processo de manutenção as perdas aumentam na faixa de 1 a 3% (REIS, 2018).

## 1.1 PROBLEMA

A garantia de que o motor elétrico recebeu uma intervenção adequada com o emprego de material de qualidade, procedimentos corretos, faz com que dentro dos limites aceitáveis o motor mesmo que ao passar por uma manutenção possa manter o seu nível de eficiência próximo mínimo, eficiência em consumo de energia elétrica e também não menos importante no tempo de disponibilidade operacional, de maneira que o mesmo só pare de funcionar durante as paradas programadas e não por quebras indesejadas.

Durante o processo de manutenção alguns procedimentos que são comuns podem afetar diretamente no rendimento do motor, com relação à eficiência energética e conjugado, esses processos são:

- Aquecimento excessivo do núcleo de ferro para retirada do enrolamento defeituoso, provocando o rompimento do isolamento interlaminar e, como consequência, aumento das perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault);
- Rebobinagem em desacordo com os dados de projeto do fabricante (número de espiras a menos, bitola do fio menor, etc.);

- Reparos no rotor, como a usinagem no diâmetro externo, provocam um grande aumento na corrente de magnetização e, conseqüentemente, das perdas.

Erros de bobinagem podem ser determinados através da leitura da resistência ôhmica, com isso verificar se o fio ou o número de espiras foram aplicadas corretamente, tensão e corrente fornecem um diagnóstico preliminar quando testado o motor a vazio, já alterações construtivas que afetam o conjugado do equipamento só são possíveis quando o motor é exposto a uma carga e assim saber se o equipamento oferece as condições de realizar o trabalho ao qual era submetido anteriormente a manutenção.

Através da implantação de uma bancada de teste serão imposto condições de carga constante ou linear ao motor, para obter dados de corrente, tensão, velocidade, potência e torque e com isso poder determinar se o equipamento está apto a trabalhar.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma bancada de testes que possibilite avaliar motores elétricos trifásicos em corrente alternada, impondo uma carga ao motor e coletando suas grandezas elétricas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Etapas a serem realizadas para atingir-se o Objetivo Geral neste trabalho de conclusão de curso de especialização são:

- Desenvolver um protótipo de bancada para realizar o teste em motores elétricos;
- O motor gerador de carga deve impor torque linear e torque constante ao motor reconicionado;
- Gerar um gráfico com informações em tempo real da corrente, potência, velocidade e torque do motor reconicionado;
- Parametrizar os inversores de frequência;

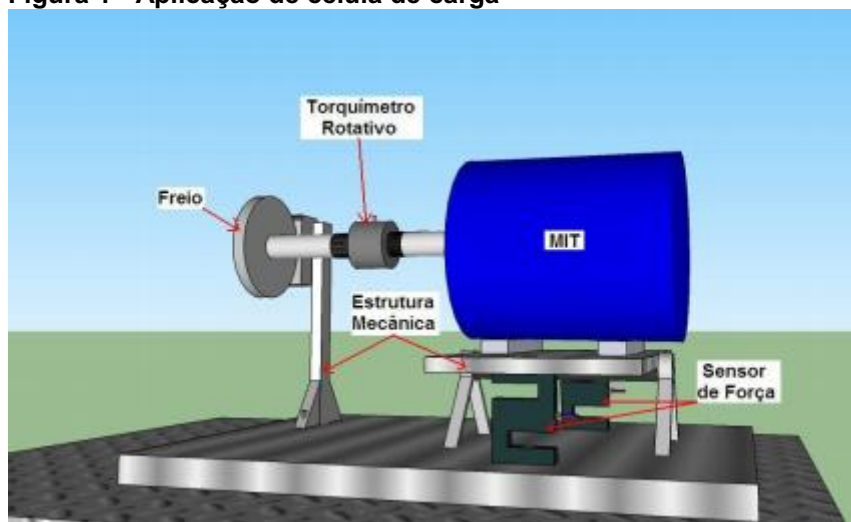
- Programar software WLP para lógica de torque constante e linear.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Corrente, e tensão são grandezas essenciais para um sistema elétrico da mesma maneira para um sistema mecânico velocidade e torque são fundamentais.

Medir o torque em sistemas rotativos é muito difícil, um método de fazer esta leitura é através da deformação de uma célula de carga, que envia um sinal elétrico variável conforme a carga para um transdutor que trata a informação e indica ao operador, através de um controlador dedicado. A Figura 1 mostra dois modos de coleta por célula de carga, uma através do torquímetro rotativo e outra pelo sensor de forçar que sofre uma pressão e por consequência deformação.

**Figura 1 - Aplicação de célula de carga**



Fonte: Devitte (2012).

Ainda na Figura 1 tem-se o exemplo de dois sistemas de medição baseado no emprego da célula de carga, o torquímetro rotativo e o sensor de força. Elas vão receber a ação de um conjugado resistente vindo do freio, ocasionando a deformação do material e a gerando um sinal elétrico que será processado por um transdutor. Este método exige um grande investimento, pois tem-se que ter um equipamento no freio que indica o torque padrão, para que se faça a aferição dos dois leitores da bancada, as células de carga por sua vez terão que ser aferidas tanto para o menor quanto para o maior motor que será testado na bancada.

Com o emprego do inversor de frequência pretende-se através da leitura das grandezas elétricas, determinar o torque no eixo do motor, utilizando a leitura das correntes do estator e os fluxos magnéticos do estator, segundo estudos da HBM empresa especializada do setor de célula de carga, o inversor de frequência é capaz de calcular o torque interno do motor que corresponde ao torque de aperto mecânico (HBM, 2013).

Baseado nisso o emprego de uma bancada que possa fazer a leitura do torque no motor de modo dinâmico, através do emprego do inversor de frequência, se torna uma opção viável para a aplicação de teste em motores rebobinados.

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Pretende-se utilizar como forma de pesquisa, livros técnicos, normas de ensaios de motores e artigos disponíveis na internet, buscando dados sobre métodos utilizados para realização de testes em motores. Definindo quais as medidas elétricas são fundamentais a serem coletadas, com o auxílio de um software para armazenar e organizar as informações de maneira que possa-se demonstrar o valor coletado.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia de especialização está dividida em 5 capítulos. No primeiro capítulo foi apresentada a introdução, o problema, os objetivos, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

No segundo capítulo foi apresentada a fundamentação teórica sobre os principais tópicos do trabalho, que são o motor elétrico, sua forma construtiva, falhas, manutenção, inversores de frequência e os softwares utilizados para o desenvolvimento da bancada.

No terceiro capítulo será apresentado o estudo de caso, com o desenvolvimento e testes realizados. No quarto e quinto capítulos foram apresentadas as considerações finais do trabalho com a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão relatados os tópicos mais importantes sobre o motor elétrico, inversor de frequência e leitura do torque, que nos auxiliarão no entendimento sobre o desenvolvimento e funcionamento da bancada de teste.

### 2.1 MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

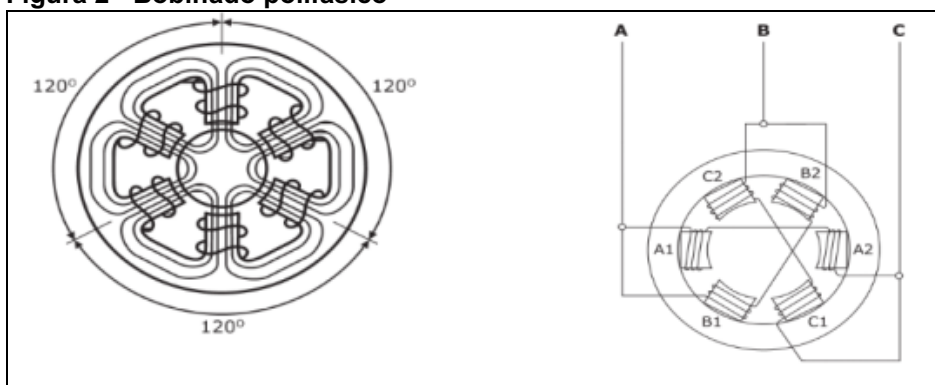
O motor elétrico se tornou um dos principais inventos do homem ao longo do seu desenvolvimento tecnológico, sendo uma máquina de construção simples, custo reduzido, versátil e não poluente.

Basicamente o motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica, os tipos mais comuns são os motores em corrente alternada e os motores em corrente contínua, sendo hoje o de corrente alternada largamente utilizado, cabendo ao de corrente contínua ocupar o espaço em aplicações bem especiais, por isso será concentrando os estudos na linha em corrente alternada trifásica.

Os motores de corrente alternada possuem uma grande vantagem, pois o sistema de distribuição de energia é alternado isso facilitou sua aplicação popularizando sua utilização na indústria, comércio e residências. O seu princípio de funcionamento baseia-se na lei da Faraday onde um campo magnético interage com um circuito elétrico e produz uma força eletromotriz que no caso dos motores é transferida a um eixo gerando energia mecânica.

Um bobinado polifásico, conforme a Figura 2, alimentado por uma tensão trifásica produzirá um campo magnético girante (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p. 24), a velocidade deste campo magnético girante chamada de velocidade síncrona, é proporcional a frequência do sistema de tensões trifásico e ao número de pólos do bobinado.

**Figura 2 - Bobinado polifásico**

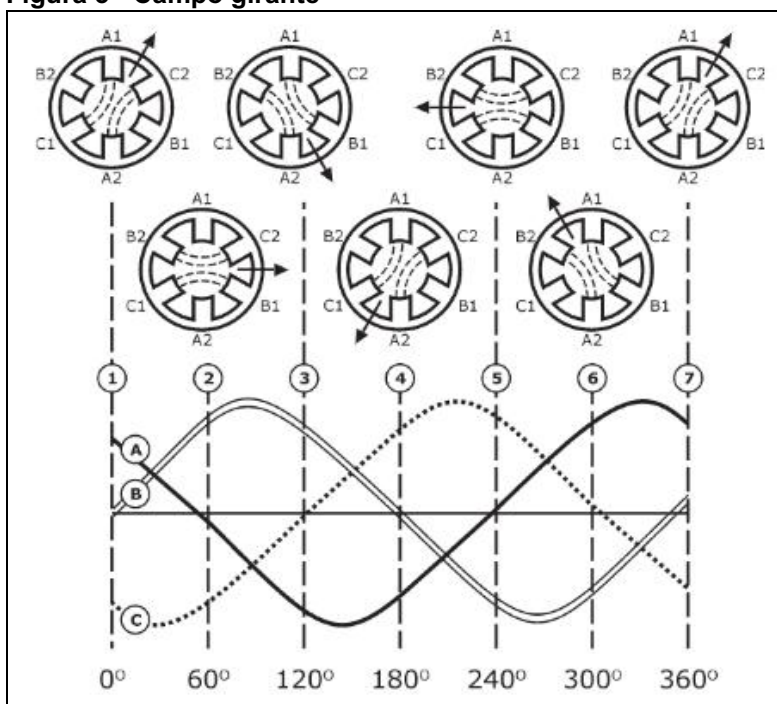


Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 24).

O sistema é trifásico, porém como eles alternam a presença ou não de tensão nas bobinas sempre haverá a interação entre apenas dois campos magnéticos, desta interação resultará em uma força ( $F$ ) de repulsão entre os condutores, a intensidade desta força é proporcional a corrente que passa nos condutores e a distância entre eles.

Na Figura 3 observa-se com mais clareza a alternância da tensão, e os vetores de indução magnética resultante da interação entre dois campos magnéticos, que se alternam a cada 120° formando um campo girante, sendo este campo girante variável conforme a frequência de alimentação e o número de pólos do motor (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p. 25).

**Figura 3 - Campo girante**

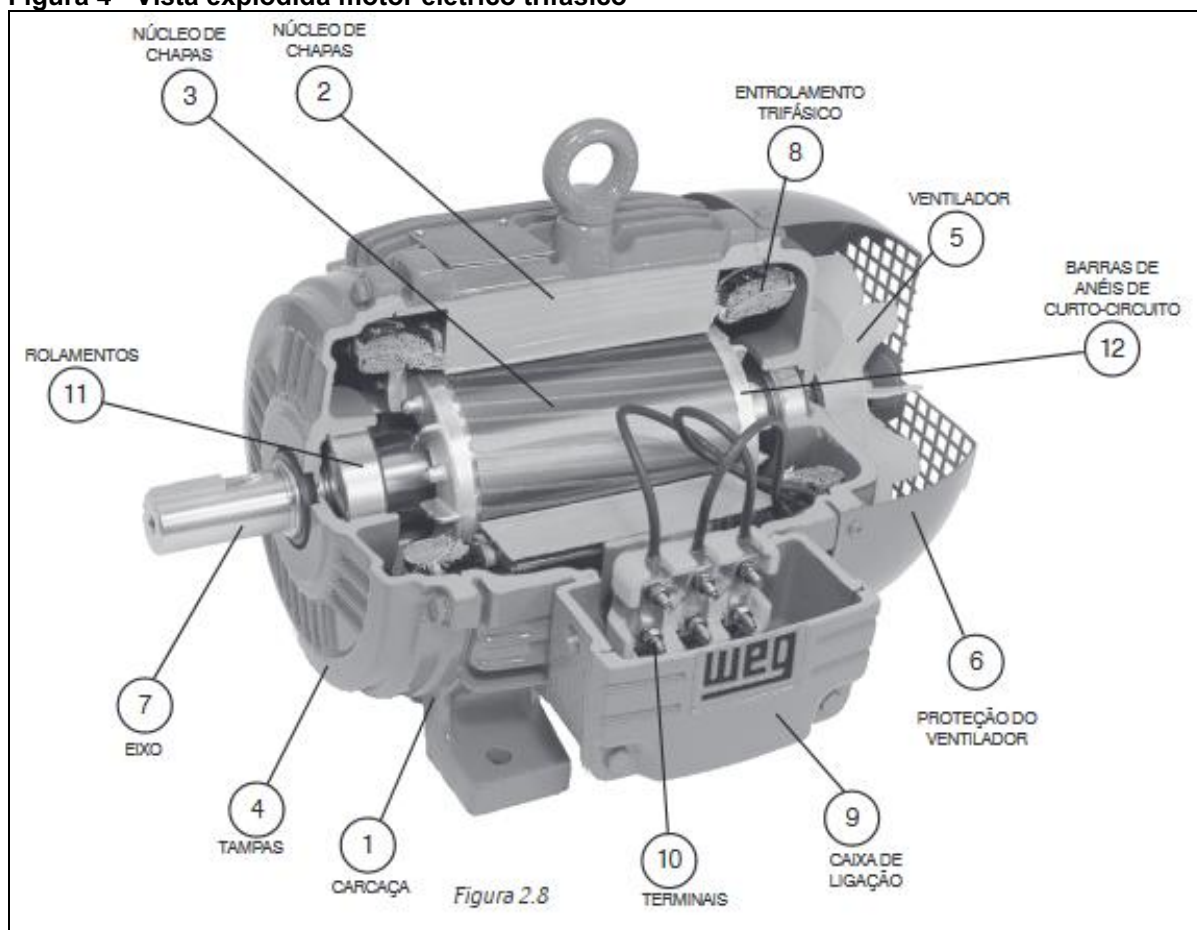


Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 25).

