

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle, Automação e Computação



Cristian Fernando Oecksler

Desenvolvimento de Sistema para Inspeção de Rigidez de
Rolamentos de Motores por Ensaio de Cargas Axiais

Blumenau

2020

Cristian Fernando Oecksler

**Desenvolvimento de Sistema para Inspeção de
Rigidez de Rolamentos de Motores por Ensaio de
Cargas Axiais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Dr. Ciro André Pitz

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle, Automação e Computação

Blumenau
2020

Cristian Fernando Oecksler

Desenvolvimento de Sistema para Inspeção de Rigidez de Rolamentos de Motores por Ensaio de Cargas Axiais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Ciro André Pitz
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador



Prof. Dr. Daniel Martins Lima
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Marcos Vinicius Matsuo
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 31 de janeiro de 2020

Dedico este trabalho aos meus pais, que deram apoio incondicional aos meus estudos e em minha vida. E aos entes queridos que não estão mais presentes fisicamente, mas que recebem todas minhas orações iluminando-me.

Agradecimentos

A Deus por proporcionar a mim e minha família, saúde para lutar pelos objetivos da vida.

À minha amável namorada, pais, irmã e demais familiares por todo o apoio, compreensão e incentivo em meus estudos, sem vocês não teria alcançado tantas conquistas.

Ao professor Dr. Ciro André Pitz, por todo o aprendizado transmitido na graduação e na orientação do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Centro de Blumenau por toda estrutura disponibilizada, aos professores que lecionaram e me orientaram nessa caminhada, meu profundo agradecimento pela dedicação e conhecimento transmitido.

À empresa WEG por acreditar em meu potencial e possibilitar tornar este trabalho realidade durante o estágio.

Aos amigos, por todos os momentos de parceria vivenciados na graduação.

*"Se a viagem não fosse desafiadora,
o destino não seria gratificante."
(Wilson Menger)*

Resumo

Neste trabalho, é desenvolvido um sistema de medição para inspecionar a rigidez de montagem dos rolamentos traseiros utilizados em motores de médio porte da empresa WEG Motores. Inicialmente são estudados os fundamentos sobre motores elétricos, arranjos de rolamentos e dispositivos de aquisição e geração de sinais utilizados no sistema. Na sequência, é proposto o sistema de medição que disponibiliza para o operador uma curva de força *versus* deslocamento. O sistema proposto é baseado na atuação hidráulica automatizada de esforços axiais mensurados por uma célula de carga na parte frontal do eixo do motor. Além da medição dos esforços axiais, também é realizada a medição do deslocamento absoluto através de sensores de deslocamento posicionados na parte traseira do eixo do motor onde os rolamentos estão dispostos. Ao longo do trabalho é apresentada a integração de *hardware* e o desenvolvimento de *software* em LabVIEW, os quais são realizados de acordo com o fluxo do processo de ensaio. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do sistema proposto para gerar as curvas requisitadas, permitindo assim que o operador forneça um diagnóstico preciso sobre o estado de funcionamento do rolamento sob análise.

Palavras-Chave: 1. Rigidez de Rolamento. 2. Ensaio de tração e compressão. 3. Instrumentação. 4. Controle de qualidade. 5. Sensoriamento.

Abstract

In this work, a measuring system is developed to inspect the mounting stiffness of the rear bearings used in medium-sized motors by WEG Motores company. Initially, the fundamentals of electric motors, bearing arrangements and signal acquisition and generation devices used in the system are studied. Next, the measurement system is proposed which provides to the operator a force versus displacement curve. The proposed system is based on the automated hydraulic actuation of axial forces measured by a load cell at the front of the motor shaft. In addition to axial forces measurement, absolute displacement is also measured using displacement sensors positioned at the rear of the motor shaft where the bearings are arranged. Hardware integration and software development in LabVIEW are also presented in this work, which are performed according to the testing process flow. The results confirm the effectiveness of the proposed system to generate the required curves, thus allowing the operator to provide an accurate diagnosis of the operating state of the bearing under analysis.

Keywords: 1. Bearing Stiffness. 2. Tensile and Compression Test. 3. Instrumentation. 4. Quality Control. 5. Sensing.

Lista de figuras

Figura 1 – Aspecto de um estator.	18
Figura 2 – Rotor do tipo gaiola de esquilo.	19
Figura 3 – Rotor bobinado com anéis coletores.	19
Figura 4 – Frequências, dimensões e ângulo de contato do rolamento.	20
Figura 5 – Componentes de um motor de indução.	21
Figura 6 – Rolamento de rolos cilíndricos	22
Figura 7 – Metade superior de um rolamento angular na vista radial em corte apresentando transmissão de carga via ângulo de contato.	23
Figura 8 – Arranjo de rolamentos em X em vista de corte radial.	24
Figura 9 – Arranjo de rolamentos em O em vista de corte radial.	24
Figura 10 – Arranjo de rolamentos em Tandem em vista de corte radial.	25
Figura 11 – Unidade hidráulica e seus componentes mínimos.	26
Figura 12 – Princípio de funcionamento de um transdutor LVDT.	27
Figura 13 – Strain gage acoplado a um corpo de prova	28
Figura 14 – Ponte de Wheatstone	28
Figura 15 – Processo de aquisição de dados.	30
Figura 16 – Proposta de sistema de medição e atuação.	31
Figura 17 – Célula de carga em miniatura U9C	32
Figura 18 – Condicionador de sinais ClipX.	34
Figura 19 – Sensor de deslocamento LVDT Marposs Red Crown 2.	35
Figura 20 – Válvula direcional sobre as válvulas reguladoras de fluxo.	36
Figura 21 – Unidade hidráulica utilizada.	36
Figura 22 – Representação tridimensional dos suportes metálicos.	38
Figura 23 – Dispositivo NI DAQ USB-6001.	38
Figura 24 – Disposição do conjunto de painel elétrico, computador e unidade hi- dráulica.	40
Figura 25 – Fluxograma de navegação entre telas de interface.	44
Figura 26 – Interface de identificação do usuário.	44
Figura 27 – Aba de configuração dos parâmetros do processo.	46
Figura 28 – Aba de configuração de aquisição e geração de sinais.	47
Figura 29 – Interface de identificação do motor.	48
Figura 30 – Interface de preparação dos sensores de deslocamento LVDT.	48
Figura 31 – Montagem do suporte metálico com os sensores de deslocamento. . . .	49
Figura 32 – Interface de acionamento manual do atuador.	50
Figura 33 – Montagem mecânica do conjunto de medição e atuação de força. . . .	50