Neste momento o rotor funciona como um condutor e ao se movimentar um condutor dentro de um campo magnético aparecerá uma tensão induzida entre os terminais deste condutor formando um campo magnético no rotor. Como existem dois campos magnéticos, um no rotor e outro no estator aparecerá uma força entre os mesmos que fará o rotor girar, já que o mesmo está apoiado sobre rolamentos mancalizados.

Basicamente o motor elétrico trifásico é formado por duas partes: a) estator e b) rotor. A Figura 4 mostra uma vista explodida e detalhada do motor elétrico trifásico.

**Figura 4 - Vista explodida motor elétrico trifásico**



Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 26).

Ainda na Figura 4, pode-se observar as partes que compõem o “estator” (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p. 27), são elas:

- Carcaça (1): É a estrutura suporte do conjunto, construída em ferro fundido, alumínio ou aço, possui aletas para auxiliar na dissipação térmica.



- Núcleo de chapas (2): As chapas são de aço magnético, tratado termicamente para reduzir as perdas no ferro.
- Enrolamento trifásico (8): Três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico.

Novamente na Figura 4, pode-se observar as partes que compõem o “rotor” (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p. 27), são elas:

- Eixo (7): É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga.
- Núcleo de chapas (3): As chapas possuem a mesmas características das do estator.
- Barras de anéis de curto-circuito (12): São de alumínio injetado sobre pressão em uma única peça.

Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 27) destacam que as outras partes do motor trifásico, destacados também na Figura 4, são: tampa (4), ventilador (5), tampa defletora (6), caixa de ligação (9), terminais (10) e rolamentos (11).

## 2.2 PRINCIPAIS FALHAS

O motor elétrico é uma máquina em constante evolução, segundo fontes do site do Museu da WEG, datam de 1600 com o cientista inglês Willian Gilbert os primeiros estudos sobre a força de atração magnética até o ano de 1889 quando o engenheiro eletricista russo Michael Von Dolivo Dobrowolsky que após persistir nos estudos sobre motor elétrico trifásico com rotor em gaiola iniciou no ano de 1891 a fabricação de motores assíncronos em série com potência de 0.4 a 7.5 kW.

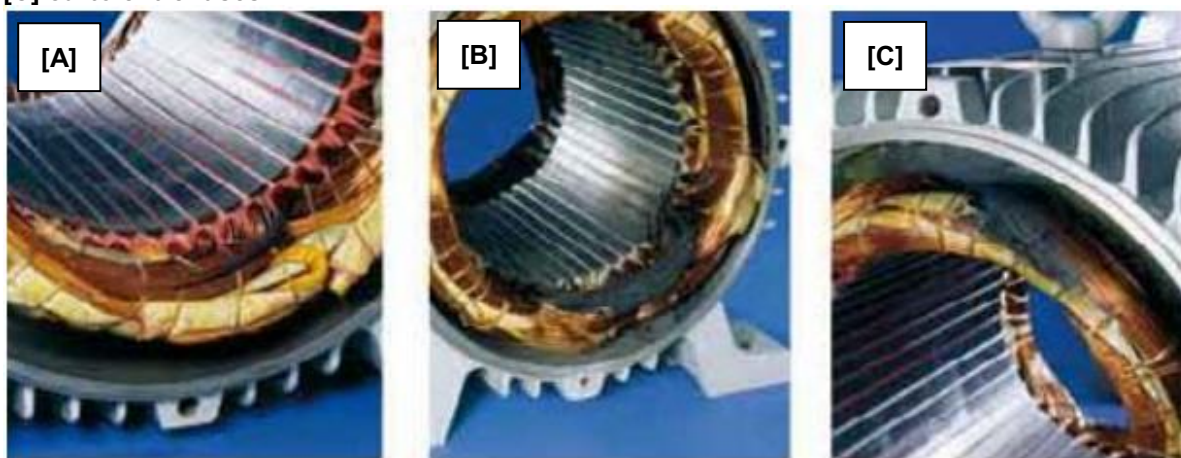
Desde 1891 esta máquina evolui significativamente, por consequência e não menos importante, os acionamentos, proteções e controle delas também seguiram os mesmos passos, este assunto será abordado posteriormente, porém ele é um gatilho para se falar de temas referentes aos danos e falhas em motores elétricos.

A transformação cultural do consumidor brasileiro e também as normas de proteção ao usuário, NR10, por exemplo, exigiu uma mudança de desenvolvimento de circuitos elétricos, com isso a aplicação contadores, disjuntor motor, soft starter, inversor de frequência e relês específico, além de proteger o usuário protegeu

significativamente os motores elétricos fazendo com que os danos em enrolamentos dos motores diminuíssem drasticamente.

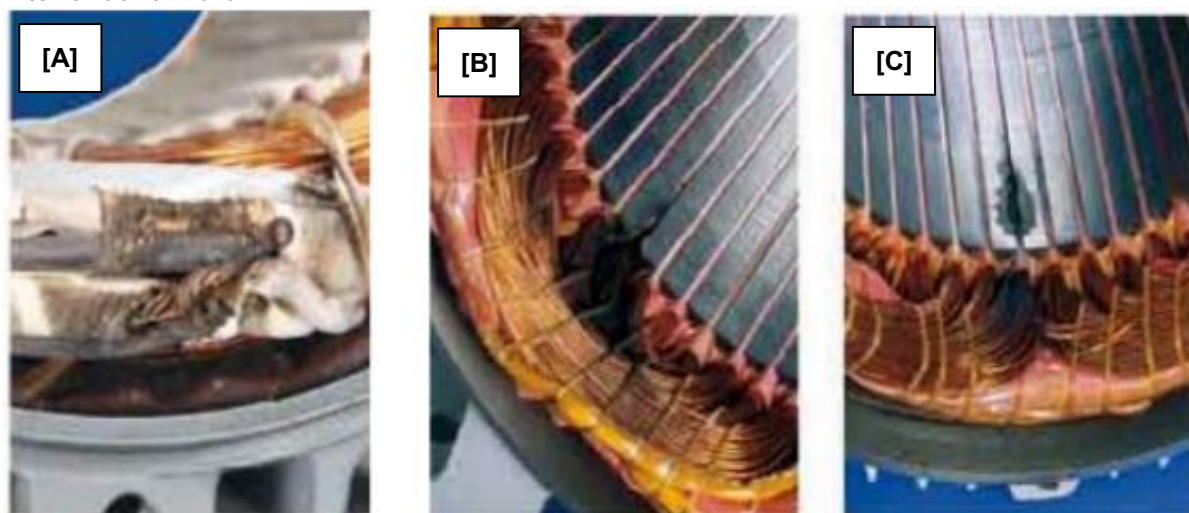
Situações que podem comprometer ou diminuir a vida útil de um motor elétrico geralmente são provenientes de condições de operações desfavoráveis, e elas podem ser de origem elétrica, mecânica ou do ambiente em que ele está instalado, as fotos apresentadas nas Figuras 5 e 6 ajudam a ilustrar melhor esta situação.

**Figura 5 - Curto-circuito na bobina do motor: [A] curto de espiras; [B] bobina curto-circuitada; [C] curto entre fases**



Fonte: WEG (2019b).

**Figura 6 - Curto contra a massa: [A] curto na conexão; [B] curto na saída da ranhura; [C] curto interior da ranhura**



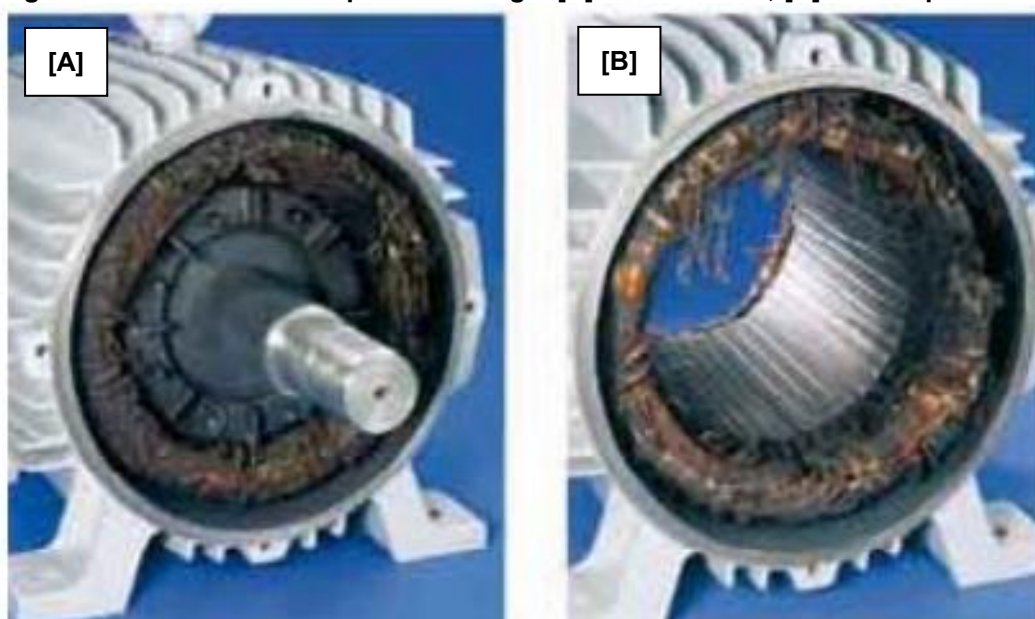
Fonte: WEG (2019b).

Novamente as Figuras 5 e 6 indicam os defeitos no isolamento do motor causados muitas vezes por contaminação, abrasão ou oscilações de tensão.

É possível citar como exemplo de contaminação e que são bem comuns, a aplicação de motores conectados a redutores de velocidade, os redutores de velocidade precisam estar com suas engrenagens imersas em óleo lubrificante para diminuir o atrito entre elas, é comum as vedações e retentores tanto do redutor quanto do motor sofrerem desgastes, por consequência o óleo do redutor tende a atingir o motor, e através da comunicação entre eixos em seguida atingem o estator do motor causando a perda gradativa da isolação, ao permitir que o equipamento trabalhe nesta condição fatalmente o motor entrará em curto-circuito no ponto mais vulnerável.

Através das fotos apresentadas na Figura 7 é possível verificar o dano causado por sobrecarga, geralmente ocasionado por uma condição de operação inadequada, conforme dito anteriormente a evolução dos dispositivos de proteção fazem com que este tipo de falha seja cada vez menor, em empresas com uma manutenção profissional é raro casos como este. Eles ocorrem mais em casos extremos às vezes derivado de uma sequência de problemas na máquina que atingem de forma inesperada o motor; como a sobrecarga necessariamente não ocorre somente por rotor bloqueado a forma mais comum é quando o equipamento é energizado com a tensão errada ocasionando uma elevação de corrente, bastante comum em consumidores residenciais e comerciais, devido ao baixo conhecimento técnico.

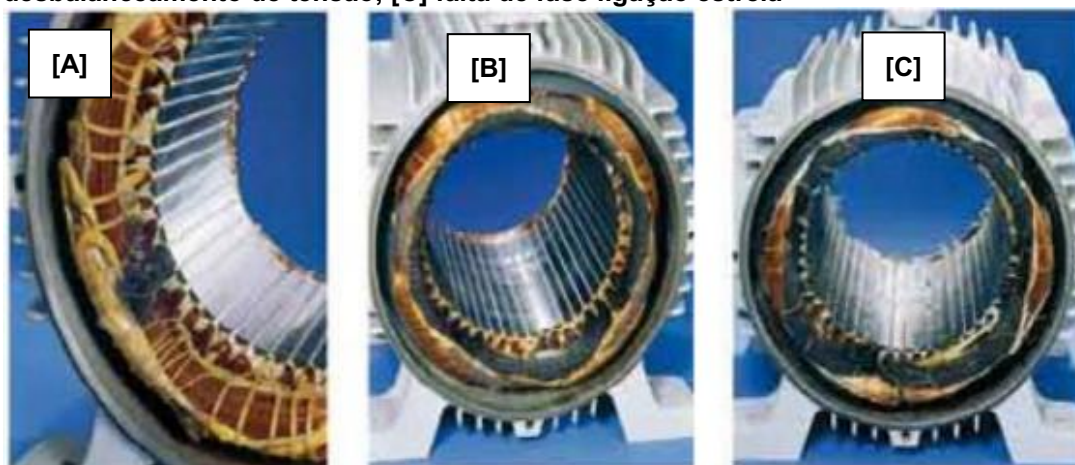
**Figura 7 - Danos causados por sobrecarga: [A] rotor travado; [B] sobreaquecimento**



Fonte: WEG (2019b).

Em se tratando de condições elétricas desfavoráveis o motor pode vir a queimar por falta de fase, distorções na rede de alimentação seja ela por elevação de tensão ou por queda de tensão, a Figura 8 indica na primeira foto a esquerda queima proveniente de um pico de tensão, ela é bem localizada atingindo um ponto da bobina, já as duas seguintes mostram danos causados por falta de fase ou desbalanceamento de fase, este problema acaba sobrecarregando apenas a bobina que esta sofrendo com o fornecimento inadequado de energia, neste caso circula uma corrente superior ao projetado, ocasionando danos a isolação da bobina que por consequência irá entrar em curto-circuito.

**Figura 8 - Falhas causadas por problemas na rede de alimentação: [A] pico de tensão; [B] desbalanceamento de tensão; [C] falta de fase ligação estrela**

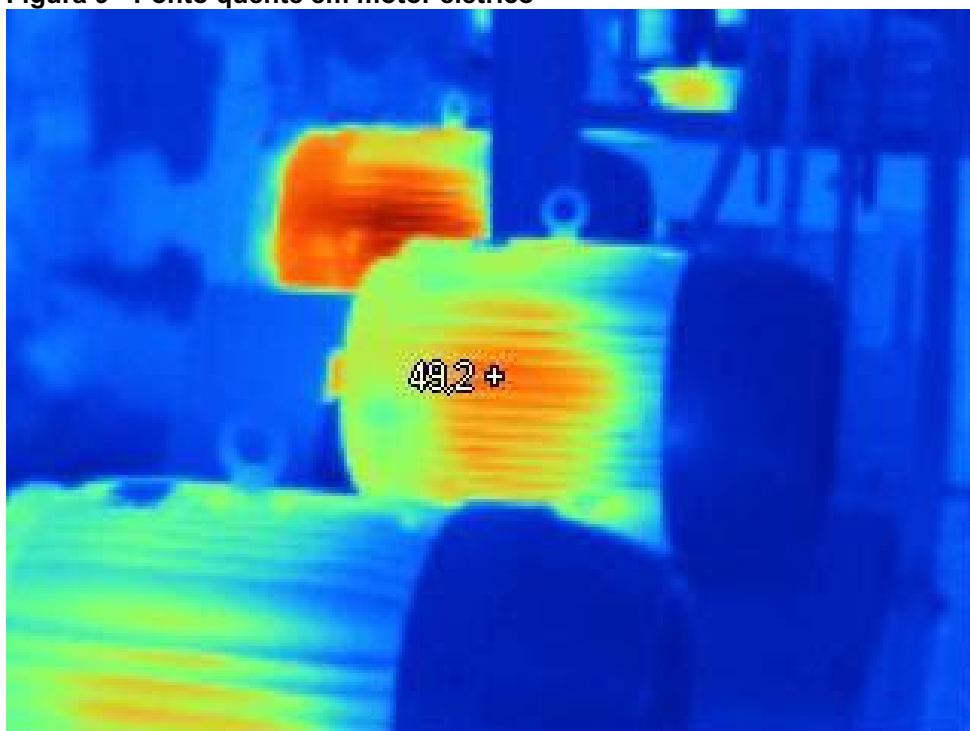


Fonte: WEG (2019b).

Também pode-se ter falhas provenientes pela falta de manutenção mecânica do motor ou defeito na isolação, ou por uma falha de produção do equipamento, neste caso principalmente no rolamento, ou o mais comum a interferência externa de outros equipamentos geralmente relacionados a desalinhamentos de acoplamentos ou desbalanceamento de cargas, que geram um esforço considerável no rolamento e mancal que ao persistir nesta condição fatalmente ocorrerá a quebra do rolamento e por consequência o deslocamento do rotor no estator, danificando o bobinado e principalmente o pacote de chapas que formam as ranhuras do estator. Danos a este pacote de chapas normalmente ocasionam a condenação do equipamento, há algumas técnicas que possibilitam o reembalamento de chapas para que haja uma melhor composição da massa do estator, porém isto não evita aparecimento de pontos quentes que vão comprometer a vida útil e eficiência do motor.

Eventuais danos causados no rotor também podem por consequência afetar o rendimento do conjunto, uma trinca no rotor, por exemplo, atua como uma espécie de resistência a passagem de corrente elétrica, ocasionando perdas por efeito Joule devido ao aumento de temperatura, conforme indicado na Figura 9. Isso influencia na perda de rotação do rotor aumentando o escorregamento em relação ao campo girante do estator e por consequência a elevação da corrente no estator ocasionando perdas de potência e maior ineficiência do conjunto.

**Figura 9 - Ponto quente em motor elétrico**



Fonte: Autoria própria<sup>1</sup>.

### 2.3 EQUIPAMENTOS PARA TESTE DO MOTOR

Ao receber um motor elétrico para a manutenção o primeiro passo é verificar as grandezas elétricas do motor, se estas medidas estiverem dentro dos valores especificados pela norma NBR 05383 isso possibilita que o motor possa ser ligado.

Para análise dos valores de resistência deve-se considerar a Tabela 1, que orienta quanto à segurança dos valores de resistência das bobinas do estator.

---

<sup>1</sup> Fonte: **Termografia em motores elétricos**. Publicado em: nov. 2012. Disponível em: <<http://ee-instalacoescommotores.blogspot.com/2012/11/termografia-em-motores-eletricos.html>>. Acesso em: 11 jan. 2020.

A Tabela 1 indica a faixa de valores de resistência de isolamento de um motor elétrico, pode-se verificar duas leituras que são tiradas a partir da tensão nominal aplicada, tensão de 1.1 kV e tensão acima de 1.1kV. A aplicação desta tensão é realizada por um Megôhmetro, a fim de testar a isolamento entre as bobinas do estator e a carcaça, quanto maior a resistência ôhmica mais segura à aplicação, garantindo que o verniz, papel e toda a estrutura de isolamento do motor foram realizadas adequadamente

**Tabela 1 - Limites de resistência de isolamento de um motor elétrico**

Valor limite para tensão nominal até 1,1 kV (MΩ)	Valor limite para tensão nominal acima de 1,1 kV (MΩ)	Situação
Até 5	Até 100	Perigoso, o motor não deve operar nessa condição.
Entre 5 e 100	Entre 100 e 500	Regular
Entre 100 e 500	Acima de 500	Bom
Acima de 500	Acima de 1000	Excelente

Fonte: WEG (2019a, p. 23).

Os valores de resistência de isolamento são um grande indicador do estado do motor, o ideal é que a empresa tenha um histórico da resistência, com isso a equipe de manutenção pode fazer o monitoramento da máquina e observar se a resistência esta diminuindo em relação a sua média histórica possibilitando realizar as preventivas, neste caso uma simples limpeza do estator e posterior secagem em estufa já é o suficiente para elevar o valor ôhmico e garantir que ela fique no valor desejado.

Para o levantamento desta e outras grandezas elétricas pode-se utilizar os equipamentos apresentados a seguir:

- **Megôhmetro:** O ensaio com o Megôhmetro consiste em aplicar uma tensão entre 500 e 10.000 V, com isso uma pequena corrente circula entre as bobinas indicando no aparelho os valores de resistência entre as bobinas e carcaça do motor.
- **Miliohmímetro:** Este equipamento tem a possibilidade de medir resistências com o valor ôhmico bem baixo, miliohms, o sistema utiliza a ponte de Kelvin de quatro fios por onde passa uma corrente de teste através da ponta de modo que a tensão seja detectada no pino central, este método elimina a resistência de contato e minimiza a possibilidade de erros causada pela resistência dos cabos.

- **Surg teste:** Com este equipamento é possível identificar um defeito entre espiras devido a uma isolação frágil. Ele é um teste destrutivo, pois se o potencial aplicado for maior que o dielétrico do fio a isolação será rompida, as espiras estarão em curto, variando a indutância da bobina conseqüentemente aumenta a frequência mudando a forma de onda original ou de referência.
- **Câmera termográfica:** Quanto maior a temperatura do motor, maior a radiação infravermelha emitida por ele. Esta radiação é impossível de ver a olho nu, porém ela pode ser sentida em forma de calor. A câmera termográfica foi concebida para enxergar essas faixas invisíveis a olho humano, associando cores a temperaturas medidas (DIEGOLI; GAVLAKI, 20188).

## 2.4 EQUIPAMENTOS PARA TESTE DO MOTOR COM CARGA

### 2.4.1 Dinamômetros

É um equipamento capaz de medir a potência de um motor, o dispositivo mais antigo para realizar este trabalho é o freio de Prony onde o motor a ser testado aciona um volante que é envolto sobre uma cinta que transmite o esforço a uma balança, hoje os dinamômetros hidráulicos vêm se sobressaindo devido a sua versatilidade (PEREIRA, 1999).

Dinamômetro de correntes de Foucault é constituído por um rotor acionado pela máquina a ser testada, esse rotor é imerso em um campo magnético controlado através de uma bobina alimentada por corrente contínua, podendo assim variar a carga aplicada ao motor, são utilizados geralmente em aplicações onde necessita de maior precisão (PEREIRA, 1999).

Segundo Pereira (1999), dinamômetro elétrico é um gerador elétrico acionado pelo motor a ser testado, gerando energia elétrica que será consumido por uma carga variável, possui um custo elevado e só se justifica em casos especiais.

Dinamômetro de ventilação, segundo Pereira (1999), utiliza um ventilador acionado pelo motor a ser testado, a variação da carga é possível ao alterar ângulo, diâmetro ou o tamanho das pás, embora seja um equipamento de baixo custo é pouco utilizado.

## 2.5 MÉTODOS DE MANUTENÇÃO

O estator está sujeito a vários agentes danosos, aplicação errada, contaminação e surtos, esses agentes ocasionam problemas que por consequência geram a necessidade do rebobinamento.

Em motores mais novos o fabricante disponibiliza os dados de bobinagem para que possa ser recuperado esse motor com os valores originais, as informações são a bitola do fio, quantidade de espiras, resistência ôhmica da bobina, classe de isolamento, corrente nominal, tensões de operação (Figura 10, lado direito). Quando estes valores não estão disponíveis, o bobinador coleta a bitola do cabo, quantidade de expiras, diâmetro do estator, tensão de operação e calcula a potência do motor (Figura 10, lado esquerdo).

**Figura 10 - Estator bobinado manualmente e máquina de bobina automatizada**



Fonte: Autoria própria<sup>2</sup>.

Impregnação do motor é um dos passos mais importantes na recuperação de um bobinado, ela tem como objetivo principal preencher os espaços vazios entre os fios do estatores e rotores bobinados realizando a isolamento e garantindo a rigidez mecânica do bobinado evitando que ele se solte por vibração, o verniz é o agente utilizado para realizar esta tarefa, pois é um material líquido e penetra facilmente no estator.

Pelo menos três técnicas são utilizadas para realizar esta tarefa, o método por gotejamento, indicado na Figura 11, o operador derrama o verniz com uma

---

<sup>2</sup> Figura da direita trata-se de imagem de material publicitário disponível em: <<http://portuguese.armaturewindingmachine.com/>>, acesso em: 17 jan. 2020.



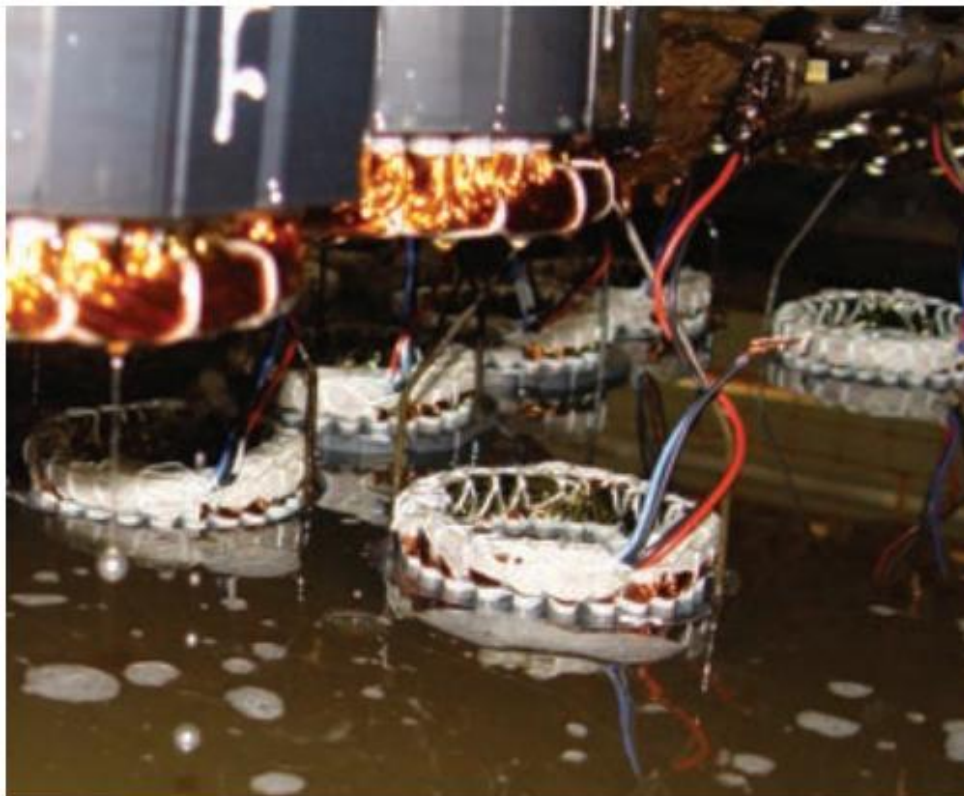
mangueira por todo estator por um tempo, a qualidade deste trabalho depende muito da experiência e capricho do bobinador, pois nada pode garantir a uniformidade e que a quantidade de verniz despejada sobre o estator foi o suficiente para a adequada isolação e também rigidez mecânica da bobina. Outro método é por imersão, conforme Figura 12, onde o estator é mergulhado em um tanque, visualmente é possível verificar o oxigênio sendo expulso do tanque ao constatar o aparecimento de bolhas que em seguida vão sumindo conforme o verniz penetra na bobina e preenche os espaços vazios do estator, este processo garante uma condição técnica melhor do que o método por gotejamento. O método mais profissional é conhecido como sistema vácuo pressão ou V.I.P, mostrado na Figura 13, este método é utilizado em motores de alta tensão, transformadores e geradores, e consiste em colocar o motor em um autoclave e em seguida o tanque é inundado com o verniz impregnante até cobrir totalmente a peça e mantido sob vácuo para eliminar todo ar e umidade da bobina, a peça é retirada e drenada e em seguida comum as outras duas formas de impregnação, o estator é posto em uma estufa onde ocorrerá a cura do verniz.