Figura 34 – Interface principal de ensaio.	51
Figura 35 – Interface principal de ensaio com possíveis falhas.	52
Figura 36 – Aba da tela de configuração geral contendo os parâmetros do sistema.	54
Figura 37 – Lista de funções associadas às portas do dispositivo DAQ.	54
Figura 38 – Curva artificial ilustrando um comportamento não linear apresentando deslocamento excessivo.	55
Figura 39 – Montagem e disposição do conjunto de ensaio.	56
Figura 40 – Tela resultante do primeiro ensaio em meia carga.	56
Figura 41 – Primeira amostra contendo as curvas dos regimes de tração e compressão dos pontos exportados pelo software.	58
Figura 42 – Segunda amostra contendo as curvas dos regimes de tração e compressão dos pontos exportados pelo software.	59
Figura 43 – Terceira amostra contendo as curvas dos regimes de tração e compressão dos pontos exportados pelo software.	60
Figura 44 – Gráfico de linha contendo a rigidez apresentada nas amostras adquiridas e a média de cada regime.	61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais especificações da célula de carga HBM U9C.	33
Tabela 2 – Especificações ClipX.	34
Tabela 3 – Entradas e saídas disponibilizadas no painel na percepção da placa de aquisição de sinais.	37
Tabela 4 – Características do dispositivo DAQ	39

Lista de Siglas e Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
CP	<i>Corpo de prova</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DAQ	<i>Aquisição de dados</i>
DC	<i>Direct Current</i>
E/S	<i>Entrada/Saída</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FEM	<i>Força Eletromotriz</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NS	<i>Número de Série</i>
OP	<i>Ordem de Produção</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
VCA	<i>Voltagem em Corrente Alternada</i>
VCC	<i>Voltagem em Corrente Contínua</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Organização do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Motores de indução trifásicos	18
2.1.1	Estator	18
2.1.2	Rotor	18
2.1.3	Princípio de funcionamento	20
2.2	Aspectos construtivos de motores elétricos	21
2.2.1	Rolamentos de superprecisão	22
2.2.2	Rolamentos de rolos cilíndricos	22
2.2.3	Rolamentos de esfera de contato angular	22
2.2.4	Arranjo em pares de rolamentos angulares	23
2.2.4.1	Arranjo em X	23
2.2.4.2	Arranjo em O	24
2.2.4.3	Arranjo Tandem	25
2.3	Ensaio de tração e compressão	25
2.3.1	Unidade hidráulica	26
2.4	Sensor de deslocamento LVDT	26
2.5	Medição de força mecânica	27
2.5.1	Extensômetro	27
2.5.2	Ponte de Wheatstone	28
2.5.3	Célula de carga	29
2.5.4	Condicionador de sinais	29
2.6	Aquisição e geração de sinais	29
3	SISTEMA PROPOSTO	31
3.1	Requisitos do processo	31
3.2	Dimensionamento	32
3.2.1	Célula de carga	32
3.2.2	Condicionador de sinais	33

3.2.3	Sensores de deslocamento LVDT	35
3.2.4	Desenvolvimento de ferramentaria	35
3.2.4.1	Unidade Hidráulica	35
3.2.4.2	Painel elétrico	37
3.2.4.3	Suporte metálico de fixação dos dispositivos	37
3.2.5	Dispositivo DAQ	38
3.2.6	Computador	39
3.3	Desenvolvimento do Hardware	40
3.3.1	Medição de deslocamento	40
3.3.2	Medição de força	40
3.3.3	Dispositivo de aquisição	41
3.4	Calibração dos sistemas de medição	41
3.5	Desenvolvimento de Software	42
3.5.1	Aplicação no sistema geral de medições	42
3.5.2	Bibliotecas de comunicação	42
3.5.2.1	Sensor de deslocamento	43
3.5.2.2	Condicionador de sinais	43
3.5.3	Desenvolvimento de interfaces e operação	43
3.5.3.1	Identificação do usuário	44
3.5.3.2	Configuração geral	45
3.5.3.2.1	Configuração de parâmetros do processo	45
3.5.3.2.2	Aquisição e geração de sinais através de tasks	46
3.5.3.3	Identificação do motor	47
3.5.3.4	Preparação dos sensores de deslocamento	47
3.5.3.5	Posicionamento manual do atuador	48
3.5.3.6	Interface de ensaio	49
3.5.3.6.1	Monitoramento de falhas	51
4	RESULTADOS	53
4.1	Metodologia do ensaio	53
4.1.1	Configuração do sistema	53
4.1.1.1	Parâmetros do processo	53
4.1.1.2	Aquisição e geração de sinais	53
4.1.2	Critério para classificação do motor	54
4.1.3	Primeiro teste em meia carga	55
4.2	Análise das curvas	56
4.2.1	Primeira amostra - Melhor caso	57
4.2.2	Segunda amostra - Caso mais frequente	58
4.2.3	Terceira amostra - Pior caso	59

4.2.4	Compilação de rigidez mecânica das amostras de ensaio	59
4.2.5	Possíveis causas dos casos marginais	61
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
A	CONEXÕES GERAIS DE HARDWARE	67
B	CONEXÕES DE HARDWARE DA CÉLULA DE CARGA . .	68
C	ESQUEMA ELÉTRICO DA CONEXÃO DO DISPOSITIVO DAQ COM O PAINEL ELÉTRICO	69
D	DIAGRAMA DE BLOCOS E ISOLAÇÃO ELÉTRICA DO CLIPX	70

1 Introdução

Grandes avanços industriais foram marcados pela descoberta do motor de indução, máquina capaz de converter energia elétrica em energia mecânica, por Nikola Tesla em 1887. Hoje, 90% dos motores utilizados pela indústria são motores de indução assíncronos [1], e somente no Brasil, os motores de indução representam cerca de 55% do consumo energético industrial [2], equivalente a um terço do consumo total de eletricidade do país [3]. Devido às suas principais vantagens como simplicidade de acionamento, robustez e baixo custo [4], suas aplicações em sua grande maioria são compostas por sistemas de circulação de fluidos (bombas, compressores, ventiladores), máquinas operatrizes e sistemas de transporte [5].