**Figura 11 - Sistema de impregnação por gotejamento indicando o bico aplicador de resina**



Fonte: Furtado (2016, p. 17).

Figura 12 - Exemplo de um tanque de imersão (impregnação por imersão)



Fonte: WEG (2018, p. 17).

Figura 13 - Auto clave para impregnação a vácuo



Fonte: Autoria própria<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Fonte: **Autoclave para impregnação de Motores**. Material publicitário disponível em: <<http://www.indumaquina.com.br/vpi-impregnacao-de-motores.html>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

## 2.6 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Inversor de frequência é um equipamento eletrônico destinado ao controle de motores elétricos trifásicos, extremamente difundidos sua aplicação na indústria, também vem sendo utilizado no comércio e residências.

Devido aos problemas relacionados a torque gerados pela variação da frequência, foi sendo empregadas novas tecnologias como controles, Escalar, Vetorial, VVW, Vetorial com encoder, isso tudo para melhorar o desempenho principalmente em baixas frequências. No que tange a proteção do motor os inversores praticamente resolvem os problemas, variação de tensão, falta de fase, sobrecarga, curto-circuito, fuga a terra, esta capacidade de proteção mudou completamente a aplicação dos motores elétricos reduzindo drasticamente a manutenção deles.

Na Equação (1) tem-se a fórmula para cálculo da rotação de motores trifásicos, nela pode-se verificar as duas componentes que fazem com que o motor varie sua rotação, são elas a frequência e a polaridade “f” e “p” respectivamente, como a polaridade é fixa a única opção de controle é a variação da frequência.

$$n = 120xf(1 - s)/p \quad (1)$$

Onde:

n	velocidade em rotação por minute (RPM)
f	frequência em rede (Hz)
s	escorregamento
p	número de pólos

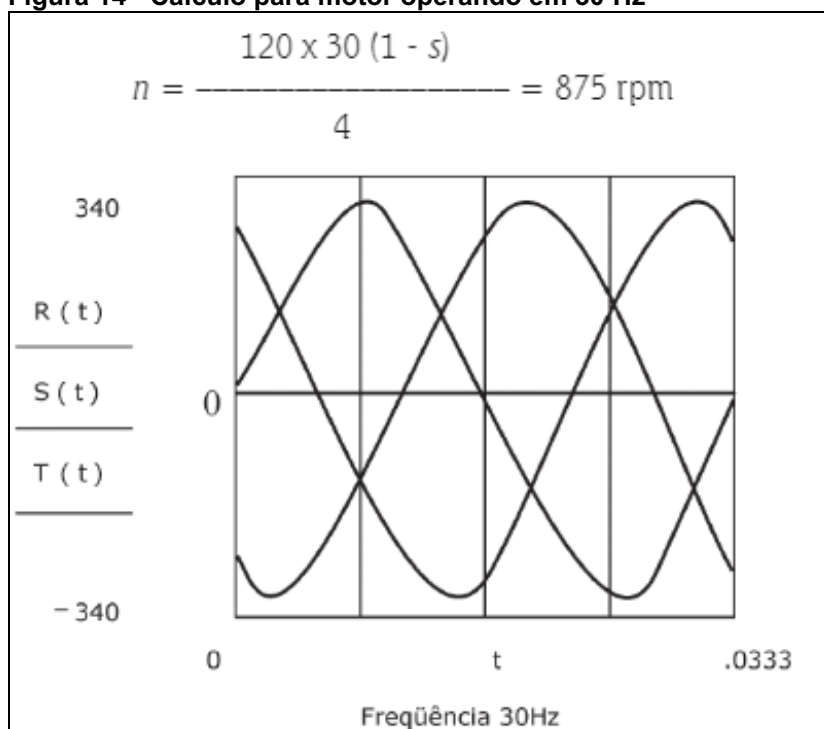
Para ilustrar melhor a variação da frequência da tensão, seguem abaixo alguns exemplos retirados do manual da WEG “Guia de aplicação de Inversores de frequência”, onde é possível visualizar claramente o efeito da frequência na rotação.

No caso de um motor 4 pólos em 60 Hz com um escorregamento  $s=0,0278$  o valor da rotação do motor é o indicado no cálculo da Equação (2), este é o padrão de fábrica.

$$n = \frac{120 \times 60 (1 - 0,0278)}{4} = 1750 \text{ rpm} \quad (2)$$

Na condição a seguir da Figura 14 pode-se verificar o motor trabalhando com uma frequência de 30 Hz, mesmo número de pólos, porém com uma rotação menor, e com o gráfico da senóide da frequência da tensão.

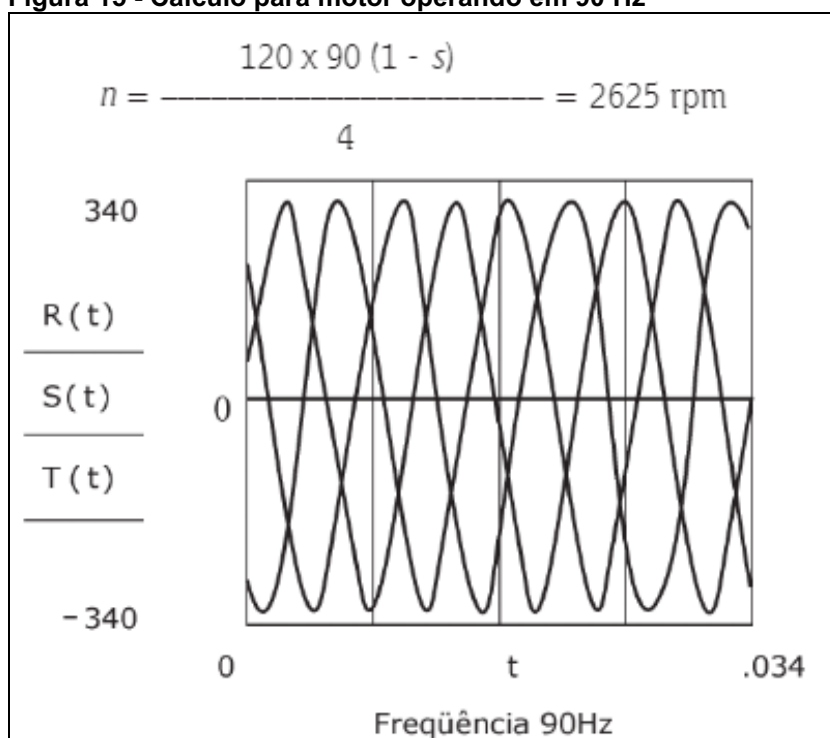
**Figura 14 - Cálculo para motor operando em 30 Hz**



Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 50).

No último exemplo da Figura 15 pode-se ver a mudança na variação da frequência, quando observa-se o gráfico, de 30 Hz ela pula para 90 Hz e por consequência a rotação do motor também se eleva.

**Figura 15 - Cálculo para motor operando em 90 Hz**



Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 50).

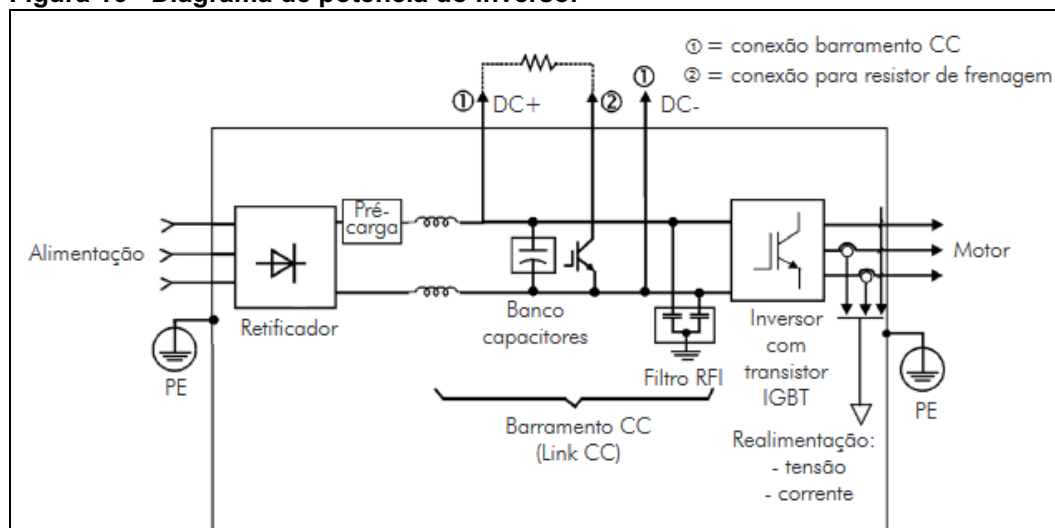
Essa tecnologia é de fundamental importância para a indústria, com a possibilidade do controle do motor os ajustes ficaram mais finos, hoje pode-se aplicar o controle P.I.D por exemplo muito importante para estabilizar, balancear e garantir uniformidade no processo, também pode-se substituir em muitos casos o motor em corrente contínua por o corrente alternada, pois os inversores de hoje garantem torque e estabilidade mesmo em baixas frequências, aplicações de dosagem, controle de vazão e pressão, em fim, ela viabiliza o avanço e melhoria em muitas aplicações.

## 2.7 DIAGRAMA DE UM INVERSOR

Neste item e no posterior será feita uma abordagem dos pontos específicos do inversor que vão ser utilizados para a realização do nosso trabalho, no diagrama da Figura 16 pode-se ter uma visão macro da estrutura de potência de um inversor de frequência.

A Figura 16 apresenta o circuito de potência do inversor, onde a tensão que é captada da fonte de alimentação entra no equipamento, passa pelo retificador trifásico, que por sua vez transforma em uma tensão contínua, em seguida é filtrada pelas indutâncias, capacitores e filtro RFI até chegar nos IGBTs que são responsáveis por chavear esta tensão e por consequência modular a frequência desta tensão, onde a resultante é uma forma de onda conforme pode-se verificar novamente na Figura 16.

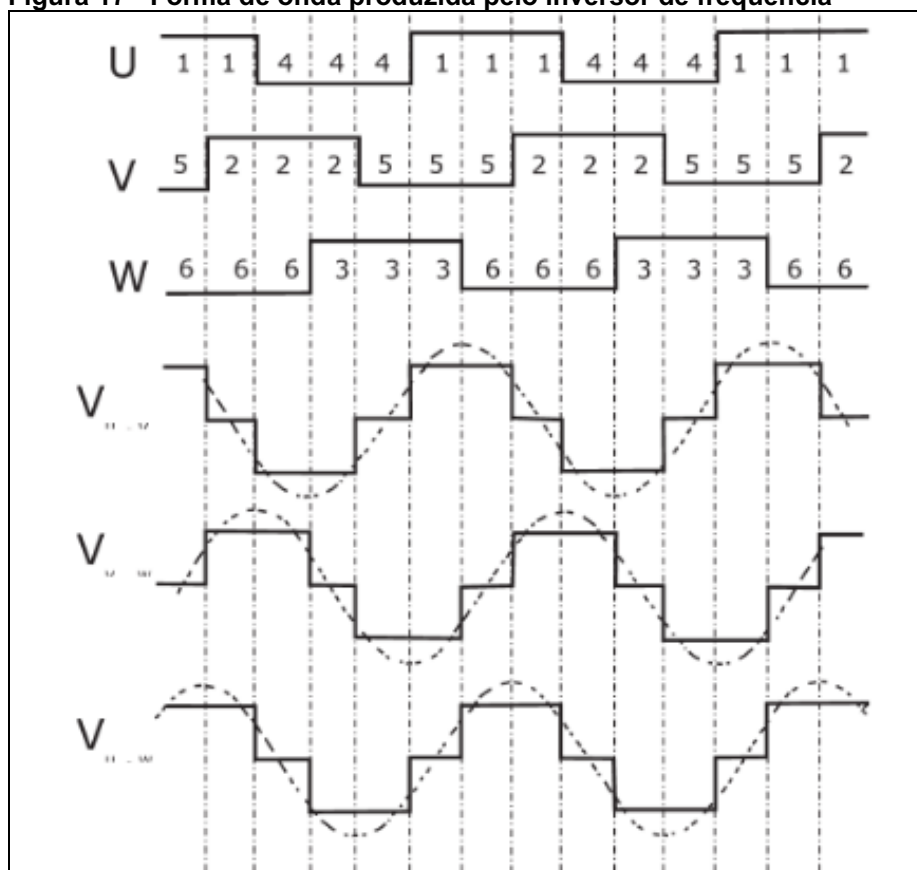
**Figura 16 - Diagrama de potência do inversor**



Fonte: CFW-11 (2016, p. 3-2).

A Figura 17 mostra a atuação dos IGBTs eles modulam combinando a abertura e fechamento das chaves 1, 2, 3, 4, 5 e 6, com isso é produzido uma forma de onda quadrada vista no risco contínuo, para exemplificar melhor a aproximação da tensão gerada em relação a uma senóide pura a linha tracejada é lançada sobre a linha contínua gerada pelo inversor.

**Figura 17 - Forma de onda produzida pelo inversor de frequência**



Fonte: Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 53).

A frequência em que é combinada a abertura e fechamento destas chaves é que fazem com que se controle a frequência da tensão, por consequência a velocidade do motor.

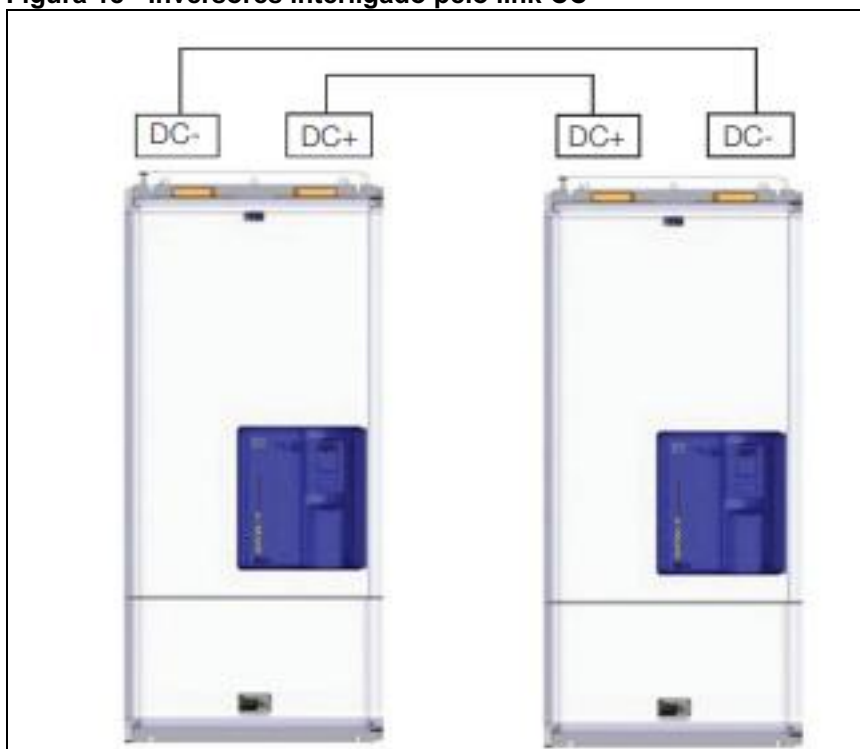
Outro ponto importante abordado é a questão do link CC do inversor, apresentado na Figura 18, pode-se verificar que nos pontos destacados como 1 e 2 tem-se o link CC, este link trabalha da seguinte maneira.

Quando o motor está sendo arrastado ou em uma condição de frenagem, ele se torna um gerador, isso se deve ao fato de que o estator está energizado, ou seja, é um campo magnético e neste momento é induzido uma tensão neste campo ao movimentar o rotor, pelas leis de Faraday eu estou movimentando um condutor em

um campo magnético gerando uma tensão em seus terminais, isto vai acontecer a todo o momento em nossa bancada, pois o motor a ser testado vai arrastar o motor que vai funcionar como carga.

A tensão gerada pelo motor retorna ao inversor, este por sua vez possui o banco de capacitores que absorve esta energia, porém o seu controle eletrônico monitora o valor desta tensão, ao atingir um valor prejudicial ao circuito, um dispositivo é acionado direcionando esta tensão para uma fonte consumidora externa, que na grande maioria trata-se de um resistor de frenagem, destaca-se esta operação do inversor para indicar que é possível aproveitar esta energia que é enviada ao resistor para alimentar o inversor conforme Figura 18, através do link CC, desta maneira diminuir o consumo de energia da rede.

**Figura 18 - Inversores interligado pelo link CC**



Fonte: WEG (2017, p. 3-25).

## 2.8 LÓGICA DE CONTROLE

Para um conhecimento maior sobre o equipamento, serão abordados alguns pontos específicos do inversor de frequência, entradas digitais, entradas e saídas analógicas, controle de torque, software WLP e software SuperDrive, eles serão a base para realizar o controle dos motores e também a coleta dos dados e projeção

em gráficos que possibilitaram a visualização das curvas de carga do motor e consumo.

## 2.9 ENTRADAS E SAÍDAS DIGITAIS

São meios de controlar/monitorar o inversor através de sinais digitais 0 ou 1, dependendo do sinal da fonte do inversor pode ser 0V no estado 0 ou 24Vcc/5Vcc no estado 1, ao perceber a mudança do estado da tensão o cartão de controle do inversor entende que ele deve executar a função para que aquela entrada digital foi programada.

## 2.10 ENTRADAS E SAÍDAS ANALÓGICAS

É um método de controle do inversor de frequência através de sinais eletrônicos analógicos, estes sinais podem ser de tensão (0...10Vcc) ou de corrente (0...20mA ou 4...20mA) muito utilizado para controle de velocidade e também indicação de valores como tensão, corrente, torque.

## 2.11 CONTROLE DE TORQUE

Franchi (2009) relata em seu livro dedicado a inversores de frequência, que torque é o produto da força tangencial F, da circunferência de uma roda, e o raio do centro desta roda, sendo que o torque pode ser positivo ou negativo dependendo da direção da rotação, a unidade mais comum de ser utilizado para representar esta grandeza é o Newton-metro (Nm).

Ainda Franchi (2009) relata a potência como sendo a taxa na qual o trabalho é realizado por uma máquina, potência é expressa pela unidade (W) referindo-se a Watt. A potência nos casos dos motores pode ser relacionada com o torque como mostra a Equação (3).

$$Potência(W) = Torque(N.m) \times Velocidade(RPM)/9550 \quad (3)$$

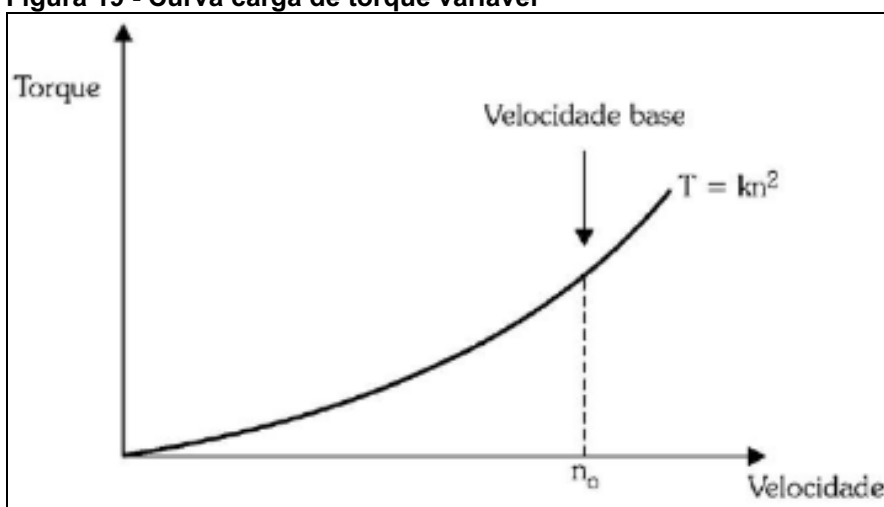
Entendido o que é torque agora o importante saber que as cargas possuem diferentes tipos de torque, e que simular o torque da carga é o principal objetivo



deste trabalho, por isso será exemplificado os tipos de carga e as condições de torque impostas por elas, simulando a carga linear e a constante.

Carga de torque variável tem como característica a variação de torque em toda a faixa de regulação de velocidade conforme Figura 19, como exemplos pode-se citar bombas centrífugas e ventiladores que aumentam sua carga conforme aumenta a velocidade.

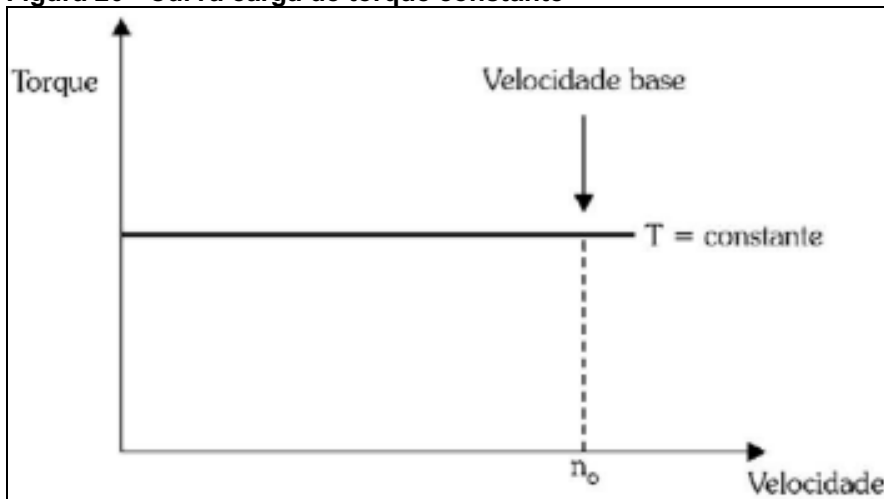
**Figura 19 - Curva carga de torque variável**



Fonte: Franchi (2009, p. 144).

Cargas constantes indicadas na Figura 20 podem ser encontradas em esteiras transportadoras, por exemplo, e se caracterizam por exigir do motor torque na partida e a plena carga no mesmo nível, porém na prática o torque pode ser bem maior na partida devido à necessidade de vencer a inércia da carga.

**Figura 20 - Curva carga de torque constante**



Fonte: Franchi (2009, p. 145).

## 2.12 AQUISIÇÃO DO VALOR DE TORQUE

O funcionamento do motor está baseado nos estudos de Faraday e a força eletromotriz, esta força eletromotriz é a razão entre a variação do fluxo no tempo, como mostra a Equação (4).

$$\varepsilon = \Delta\Phi\beta/\Delta t \quad (4)$$

Em seus estudos Faraday percebeu que quanto maior a variação de fluxo magnético maior a força eletromotriz.

No caso dos motores o fluxo magnético vai agir sobre as bobinas, e o fluxo magnético total será a soma das espiras contidas na bobina, então quanto maior o número de espiras maior a força eletromotriz gerada no estator, como mostra a Equação (5).

$$\varepsilon = -N(\Delta\Phi\beta/\Delta t) \quad (5)$$

Para auxílio na compreensão será analisado um caso apresentado pela WEG em seu “Guia de Aplicação de Inversores de Frequência” (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p. 28), sobre a geração do torque e posteriormente a medição do mesmo.

Considerando um motor elétrico com um escorregamento, diferença de velocidade do campo girante do estator e do rotor, em 50 RPM, o estator gira a 3600 RPM e o rotor a 3550 RPM, assim as linhas de indução do estator cortarão as espiras do rotor a uma velocidade de 50 RPM, produzindo uma tensão e uma corrente induzida no rotor. A interação entre os dois campos magnéticos, a do estator e o do rotor, produzirão uma força, que por sua vez vai impor torque no eixo do motor.

Com isso, se a carga no eixo do motor aumenta, a velocidade do rotor tenderá a diminuir e o escorregamento aumentará. Se o escorregamento aumenta a velocidade com que as linhas de indução do campo magnético do rotor “cortam” o estator aumentará, aumentando também a tensão e corrente induzida no rotor. Se a corrente é maior, o campo magnético gerado por esta também será maior, aumentando assim o torque disponível no eixo do motor, chegando a uma condição de equilíbrio.

Sendo assim, os inversores de frequência utilizam a corrente do estator e o fluxo magnético do estator para realizar o cálculo de torque do motor.

Em um estudo realizado pela empresa HBM, uma das líderes mundiais em tecnologia para produção de células de carga, a mesma concluiu que o torque calculado pelos inversores de frequência pode ser utilizado como medição redundante complementando o sinal do transdutor de torque de alta precisão (HBM, 2013).

“Este artigo apresenta as medições em um motor de indução CA alimentado por inversor. Os valores de fase medidos são convertidos na chamada grandeza vetorial espacial para **facilitar a análise** dos resultados das medições. O fluxo magnético no motor de indução CA alimentados por inversor é calculado através da integração da tensão do estator. Estas grandezas medidas eletricamente combinadas com as grandezas magnéticas calculadas permitem que o momento do motor de indução CA alimentado por inversor possa ser calculado. Este cálculo de torque fornece um sinal de medição redundante complementando o sinal do transdutor de torque de alta precisão. O valor do torque calculado permite realizar uma verificação de plausibilidade da medida e identificar rapidamente os erros de medição.” (HBM, 2013)

O mesmo estudo afirma que a precisão do torque calculado depende também do modelo de cálculo utilizado e da precisão dos parâmetros do motor.

A WEG realça essa necessidade em seu guia de aplicação de inversores: q

“Para calcular estas correntes é necessário resolver em “tempo real” uma equação que representa matematicamente o comportamento do motor de indução (modelo matemático do motor). Tempo real significa que este cálculo tem que ser feito muitas vezes por segundo, tantas vezes quanto necessário para poder controlar o motor. É por isto que este tipo de controle requer microprocessadores potentes que realizam milhares de operações matemáticas por segundo.” (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2014, p. 59).

Segundo Mascheroni, Lichtblau e Gerardi (2014, p. 59), para a realização deste cálculo, é necessário conhecer ou calcular os seguintes parâmetros do motor:

- Resistência do estator;
- Resistência do rotor;
- Indutância do estator;
- Indutância do rotor;
- Indutância de magnetização.

Na bancada para ter o controle do torque, o inversor vai trabalhar em modo vetorial a faixa de controle de torque é de 10% a 180% a precisão é de +/- 10% do torque nominal, sendo que a frequência mínima de operação é 3 Hz.

Os gráficos de carga gerados pelo software WEG SuperDrive indicarão o torque em %, para analisar os resultados de uma forma mais clara, utiliza-se a Equação (6) (referenciada no item 2.10) e para cada gráfico será indicada a carga em Newton-metro (Nm).

$$Potência(W) = Torque(N.m) \times Velocidade(RPM)/9550 \quad (6)$$

Já os inversores de frequência WEG utilizam as Equações (7) para calcular o torque no eixo e apresentar o dado em porcentagem no parâmetro P0009 (Torque no motor).

$$P0009 = (Tm \times 100 / Itm) \times Y$$

$$Itm = \frac{\left( P0401^2 - \left( \frac{P0410 \times P0178}{100} \right)^2 \right)^{0,5}}{}$$

$$Y = 1 \text{ para } N \leq P0190 \times Nnom / P0400$$

$$Y = \left( \frac{Nnom}{N} \right) \times \left( \frac{P0190}{P0400} \right) \text{ para } N > \frac{P0190 \times Nnom}{P0400} \quad (7)$$

Onde:

Nnom	Velocidade síncrono do motor
N	Velocidade atual do motor
Tm	Corrente de torque do motor
Itm	Corrente de torque nominal do motor

Na Tabela 2 tem-se os parâmetros que o inversor utiliza para realizar o cálculo do torque, dos parâmetros listado o P0178 (Fluxo nominal) e o P0410 (Corrente de Magnetização) são valores que o inversor coleta diretamente do motor e com isso calcula o torque de maneira dinâmica, os demais parâmetros são inseridos pelo programador do inversor, exceto o P0009 que é um parâmetro de leitura e indica em tempo real o torque em porcentagem.