Contudo, para garantir o funcionamento adequado de um motor elétrico, é necessário efetuar um rígido controle de qualidade principalmente em dois quesitos. Primeiro, quanto à sua integridade eletromagnética, relacionada principalmente à qualidade de seus enrolamentos e entreferros presentes no rotor e/ou estator. Segundo, quanto à sua integridade mecânica, sendo que a qualidade de fabricação e montagem dos eixos e rolamentos devem atender tolerâncias especificadas pelos projetos e normas vigentes. Para isso, hoje, a maioria das organizações vem incentivando todos seus colaboradores a executarem práticas de qualidade total em seus processos para garantir sua competitividade. Essa filosofia busca aumentar a produtividade e reduzir custos de produtos e serviços, a fim de alcançar a melhoria contínua dos processos e, conseqüentemente, a satisfação total do cliente [6]. Dessa forma, para garantir que os defeitos sejam detectados o quanto antes, como prega um dos itens da qualidade total, os fabricantes de motores elétricos efetuam testes durante a linha de produção para garantir integridade eletromagnética e mecânica dos mesmos. Entre os testes, pode-se citar: inspeção de resistência e comportamento de curvas de tensão de enrolamentos, balanceamento e medição de batimento mecânico do rotor, e inspeção por amostras de rolamentos [7].

Os rolamentos entretanto, somente são inspecionados antes de sua montagem no eixo do rotor e fixação na carcaça do motor. Por conseqüência, o processo produtivo de motores de médio e grande porte acaba ficando suscetível a falhas de montagem como fixação precária, danificação no rolamento ou nas esferas, rolamento posicionado fora do eixo, entre outras falhas. Em especial, na aplicação de compressores de médio a grande porte, as falhas de montagem de rolamentos na fonte motriz podem causar o deslocamento axial acima do limite permitido. Tal falha causa uma frequência de vibração que pode ser amplificada com a frequência de ressonância natural dos componentes do compressor. Nesse caso, a falha só é percebida na aplicação, causando perda de eficiência, aumento profundo dos níveis de vibração e de desgaste do conjunto acoplado, além de elevados

gastos com garantia e conseqüentemente logística reversa [8].

Contudo, o efeito de deslocamento axial pode ser simulado efetuando um ensaio de tração e compressão através de um atuador hidráulico. Assim, o deslocamento axial pode ser medido através da diferença de deslocamento da carcaça do motor, onde o rolamento está fixado, e da pista interna do rolamento, que está firmemente acoplada ao eixo. Caso o comportamento de deslocamento se enquadrem um padrão linear conhecido, o motor é aprovado. Caso contrário, deverá ser analisada a causa da falha, tal como aperto inadequado, falha de fundição, folga no alojamento, etc.

Dado o exposto, este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o desenvolvimento de um sistema de medição aplicado a motores de médio porte produzidos pela empresa de equipamentos elétricos WEG S.A., situada em Jaraguá do Sul/SC. O objetivo do sistema de medição é possibilitar a detecção de comportamentos indesejados de deslocamento axial nos rolamentos dos motores. As medições são obtidas através de ensaios de tração e compressão do eixo do motor. O sistema de medição gera curvas de força versus deslocamento no eixo, possibilitando atestar a compatibilidade e funcionamento adequado dos motores na aplicação de destino.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de medição de rigidez dos rolamentos traseiros de motores. Tal sistema deve ser capaz de gerar curvas de força versus deslocamento, que permitam validar a qualidade de fabricação e de montagem dos rolamentos do motor sob análise.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são apresentados a seguir:

- Dimensionar o sistema de medição considerando os intervalos de medição e os requisitos de precisão e tolerância.
- Efetuar a medição de deslocamento resultante através de transdutores LVDT (do inglês *linear variable differential transformer*).
- Realizar a medição de força aplicada utilizando uma célula de carga.
- Elaborar os sinais de comando para acionamento do sistema hidráulico de ensaio de tração e compressão.
- Desenvolver interface em *LabView* para visualização com base em uma plataforma de aquisição de dados (DAQ - *data acquisition*).

- Validar o sistema realizando testes parciais e pontuais de funcionamento.
- Elaborar procedimentos de operação do ensaio na interface para o usuário responsável.
- Gerar curva de força versus deslocamento para fins de validação do motor.
- Validar o sistema de medição através de resultados experimentais.

1.2 Justificativa

Atualmente, o ensaio de medição de rigidez dos rolamentos traseiros não é efetuado em nenhuma linha de produtos da WEG Motores. Contudo, por exigência do cliente, a venda de um lote de motores em desenvolvimento está condicionada à garantia do fabricante de que nenhum componente, por falha de montagem ou processo de fabricação, permita o deslocamento do eixo acima dos limites aceitáveis. Nesse contexto, houve um investimento para capacitação do laboratório de Metrologia desenvolver o sistema de medição do ensaio supracitado.

1.3 Organização do Trabalho

Para adequar o conteúdo, o presente trabalho é organizado em cinco capítulos descritos a seguir. O atual capítulo tratou da contextualização, justificativa e objetivos deste trabalho. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre motores elétricos e ensaios de tração e compressão. No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos do projeto, inicialmente detalhando os requisitos de processo, para então apresentar o dimensionamento do sistema, o desenvolvimento e integração de *hardware*, bem como o *software* desenvolvido em LabVIEW. Em sequência, no Capítulo 4 são apresentados as análises de linearidade das curvas resultantes do sistema. Por último, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Motores de indução trifásicos

Os motores de indução trifásicos são máquinas elétricas que possuem a finalidade de efetuar trabalho mecânico rotativo a partir da energia elétrica consumida. Dentre as máquinas elétricas rotativas, se trata de uma das mais simples e robustas. Um motor de indução basicamente é constituído de duas partes principais: o estator e o rotor. O espaço entre os dois componentes é chamado de entre-ferro.

2.1.1 Estator

O estator representa a parte fixa do motor, sendo composto por dois principais componentes: o núcleo de chapas e os enrolamentos. O núcleo de chapas é composto por diversas chapas finas ferromagnéticas entrepostas isoladas entre si. Essas chapas são entrepostas para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese e possuem formato de anel com ranhuras internas para justamente alojarem os enrolamentos de cobre. Os enrolamentos são dispostos 120° uns dos outros nas ranhuras do núcleo de chapas. Na Figura 1 é demonstrado um estator com os componentes supracitados.

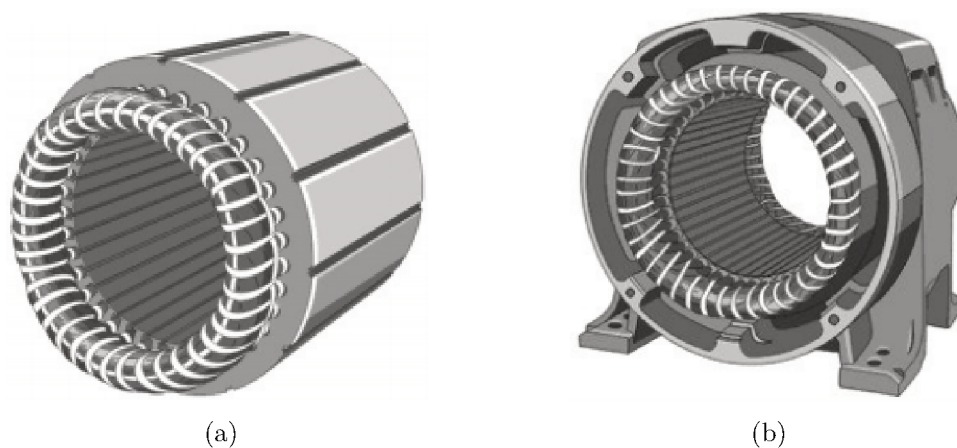


Figura 1 – Aspecto de um estator. (a) Enrolamentos acoplado aos pacote de chapas. (b) Estator acoplado à carcaça. Adaptado de [1].

2.1.2 Rotor

O rotor representa a parte móvel do motor, podendo ser de dois tipos: rotor em curto circuito do tipo gaiola de esquilo, ou rotor bobinado. Ambos rotores possuem núcleo de

chapas ferromagnéticas, contudo, os condutores do rotor gaiola de esquilo, demonstrados na Figura 2, são compostos por lâminas de barras metálicas (geralmente de alumínio), curto circuitadas por anéis em cada extremidade para permitir a circulação de corrente. Sua parametrização eletromagnética é única e seu custo é reduzido.

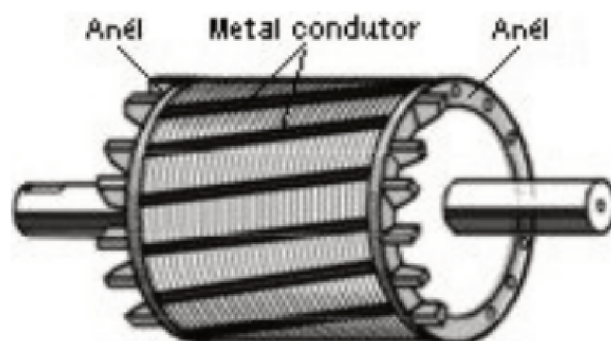


Figura 2 – Rotor do tipo gaiola de esquilo [1].

Já o rotor bobinado, como o nome sugere, se trata de um rotor com enrolamentos em torno do núcleo de chapas, similar ao estator. Este rotor normalmente é destinado a potências elevadas, pois além das chapas e enrolamentos, contém anéis coletores e escovas que permitem conexão externa com os enrolamentos do rotor, possibilitando alterar parâmetros de resistência rotórica com reóstatos para melhorar características de conjugado de partida. Após a partida os enrolamentos são curto circuitados e o rotor funciona similar a um do tipo gaiola de esquilo. Este tipo de rotor, ilustrado na Figura 3, é mais versátil quanto ao controle do torque de partida e parametrização, contudo o custo e a manutenção são mais elevados [9].

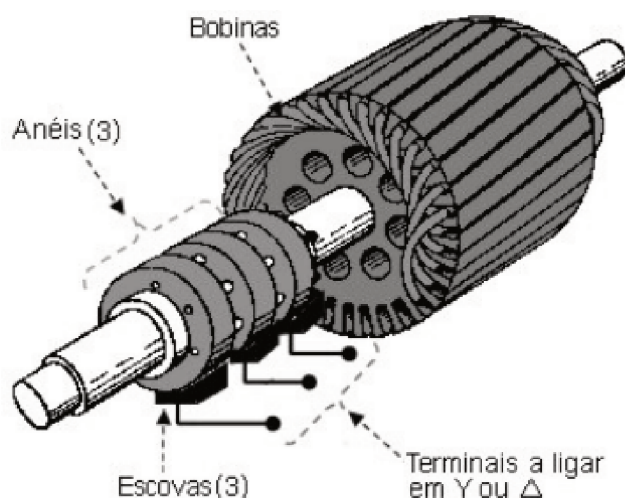


Figura 3 – Rotor bobinado com anéis coletores [1].

2.1.3 Princípio de funcionamento

O campo magnético girante variante no tempo produzido pelo estator, segundo a Lei de Faraday, faz com que uma força eletromotriz seja induzida nos enrolamentos ou lâminas do rotor. O rotor com sua corrente induzida, segundo a Lei de Lenz, acaba criando seu próprio campo magnético que se opõe a à variação do fluxo originário e, assim, a interação entre os dois campos magnéticos produz o torque no eixo da máquina [1], conforme apresentado na Figura 4.