**Tabela 2 - Parâmetros utilizados**

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
P0003	Corrente do motor
P0007	Tensão de saída
P0009	Torque no motor
P0010	Potência de saída
P0169	Referência de torque
P0178	Fluxo nominal
P0190	Tensão de saída máxima
P0400	Tensão nominal do motor
P0401	Corrente nominal do motor
P0410	Corrente de Magnetização

**Fonte: A autoria própria.**

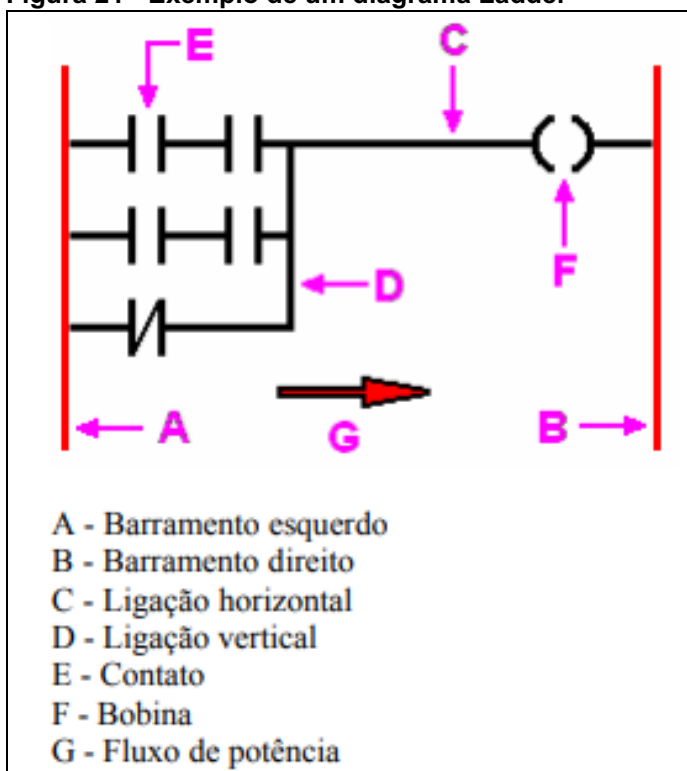
### 2.13 SOFTWARE WLP

O WEG Ladder Programmer (WLP) é um software para ambiente windows com a programação em linguagem Ladder, ele permite a integração com o software SOFT PLC do inversor.

Diagrama Ladder é uma representação gráfica de equações booleanas, combinando contatos (argumentos de entrada) com bobinas (resultados de saída). Este software traz para dentro do inversor a função de um CLP, diminuindo os custos e também simplificando significativamente os projetos.

A Figura 21 ilustra o ambiente de programação do WLP, onde o barramento esquerdo e direito delimitam a área de desenvolvimento da lógica, as ligações horizontais e verticais permitem a conexão entre os contatos e bobinas. Os contatos representam os sinais das entradas digitais ou também de uma memória interna ou até mesmo de um temporizador, por exemplo, da mesma maneira as bobinas podem representar uma saída digital ou alguma variável interna do programa, o fluxo de potência indica o sentido da leitura do scan do programa, que sempre é feita da esquerda para direita.

Figura 21 - Exemplo de um diagrama Ladder



Fonte: WLP (2009, p. 12).

## 2.14 SOFTWARE SUPERDRIVE

O software “SuperDrive” é uma ferramenta que possibilita visualizar, manipular e alterar dados do inversor de frequência, estes dados podem ser recuperados, alterados e salvos em pastas de trabalho e será utilizado em nossos testes para monitorar graficamente as variáveis necessárias para as conclusões do nosso estudo.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Para validar a viabilidade técnica da bancada de testes, foi montado um protótipo que possibilite aplicar ao motor duas formas de torque, um torque de característica constante e outro linear.

A imposição do torque será feita por uma lógica de comando desenvolvida em diagrama Ladder e salva no CLP embarcado no inversor de frequência. O torque que vai agir sobre o motor a ser testado é exercido pelo motor gerador, é neste motor que a lógica de controle vai atuar. Para isto ocorrer, o inversor vai ser parametrizado em modo vetorial, neste modo o inversor divide a corrente do motor em duas componentes: 1) Corrente direta, “ $I_d$ ” (orientada com o fluxo eletromagnético do motor); e 2) Corrente de quadratura, “ $I_q$ ” (perpendicular ao vetor de fluxo do motor).

A corrente direta “ $I_d$ ” está relacionada diretamente ao fluxo magnético do motor, enquanto que a corrente de quadratura “ $I_q$ ” está relacionada ao torque eletromagnético produzido no eixo do motor. O controle do motor é feito impondo estas duas correntes desejadas e comparando-as com os valores reais. Desta maneira pode-se atribuir torque no eixo do motor de modo preciso através do parâmetro P0169 (Referência de torque) que controla a corrente “ $I_q$ ”.

O parâmetro P0169 merece destaque, pois ele é o responsável por viabilizar o desenvolvimento do trabalho, sua função é limitar ou controlar a corrente do motor que produz torque horário. O seu ajuste leva em consideração a corrente nominal do motor que indicada no parâmetro P0401 (Corrente nominal do motor).

As grandezas elétricas e mecânicas necessárias para validação dos ensaios serão disponibilizadas pelo inversor de frequência, ou seja, não será feito o uso de voltímetros, amperímetros, wattímetros, tacômetro e célula de carga para aquisição de dados, por isso é importante entender como o inversor processa estas informações e disponibiliza em seus parâmetros de visualização no software “SuperDrive”. São eles:

- Tensão de saída do motor é indicada em Volts (V) e visualizada no parâmetro P0007 (Tensão de saída).
- Corrente do motor é disponibilizada no parâmetro P0003 (Corrente do motor) é coletada na saída do inversor e enviada por um transformador de corrente

tipo HALL que registra um valor efetivo real da corrente.

- A rotação em RPM é indicada no parâmetro P0002, ela se baseia no parâmetro P0402 (Rotação nominal do motor) velocidade de placa do motor e pela frequência de saída indica o valor real.
- A potência de saída do motor é indicada no parâmetro P0010 (Potência de saída), seu valor é obtido através da multiplicação da corrente de saída P0003 (Corrente do motor), tensão de saída P0007 (Tensão de saída) e cosseno phi P0011.
- O torque disponível no parâmetro P0009 (Torque no motor) é indicado na fórmula descrita no item 2.12 deste trabalho e relaciona a velocidade síncrona do motor, velocidade atual do motor, corrente de torque do motor e corrente de torque nominal do motor.

Para monitorar e principalmente coletar as grandezas indicadas acima, será utilizado o software SuperDrive, dedicado a trabalhar com o inversor de frequência através de uma conexão USB com um computador.

A bancada está ilustrada na Figura 22 e foi montada da seguinte maneira: 1) Motor trifásico SIEMENS 1 CV, 4 Pólos, 3.46 A, 1715 RPM, 220/380V; 2) Motor trifásico WEG 0.75 CV, 6 Pólos, 1130 RPM, 3.08 A, 220/380V; 3) Inversor de frequência WEG CFW-11 V3.02 200 - 240 V 7A / 7A; 4) Inversor de frequência WEG CFW700 220-240 V 7A; 5) Acoplamento elástico; e 6) Disjuntor motor para proteção do circuito de alimentação.

**Figura 22 - Foto da bancada**



Fonte: Autoria própria.



Por questões operacionais e até mesmo de disponibilidade de equipamentos, a potência máxima dos motores utilizados ficou limitada em 1 CV, os testes com motores de maior potência e também com uma diferença maior entre a potência do gerador e do motor testado nos permitiriam visualizar a evolução das grandezas com um range maior, porém seria necessário um bancada mecanicamente mais robusta para suportar a carga nela imposta. Além dos motores utiliza-se dois inversores para controle e acionamento individual dos motores, e um disjuntor motor para proteção e seccionamento do circuito de alimentação dos inversores.

Além dos equipamentos indicados na Figura 22 também foram utilizados: a) Software SuperDrive G2 versão 15.1; e b) Software WLP versão 11.00.

### 3.1 AJUSTES DA BANCADA PARA TESTES

Foi definido o motor WEG (item 2 na Figura 22) como sendo o gerador de carga, pois apesar de possuir uma potência menor que o SIEMENS (item 1 na Figura 22), ele tem o torque nominal de 4,65 Nm contra 4,17 Nm do outro motor número 1, na prática ele consegue impor uma carga com mais facilidade ao motor a ser testado.

Definido a ordem operacional da bancada, foram ajustados os parâmetros de programação no inversor CFW700 (CFW700, 2018) e no CFW-11 (CFW-11, 2016) e constam nas Tabelas 3 e 4. Nestas tabelas constam os principais parâmetros aplicados aos inversores (CFW700, 2018; CFW-11, 2016), alguns deles são coletados automaticamente pelo inversor e os demais são inseridos pelo programador buscando o melhor desempenho do conjunto motor e inversor.

**Tabela 3 - Parâmetros do inversor de frequência CFW700**

(continua)

<b>Parâmetro</b>	<b>Ajuste do Usuário</b>
P0121 Referência de velocidade	1000 RPM
P0169 Referência de torque	Varia conforme lógica do WLP.
P0202 Tipo de controle	Sensorles Vetorial
P0220 Seleção de fonte	Tecla local
P0221 Seleção de referência local	HMI
P0224 Seleção gira/para local	Tecla I, O
P0398 Fator de serviço	1.15
P0399 Rendimento nominal	66%
P0400 Tensão nominal do motor	220 V
P0401 Corrente nominal do motor	3,08 A
P0402 Rotação nominal do motor	1130 RPM
P0403 Frequência nominal do motor	60 Hz

**Tabela 3 - Parâmetros do inversor de frequência CFW700****(conclusão)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Ajuste do Usuário</b>
P0404 Potência nominal do motor	0.75CV
P0407 Fator de potência do motor	0,71
P0409 Resistência do estator	2,53 ohm
P0410 Corrente de magnetização	2,4 A
P0411 Indutância dispersão	16,9 mH
P0412 Constante Tr	0,068 s
P0413 Constante Tm	0,05 s

**Fonte: Autoria própria.****Tabela 4 - Parâmetros do inversor de frequência CFW-11**

<b>Parâmetro</b>	<b>Ajuste do Usuário</b>
P0121 Referência de velocidade	1200 RPM
P0169 Referência de torque	Padrão de fábrica 125%
P0202 Tipo de controle	Sensorles Vetorial
P0220 Seleção de fonte	Tecla local
P0221 Seleção de referência local	HMI
P0224 Seleção gira/para local	Tecla I, O
P0398 Fator de serviço	1.15
P0399 Rendimento nominal	66%
P0400 Tensão nominal do Motor	220 V
P0401 Corrente nominal do motor	3,4 A
P0402 Rotação nominal do motor	1715 RPM
P0403 Frequência nominal do motor	60 Hz
P0404 Potência nominal do motor	1 CV
P0407 Fator de potência do motor	0,67
P0409 Resistência do estator	2,705 ohm
P0410 Corrente de magnetização	2,4 A
P0411 Indutância dispersão	17,43 mH
P0412 Constante Tr	0,073 s
P0413 Constante Tm	0,05 s

**Fonte: Autoria própria.**

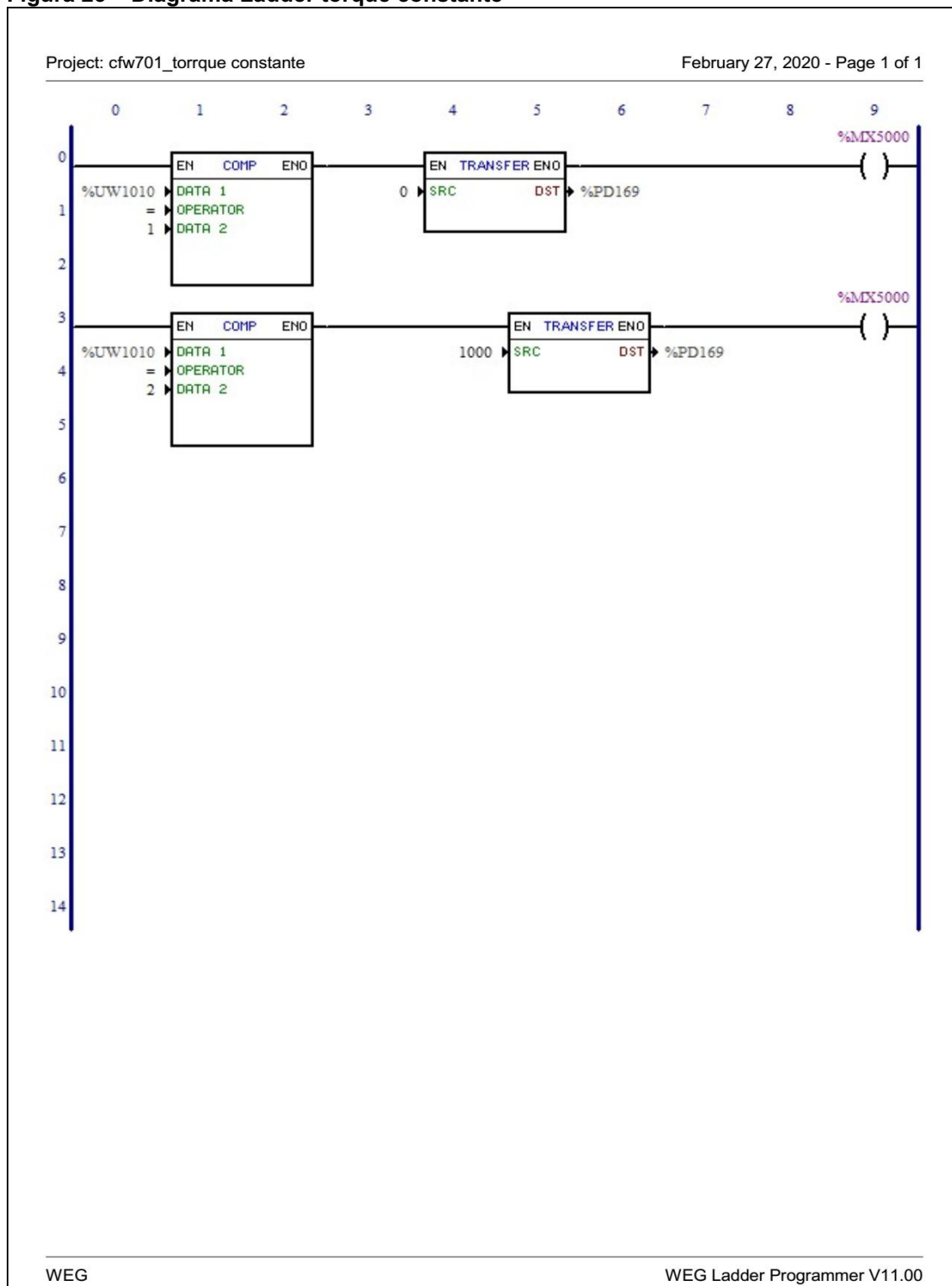
Durante a programação dos inversores foi selecionado o Auto Ajuste do inversor, com isso automaticamente o inversor estima alguns valores do motor que não constam na placa dele, como P0409 (Resistência do estator), P0410 (Corrente de Magnetização), P041 (Indutância dispersão), P0412 (Constante Tr) e P0413 (Constante Tm), esses valores são fundamentais no desempenho do inversor de frequência na função de controle de torque e do modo de operação vetorial.