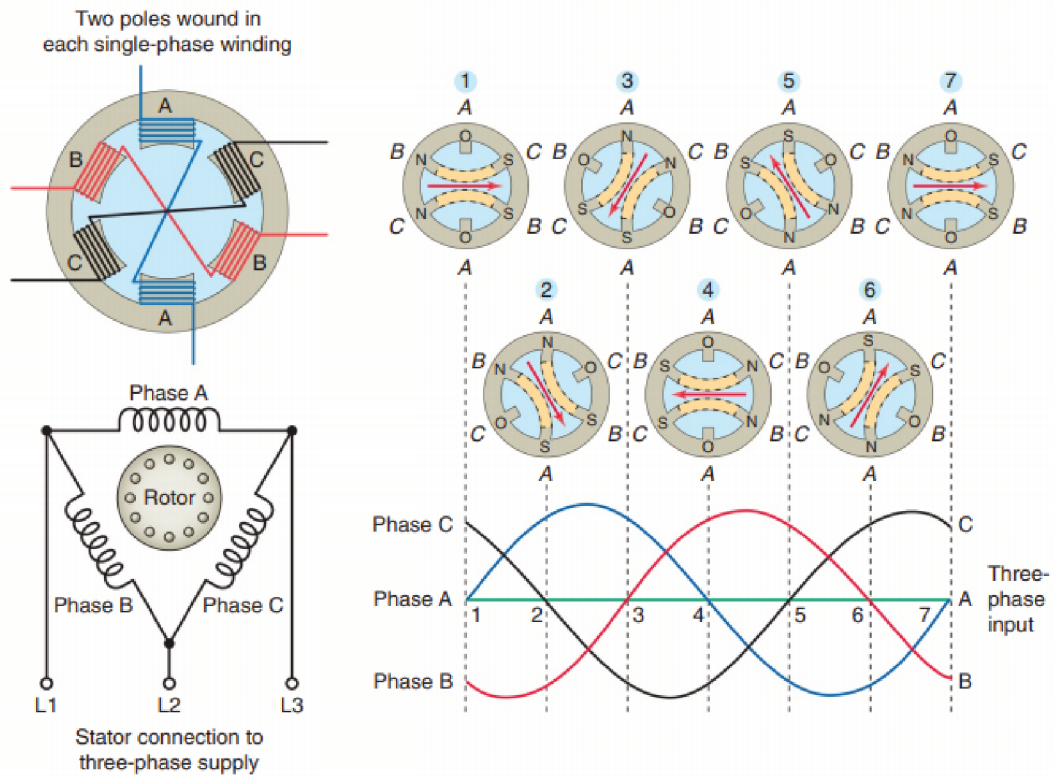


Figura 4 – Princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico com dois polos [10].

O campo girante desenvolvido no estator possui uma velocidade chamada de velocidade síncrona, dada por

$$N_s = \frac{120f_e}{P} \quad (2.1)$$

onde N_s é velocidade síncrona do campo girante em RPM, f_e representa a frequência da corrente elétrica dos enrolamentos do estator em Hz e P é número de polos do estator. Pela equação percebe-se que essa velocidade é diretamente proporcional a f_e e inversamente proporcional ao número de polos confeccionados no enrolamento do estator. Os polos estão relacionados com a disposição das bobinas no motor elétrico, que são sempre dispostas em pares e defasadas 120° umas das outras [11].

É de conhecimento que a variação de fluxo magnético permite que a corrente seja induzida no rotor. Entretanto, em rotação plena o rotor seria desmagnetizado se atingisse

a velocidade do campo girante, já que a velocidade relativa seria nula e o mesmo já não perceberia variação do fluxo magnético, conseqüentemente não haveria força eletromotriz (FEM) induzida. Dessa forma, o motor de indução gira em uma velocidade ligeiramente diferente do campo magnético do estator, efeito que permite que o motor gire [10], onde a diferença da velocidade do campo girante com a velocidade nominal medida no eixo do rotor é chamada de fator de escorregamento, apresentada como

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \cdot 100. \quad (2.2)$$

Onde S é escorregamento em porcentagem (%), N caracteriza a velocidade nominal do rotor em RPM e N_s representa a velocidade síncrona do campo girante em RPM.

É importante mencionar que, além da diferença de rotação a vazio, fatores como perdas mecânicas com atrito de mancais e ventoinha, juntamente com o conjugado associado, influenciam substancialmente no fator de escorregamento.

2.2 Aspectos construtivos de motores elétricos

Nos motores, o rotor e suas partes móveis devem possuir dispositivos que suportem cargas radiais e axiais e permita o giro livre com o mínimo de interferência possível. Para isto, os fabricantes utilizam de rolamentos nas extremidades do eixo do rotor. Um motor elétrico tem sua construção apresentada na Figura 5.

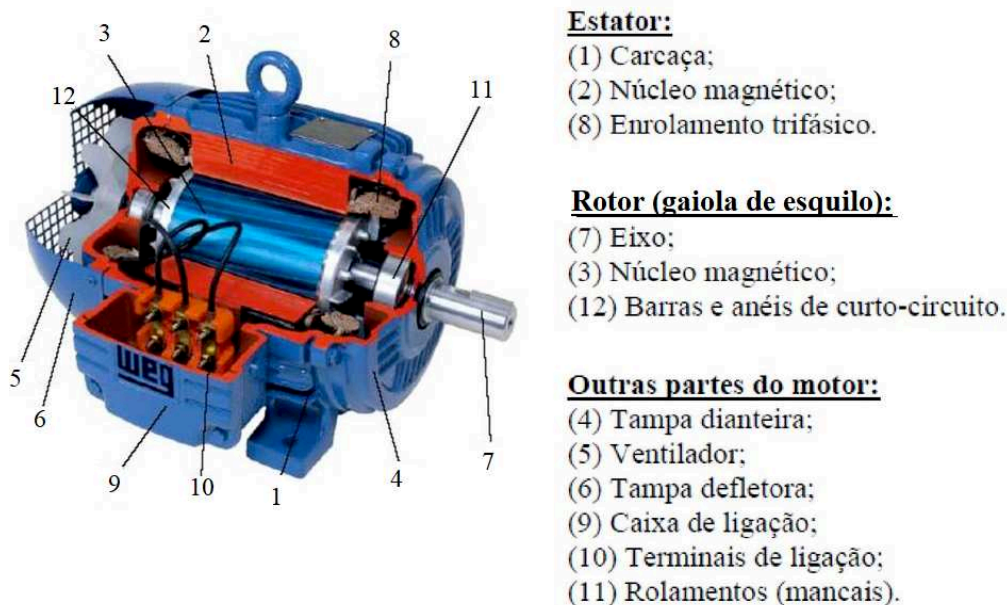


Figura 5 – Componentes de um motor de indução[12].

Por vezes, a estrutura mecânica de motores de grande porte não se resumem a um par de rolamentos comuns em cada extremidade do rotor. Na sequência, são abordadas algumas técnicas mecânicas para comportar certos esforços aplicados.

2.2.1 Rolamentos de superprecisão

Os rolamentos de precisão são dispositivos fabricados para aplicações específicas onde a sua tolerância dimensional é baixíssima, proporcionando maior capacidade de carga, desempenho, rigidez, precisão e velocidade com baixo nível de atrito e ruído. As tolerâncias são especificadas por normas internacionais como ISO 492 e JIS B1514. Os rolamentos de precisão podem ser dos mais variados tipos e não estão restritos a um método construtivo de rolamento.

2.2.2 Rolamentos de rolos cilíndricos

Os rolamentos de rolos utilizam rolos cilíndricos no lugar de esferas. Este tipo de rolamento, apresentado na Figura 6 oferece alta capacidade de carga radial e geralmente sua aplicação é dada na ponta de eixo frontal de motores de grande porte.



Figura 6 – Rolamento de rolos cilíndricos [13].

2.2.3 Rolamentos de esfera de contato angular

Os rolamentos angulares possuem a pista interna e externa deslocadas uma da outra em direção ao eixo, permitindo suportar cargas simultâneas de forças radiais e axiais. A capacidade de carga axial está diretamente relacionada com o ângulo de contato da esfera. O ângulo de contato é o ângulo definido pela linha formada pelos pontos de contato entre a esfera e as pistas em plano radial, linha na qual a carga combinada é transmitida de uma pista a outra, conforme demonstra a Figura 7.

Este tipo de rolamento ainda pode ser arranjado para atingir maior rigidez radial e axial, além de explorar diferentes configurações de suporte direcional de carga.

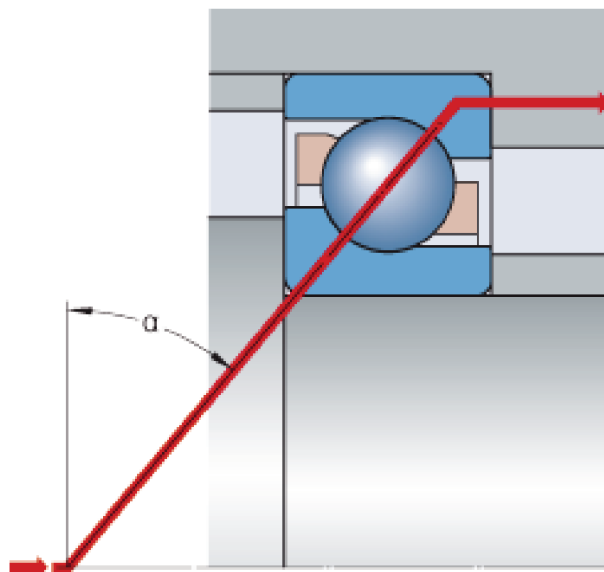


Figura 7 – Metade superior de um rolamento angular na vista radial em corte apresentando transmissão de carga via ângulo α de contato [14].

2.2.4 Arranjo em pares de rolamentos angulares

O arranjo de rolamentos é uma técnica aplicada em rolamentos angulares, onde ao combinar dois ou mais rolamentos, é possível ampliar as vantagens individuais, assim como o suporte de cargas combinadas em diferentes direções e sentidos anteriormente não suportadas individualmente. Os rolamentos utilizados por essa técnica possuem um deslocamento de fábrica entre a pista interna e externa, de forma que ao efetuar a montagem, seja aplicada uma pré-carga com o objetivo de mitigar ao máximo as folgas de fabricação entre os componentes do rolamento, proporcionando precisão e rigidez em aplicações críticas. Em seguida, são detalhadas algumas técnicas de arranjo de rolamentos angulares.

2.2.4.1 Arranjo em X

No arranjo em “X”, também conhecido como arranjo face-a-face, as linhas de carga convergem ao longo do eixo em formato de “X” e, dessa forma, é possível acomodar carga axial em ambos os sentidos, contudo, somente um rolamento irá suportá-la.

Este arranjo, apresentado na Figura 8, é recomendado para elevadas cargas combinadas e permite pequenos desalinhamentos devido sua rigidez a momentos reduzida. A pequena distância entre centros efetivos de carga dos rolamentos, que é o ponto em que as linhas de contato coincidem com o eixo, faz com que este tipo seja menos indicado para suportar cargas de momento.

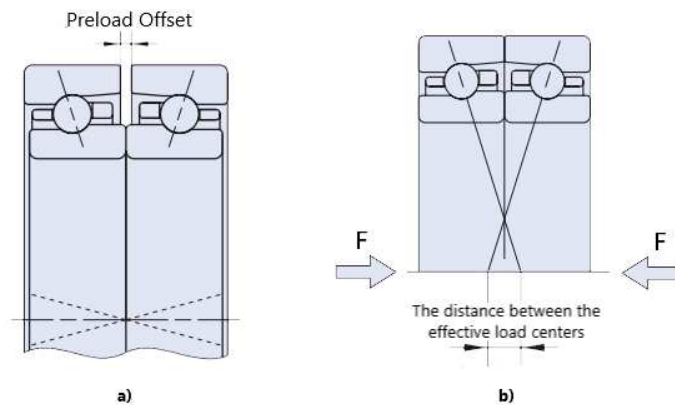


Figura 8 – Arranjo de rolamentos em X em vista de corte radial. (a) Rolamento sem aplicação de pré-carga. (b) Rolamento com pré-carga e forças axiais suportadas. Adaptado de [15].

2.2.4.2 Arranjo em O

No arranjo em “O”, também conhecido como arranjo traseira-a-traseira, demonstrado na Figura 9, as cargas axiais também são acomodadas em ambos os sentidos, mas suportadas individualmente por um único rolamento. Nesta configuração as linhas divergem ao longo do eixo e, por isso, esta configuração proporciona maior rigidez à cargas de momento em relação ao arranjo em “X”, sendo recomendada para elevadas cargas combinadas e cargas de momento. A rigidez radial e axial dos arranjos em “X” e “O” são idênticas considerando a mesma pré-carga. Caso o alojamento não seja preciso e haja desalinhamento no eixo, as cargas internas do rolamento poderão sofrer desgastes prematuros devido a alta rigidez a momentos, não sendo indicado quando há desalinhamentos consideráveis.

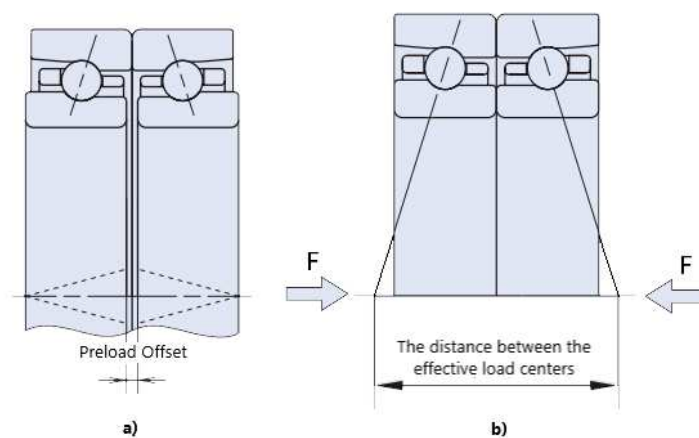


Figura 9 – Arranjo de rolamentos em O em vista de corte radial. (a) Rolamento sem aplicação de pré-carga. (b) Rolamento com pré-carga e forças axiais suportadas. Adaptado de [15].