O acionamento dos motores será feito de modo manual através da IHM dos inversores, a referência de velocidade dos inversores será fixa e foram ajustadas no parâmetro P0121 (Referência de velocidade), pode-se notar que há uma diferença de 200 RPM entre os dois motores, pois pretende-se com isso que o motor em teste arraste a carga.

### 3.1.1 Ajuste da Bancada para Ensaio em Torque Constante

Com os inversores devidamente ajustados, utiliza-se o software WLP para aplicar a lógica Ladder apresentada na Figura 23.

**Figura 23 – Diagrama Ladder torque constante**



Fonte: Autoria própria.

Usando o bloco de comparação “COMP” é habilitado a linha de comando que deseja operar, um bloco “TRANSFER” faz a transferência do torque desejado para o parâmetro P169 do inversor que controla o torque do motor e tem a função de gerador de carga.

Neste caso quando é inserido 1 no parâmetro do usuário P1010 o torque em P169 será 0%, no caso de inserir 2 em P1010 o torque inserido em P169 será 100%, desta maneira terá uma carga constante.

Parâmetros do usuário são alguns parâmetros disponíveis no inversor de frequência e que são utilizados em conjunto com o Soft PLC do inversor, possibilitando inserir valores que interferem na lógica de funcionamento do equipamento.

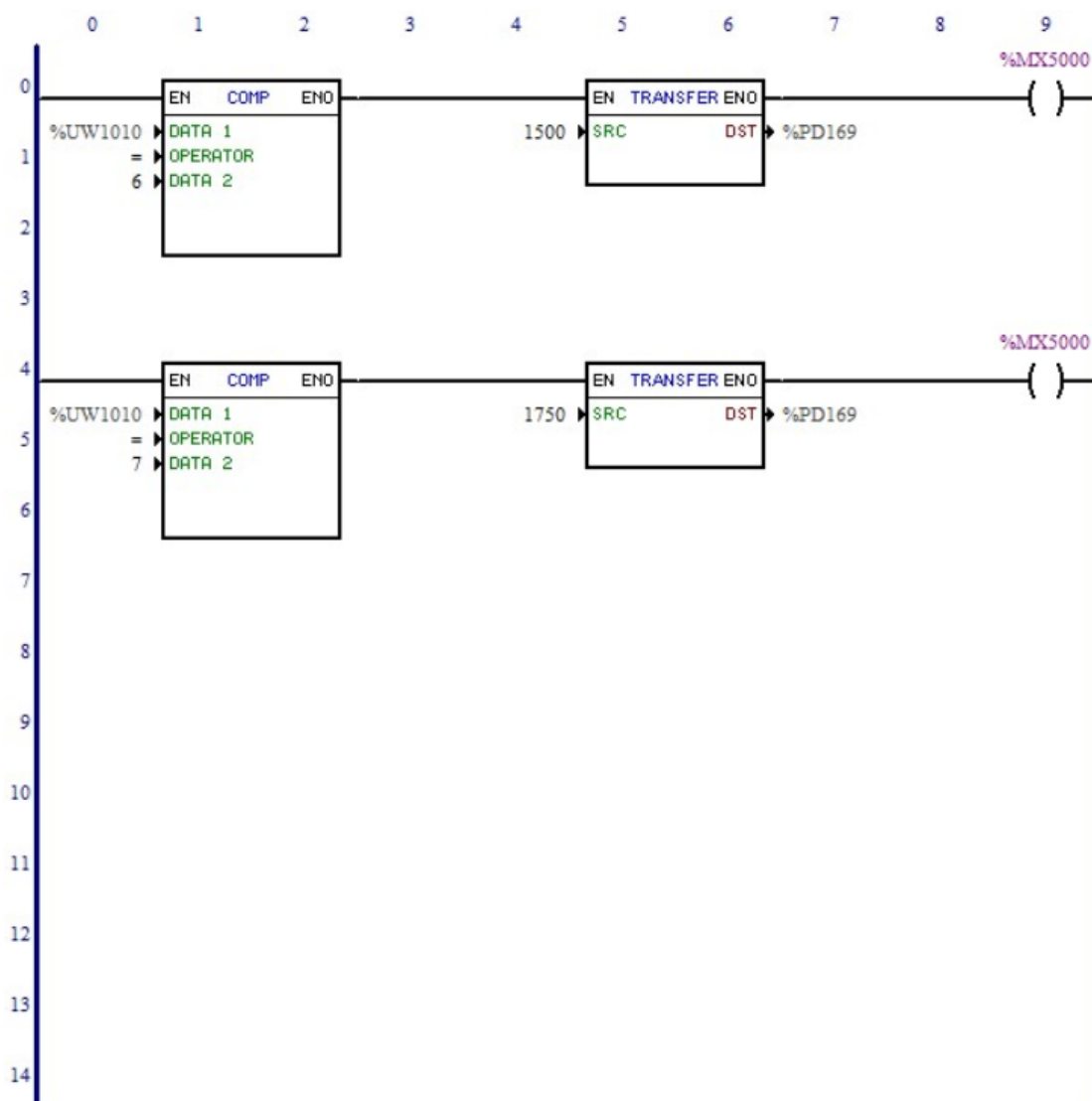
### 3.1.2 Ajuste da Bancada para Ensaio em Torque Linear

No modo linear, apresentado na Figura 24, o programa nos permite trabalhar com 7 valores de torque de 25% a 175%, utilizando o bloco comparador, na IHM através do parâmetro P1010 implementa-se valores de 1 a 7. Conforme o valor do parâmetro, a linha de comando é habilitada e como consequência o valor presente no bloco “TRANSFER” é salvo no parâmetro P0169 determinando a intensidade do torque no motor, realizando essa transferência de torque de modo escalonado o torque gerado no motor será uma curva com características linear.

Figura 24 - Diagrama Ladder torque linear

Project: cfw700

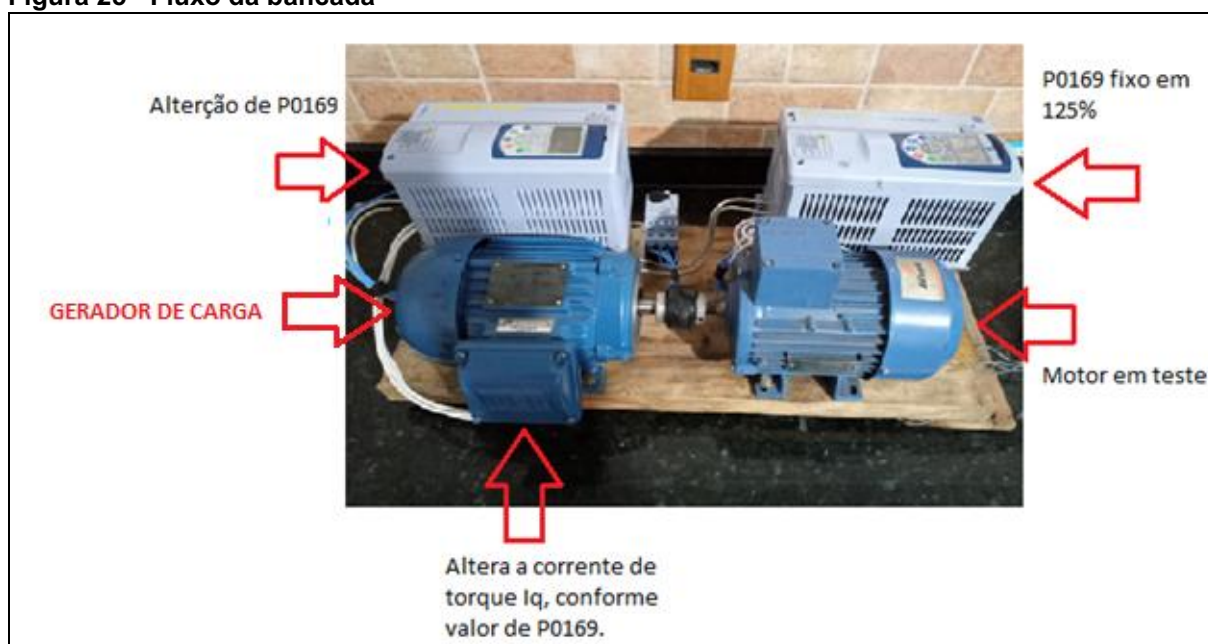
February 27, 2020 - Page 2 of 2



### 3.3 ENSAIOS COM CARGA

A Figura 25 orienta quanto ao funcionamento da banca, onde o motor a ser ensaiado é o motor SIEMENS e será submetido a dois tipos de carga, constante e linear. Para a carga constante dois pontos de leitura no teste serão coletados e para carga linear seis pontos com carga.

**Figura 25 - Fluxo da bancada**



Fonte: Autoria própria.

O torque ajustado é imposto ao motor gerador de carga, e será controlada através do parâmetro P0169 (Referência de torque), impondo desta maneira uma carga ao motor testado.

O ensaio com torque constante gerou valores, apresentados na Tabela 5, através do software WLP.

**Tabela 5 - Valores coletados no teste com torque constante**

Gerador de Carga	Motor em Teste				
Teste Número	Velocidade RPM	Corrente A	Tensão V	Torque %	Potência kW
1. P0169=0%	1199	3.2	150	36.2	0.1
2. P0169=100%	1200	3.4	153	107	0.5

Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar que a velocidade em RPM e a corrente do motor ficaram estáveis, a rotação ela está fixa conforme determinado no parâmetro P0121 (Referência de velocidade) no valor de 1200 RPM, a corrente do motor tem pouca variação, pois motores de pequeno porte possuem uma corrente a vazio próxima da nominal. A tensão de saída do inversor está em 150V, o inversor modula está variável para controlar a potência fornecida, caso contrário o motor entraria em sobrecarga.

As variáveis torque e potência variam de maneira proporcional, o torque de 36.2% a 107% a potência de 0,1 kW a 0,5 kW adequadamente, pois são grandezas com variações diretas.

O valor máximo atingido de potência de saída foi 0.5 kW quando o objetivo era 0,75 kW que é valor de placa do motor, porém o inversor reduziu a tensão para 150V para evitar sobrecarga. Analisando o valor de corrente obtido condiz com a nominal do motor 3.4 A, caso a tensão de saída fosse 220V tem-se a potência nominal no teste, pois  $P = V \times I = 220 \times 3.4 = 748 \text{ W}$  ou 0,74 kW.

Durante os testes com carga, os valores da Tabela 6 foram coletados de maneira automática via software. A coleta automática do torque é apresentada pelo software na unidade de %, então utiliza-se a Tabela 6 para ilustrar os valores em Newton-metro (Nm).

**Tabela 6 - Torque em Nm em modo constante**

Teste Número	1	2
Torque Nm	0,47	2,38

Fonte: Autoria própria.

Para obter os valores em Nm utiliza-se cálculos das Equações (8) e (9) que usam como base a potência e rotação coletadas no teste.