2.2.4.3 Arranjo Tandem

No arranjo em modo *Tandem* os dois rolamentos são dispostos de forma que as linhas de contato angular formadas fiquem paralelas. A rigidez radial é a mesma dos outros arranjos já citados, porém a rigidez axial acaba sendo dobrada considerando a mesma pré-carga. Em contra partida a força passa a ser suportada apenas em um único sentido, conforme apresentado na Figura 10, dessa forma, este tipo de arranjo é recomendado para alta carga axial em um sentido.

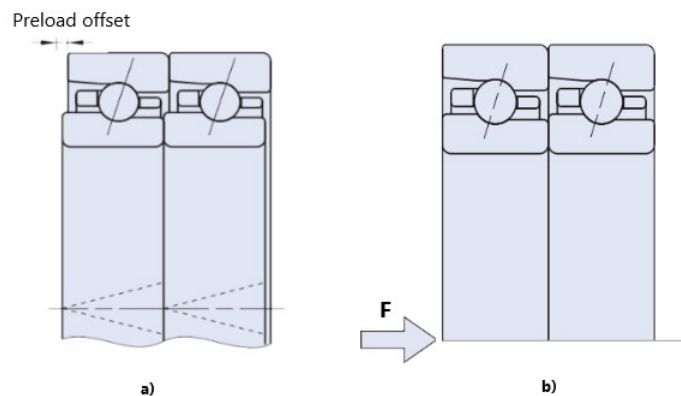


Figura 10 – Arranjo de rolamentos em Tandem em vista de corte radial. (a) Rolamento sem aplicação de pré-carga. (b) Rolamento com pré-carga e força axial suportada. Adaptado de [15].

2.3 Ensaio de tração e compressão

Certos componentes são fabricados para resistirem às ações das forças externas aplicadas aos mesmos. Uma viga de construção civil é dimensionada de forma a suportar a força sobre ela, assim como um vaso de pressão é projetado a fim de conter os esforços internamente aplicados. Caso determinado material não resista aos esforços nele aplicado, diz-se que este atingiu o estado limite, ou seja, sofreu uma tensão de ruptura.

Na área física e mecânica, o ensaio de tração e compressão é utilizado para inspecionar os aspectos de resistência e rigidez através da aplicação de forças unidirecionais na seção do corpo de prova (CP) e medição subsequente da deformação momentânea do mesmo, gerando um gráfico de tensão *versus* deformação. Nesse gráfico é possível determinar regiões de regimes elásticos, onde ao cessar a tensão, a deformação é nula; regimes plásticos, onde ao cessar a tensão aplicada, uma deformação residual permanece no corpo de prova; e de ruptura, região na qual a tensão cessa por rompimento do componente.

2.3.1 Unidade hidráulica

Para realizar o ensaio de tração e compressão, é muito comum utilizar-se de atuadores hidráulicos devido à sua alta capacidade de exercer força. Contudo, para acioná-lo, é necessário no mínimo outros dispositivos como ilustrado na Figura 11. Tais dispositivos oferecem pressão direcionada para realizar o ensaio desejado de tração e compressão.

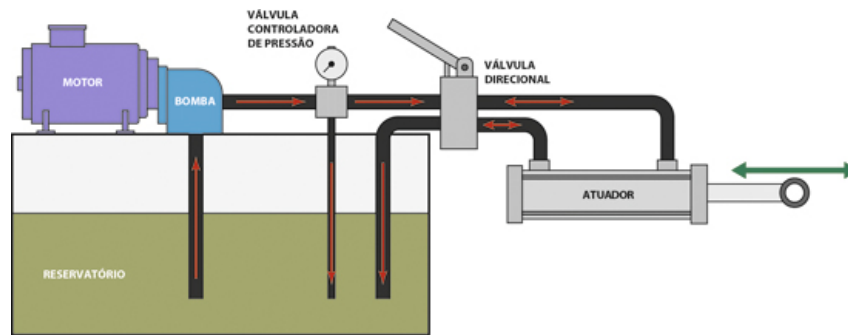


Figura 11 – Unidade hidráulica e seus componentes mínimos. [16].

2.4 Sensor de deslocamento LVDT

O sensor de deslocamento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), é um transdutor para a medição de deslocamento linear que gera um sinal relacionado com a distância de um objeto em relação a um ponto de referência, assim como seu sentido de movimento. Conforme apresentado na Figura 12, este sensor possui o princípio de funcionamento baseado na utilização de uma bobina primária excitada em AC para gerar uma FEM induzida proporcional à posição do núcleo ferromagnético móvel nas bobinas secundárias.

Como as bobinas secundárias são conectadas em série, mas em oposição, quando o núcleo está na posição central, a tensão de saída é zero pois a FEM induzida em cada secundário acaba se anulando devido ao seu arranjo supracitado. Conforme o núcleo se afasta do centro, a tensão induzida é aumentada em uma das bobinas secundárias e diminuída na oposta, resultando no aumento da tensão de saída do transdutor. Dessa forma, através da comparação de fase entre a tensão de saída e a tensão de excitação, é possível distinguir qual das bobinas está sendo excitada.

A maior vantagem desse tipo de sensor é que não há contato físico entre o núcleo móvel e as bobinas, proporcionando resolução infinita (limitada somente pelo condicionamento de sinais) e grande vida útil.