Memorial de cálculo:  $P(kw) = \text{Torque (N.m)} \times \text{Velocidade (RPM)} / 9550$

- Teste número 1, P0169 igual 0%, potência 0,1 kW:

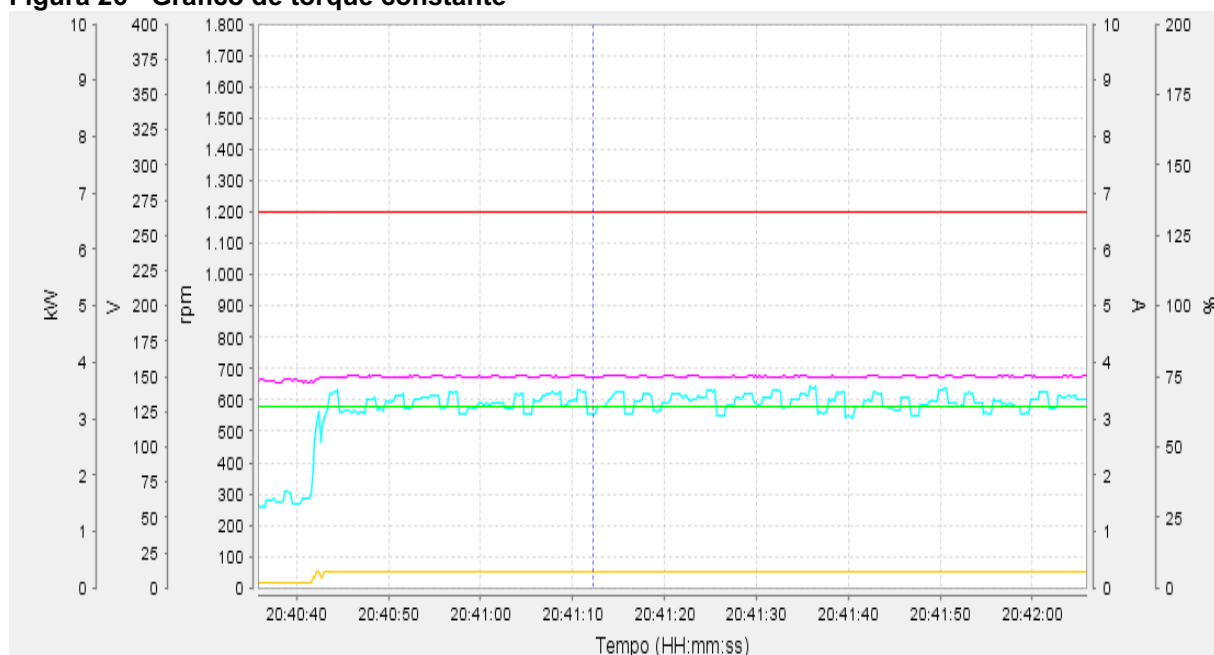
$$0,1 = Nm \times \frac{1999}{9550} \quad Nm = 0,47 \quad (8)$$

- Teste número 2, P0169 igual a 100% potência 0,5 kW:

$$0,5 = \frac{Nm \times 1999}{9550} \quad Nm = 2,38 \quad (9)$$

Para os valores indicados, novamente na Tabela 6, o software gerou o gráfico da Figura 26, retratando os comentários feitos anteriormente. As linhas vermelha e verde representando velocidade e corrente e se apresentam de maneira estável, torque e potência linha azul clara e amarela já se comportam de maneira bem semelhantes e tem uma variação alta em um tempo curto, acompanhando o momento em que se alterou o P0169 do gerador de carga passando de 0% para 100%.

**Figura 26 - Gráfico de torque constante**



Fonte: Autoria própria.

O ensaio com torque linear gerou valores, apresentados na Tabela 7, através do software WLP. Neste teste a quantidade de amostras foi maior, seis ao total, devido ao método empregado para gerar a curva, procedimento em que se aplica o torque em uma escala crescente para obter a carga com as características linear.

**Tabela 7 - Valores coletados no teste com torque linear**

Teste Número	Velocidade RPM	Corrente A	Tensão V	Torque %	Potência kW
1. P0169=25%	1199	3.2	147	37.9	0.1
2. P0169=50%	1198	3.2	147	44.2	0.2
3. P0169=75%	1198	3.2	148	55.7	0.2
4. P0169=100%	1199	3.2	151	68.2	0.3
5. P0169=125%	1198	3.3	151	80.5	0.4
6. P0169=150%	1198	3.4	153	106	0.5

Fonte: Autoria própria.



Novamente a velocidade em RPM e a corrente do motor ficaram estáveis, a rotação fixa conforme determinado no parâmetro P0121 (Referência de velocidade) no valor de 1200 RPM praticamente, a corrente do motor tem pouca variação devido a possuir à corrente a vazio próxima da nominal. A tensão de saída do inversor está em 150 V evitando sobrecarga.

As variáveis torque e potência mantiveram a variação diretamente proporcional, o torque de 37.9% a 106% a potência de 0,1 kW a 0,5 kW, mantendo as mesmas características elétricas.

Durante os testes com carga, os valores da Tabela 8 foram coletados de maneira automática via software na unidade de % e registrados na tabela com seus respectivos valores em Nm.

Na Tabela 8 apresenta os valores em Newton-metro (Nm), baseado nos valores de potência e velocidade coletadas em tempo real e representadas nas Equações (10) até (15).

**Tabela 8 - Torque em Nm em modo linear**

Teste Número	1	2	3	4	5	6
Torque Nm	0,47	0,95	0,95	1,43	1,91	2,38

Fonte: Autoria própria.

Memorial de cálculo:  $P(kw) = Torque (N.m) \times Velocidade (RPM) / 9550$

- Teste número 1, potência 0,1 kW:

$$0,1 = Nm \times \frac{1999}{9550} \quad Nm = 0,47 \quad (10)$$

- Teste número 2, potência 0,2 kW:

$$0,2 = \frac{Nm \times 1998}{9550} \quad Nm = 0,95 \quad (11)$$

- Teste número 3, potência 0,2 kW:

$$0,2 = \frac{Nm \times 1998}{9550} \quad Nm = 0,95 \quad (12)$$

- Teste número 4, potência 0,3 kW:

$$0,3 = \frac{Nm \times 1999}{9550} \quad Nm = 1,43 \quad (13)$$

- Teste número 5, potência 0,4 kW:

$$0,4 = \frac{Nm \times 1998}{9550} \quad Nm = 1,91 \quad (14)$$

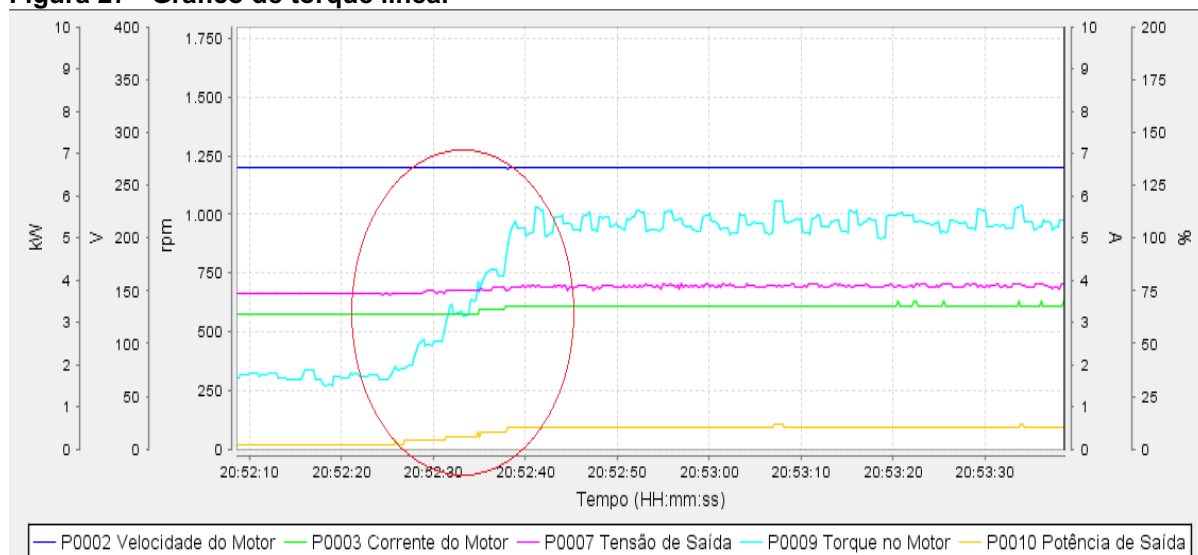
- Teste número 6, potência 0,5 kW:

$$0,5 = \frac{Nm \times 1998}{9550} \quad Nm = 2,38 \quad (15)$$

O gráfico, apresentado na Figura 27, em sua linha azul clara indica o comportamento do torque, ele possui uma característica mais alongada, com uma evolução mais suave em relação à curva do gráfico anterior, pois foram impostas seis variações de carga de 25, 50, 75, 100, 125 a 150%, essa característica escalar gerou um comportamento de subida do torque linear. Assim como no gráfico anterior a linha azul do torque aparece com um aspecto distorcido, isto se deve ao motor estar próximo da sua corrente nominal.

Velocidade e corrente novamente se mantiveram estáveis, a velocidade praticamente em condições nominais a corrente com uma faixa de variação bem reduzida, pois o motor já trabalha próximo da nominal e a potência sempre trabalhando de maneira diretamente proporcional ao torque.

**Figura 27 - Gráfico de torque linear**



**Fonte: Autoria própria.**

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou uma solução para a realização de testes com carga em motores de indução trifásicos que passaram por algum processo de manutenção.

O objetivo principal do projeto, exposto em seu título, é de verificar a eficiência com que foi realizada a rebobinagem do motor, porém para as demais intervenções também se mostra eficaz a bancada. A imposição de carga a um motor que está sendo testado também é eficiente quanto a verificações das condições mecânicas dele, ao impor carga pode-se analisar o comportamento dos mancais quanto a ruído e temperatura, por exemplo, isso utilizando os instrumentos adequados para coletar estas duas variáveis.

Foi proposto obter o torque do motor testado através da imposição de carga linear e constante, para avaliar a eficiência de seu rebobinamento. Os testes realizados mostraram que é possível a imposição de torque variável ao motor em teste, os valores disponibilizados em porcentagem pela bancada se mostraram muito confiáveis e de simples aquisição, pois faz a leitura pela corrente de torque do motor, uma variável interna processada pelo próprio motor. Equipamentos para aquisição de torque, posicionados no eixo do motor ou em pontos específicos da bancada, possuem um exatidão provavelmente maior que via inversor de frequência, porém os custos são bem maiores.

A possibilidade da coleta de corrente, potência, tensão e velocidade são grandezas elétricas essenciais para a tomada de decisão quanto à qualidade do motor que passou por manutenção.

Utilizando a informação do torque desenvolvido e as grandezas elétricas coletadas, aliados aos demais testes como tensão aplicada, resistência de bobinas, elevação de temperatura entre outras credenciam a bancada como uma ferramenta viável para a determinação da eficiência em que o motor foi rebobinado confirmando se está apto ou não a operar.

## 5 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para projetos futuros, é possível avançar na simulação de outros tipos de carga, trabalhar com um sistema em malha fechada onde seja possível ajustar os ganhos e controlar a injeção de torque de maneira mais estável. A utilização de motores com maior potência oferta um range maior para variação do torque, pois os motores de potência baixa já necessitam de um torque alto para a manutenção do seu funcionamento.

Outra possibilidade é o emprego de uma célula de carga acoplada ao eixo dos motores, para a comparação com os valores de torque emitidos pelo inversor de frequência, com isso pode-se verificar qual a precisão que tem-se ao fazer a leitura do torque pelo fluxo magnético do motor. A coleta de dados via software supervisorio dedicado à bancada permite tratar as informações coletadas e comparar com os dados do fabricante.

## REFERÊNCIAS

CFW-11. **Inversor de frequência**: CFW-11. Manual de programação, V5.8X. Copyright© 2020 WEG. Florianópolis, mai. 2016.

CFW700. **Inversor de frequência**: CFW700. Manual de programação, V2.2X. Florianópolis, out. 2018.

DEVITTE, Willian. **Desenvolvimento de um sistema para medir o conjugado de um motor de indução**. 2014. 100 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Engenharia de Controle e Automação, Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2012. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/handle/10737/433>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

DIEGOLI, Bruno Bueckmann; GAVLAKI, Daniel. **Termografia - aplicações além da manutenção elétrica**. Copyright© 2020 CIMM. Artigo publicado em: 21 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.industria40.ind.br/artigo/17360-termografia-aplicacoes-alem-da-manutencao-eletrica>>. Acesso em: 27 out. 2019.

FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de frequência: Teoria e aplicação**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.

FURTADO, Henrique Salvaro. **Supervisão e controle de um processo de impregnação de estatores para motores elétricos**. Projeto de fim de curso (monografia). Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/171492/OFC-20152-HenriqueSalvaroFurtado.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

HBM. **Calculando grandezas vetoriais espaciais e torque no entreferro de motores de indução CA alimentados por inversores usando Genesis HighSpeed e Software Perception**. Copyright© 2020 HBM. Página publicada em: 14 mai. 2013. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/4094/motores-de-inducao/>>. Acesso em: 17 fev. 2020.

MASCHERONI, José M.; LICHTBLAU, Marcos; GERARDI, Denise. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. WEG Automação. Florianópolis, 2014.

PEREIRA, José Claudio. **Dinamômetros hidráulicos**. Página pessoal do Eng. José Claudio Pereira. Material publicado na internet em: 04 abr. 1999. Disponível em: <<https://www.joseclaudio.eng.br/energia/dinos1>>. Acesso: 03 out. 2019.

REIS, Jucele. **Os motores de baixa tensão de alto rendimento no Brasil**. São Paulo: EM - Eletrônica Moderna, ano 47, n. 528, mar. 2018. Disponível em: <[http://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2018/05/20/moteres\\_de\\_baixa.htm](http://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2018/05/20/moteres_de_baixa.htm)>. Acesso em: 23 jan. 2020.

WEG. **Conversor regenerativo CFW-11 RB**: Manual do usuário. Copyright© 2020 WEG. Jaraguá do Sul, publicado em: jul. 2017. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h89/h2a/WEG-10004858482-14064574-r00-CFW11RB-manual-usuario-pt.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

WEG. **Motores elétricos**: Guia de especificação. Copyright© 2020 WEG. Jaraguá do Sul, publicado na internet em: 15 fev. 2018. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

WEG. **Manual geral de instalação, operação e manutenção de motores elétricos**. Copyright© 2020 WEG. Jaraguá do Sul, publicado na internet em: 05 ago. 2019a. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0c/h3b/WEG-iom-installation-operation-and-maintenance-manual-of-electric-motors-50033244-manual-pt-en-es-de-ro-bg-ru-web.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

WEG. **Danos em enrolamentos**: Motores monofásicos. Copyright© 2020 WEG. Jaraguá do Sul, publicado em: 19 ago. 2019b. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/hbf/WEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2020.

WLP. **Manual do software WLP - WEG Ladder Programmer**. V8.2X. Copyright© 2020 WEG. Jaraguá do Sul, publicado em: out. 2009.