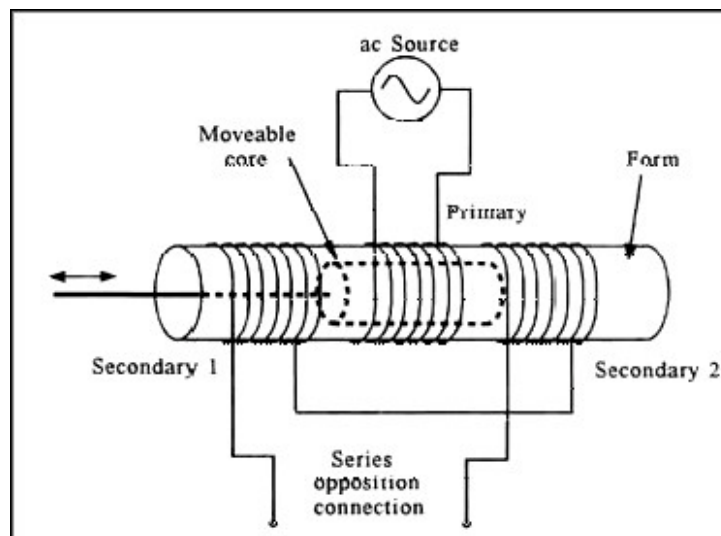


Figura 12 – Princípio de funcionamento de um transdutor LVDT [17].

2.5 Medição de força mecânica

A medição de força mecânica parte do princípio que um objeto reage às tensões aplicadas nele. As tensões podem ser classificadas conforme segue:

- tensão mecânica - provenientes de força externa aplicada;
- tensão térmica - resultantes do movimento das moléculas em função da temperatura do corpo;
- tensão residual - decorrente de forças internas de resfriamento não uniforme de processos de fundição, forja ou solda.

Define-se deformação como a variação do comprimento do corpo em relação ao comprimento original do material. Um tipo de deformação comum é a axial, na qual mede-se o alongamento ou compressão do material sujeito a tensões [18].

Para melhor entendimento, em seguida é detalhado os conceitos necessários para realizar adequadamente a medição de força em uma aplicação.

2.5.1 Extensômetro

O extensômetro, ou *strain gauge*, é um dispositivo que apresenta resistência elétrica dependente de sua deformação mecânica, o qual é tipicamente acoplado a um corpo de prova. Um dos mais utilizados é o *strain gauge* de componentes metálicos colados. Esse transdutor, representado pela Figura 13 é formado por uma folha metálica disposta em um padrão de grade a fim de maximizar a extensão unidirecional paralela do metal.

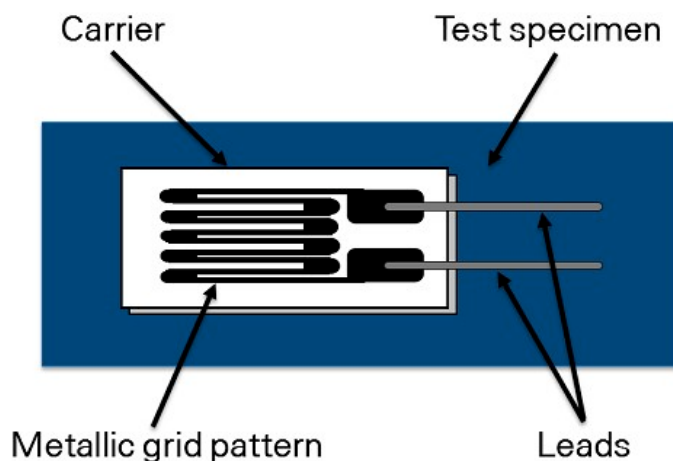


Figura 13 – Strain gage acoplado a um corpo de prova [19]

Contudo, a variação de resistência é muito pequena, sendo que para mensurar esse pequeno valor com exatidão é necessário a utilização de outras técnicas em conjunto, como a utilização do circuito ponte de Wheatstone detalhada a seguir.

2.5.2 Ponte de Wheatstone

Em 1843, o físico inglês Sir Charles Wheatstone criou um circuito de ponte capaz de medir resistências, que posteriormente foi amplamente utilizado para medir a resistência de extensômetros.

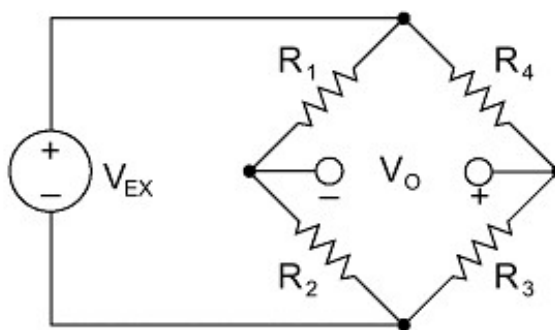


Figura 14 – Ponte de Wheatstone [19]

Este circuito, demonstrado na Figura 14, é composto por uma fonte de excitação V_{ex} e dois divisores de tensão em paralelo, chamados de braços da ponte, onde R_1 e R_2 compõem o primeiro braço divisor de tensão e R_3 e R_4 resultam no segundo braço divisor de tensão.

A tensão de saída V_o é medida no ponto central de ambos os divisores, formando a seguinte equação:

$$V_o = V_{ex} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (2.3)$$

A partir da equação, percebe-se que se

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.4)$$

a tensão de saída é zero. Nessa condição, diz-se que a ponte está em equilíbrio e, portanto, a variação de resistência em qualquer braço resulta em uma tensão de saída diferente de zero. Assim, caso R_4 seja substituído por um extensômetro, qualquer mudança na resistência em função da deformação acaba desequilibrando a ponte, produzindo uma tensão de saída mensurável diferente de zero.

2.5.3 Célula de carga

A célula de carga é um elemento físico de medição onde os extensômetros são fixados. Tal dispositivo é construído de aço ou alumínio, oferecendo alta resistência e uma pequena elasticidade. Sob o efeito de carga, a célula é levemente deformada mas sempre volta a sua posição inicial, respondendo de forma elástica. Essa deformação é sentida pelos extensômetros associados e, assim, a célula de carga é conhecida como um transdutor que mede a força e a transforma em um sinal elétrico, largamente empregada em balanças [20].

2.5.4 Condicionador de sinais

O condicionador de sinais, comumente conhecido como amplificador industrial, é o dispositivo eletrônico utilizado em conjunto com um transdutor, e tem como objetivo processar os pequenos sinais advindos do mesmo para transformá-los em um valor de grandeza desejado. Por isso, é conhecido por efetuar parte do processo de aquisição de dados.

2.6 Aquisição e geração de sinais

A aquisição de dados é o processo de medir fenômenos físicos como força, pressão, luz, temperatura, som, tensão, corrente, entre tantos, através da utilização de um computador e demais periféricos, conforme demonstra a Figura 15.

Em suma, o processo começa na utilização de um sensor ou transdutor, responsável por transformar um fenômeno físico em um sinal elétrico mensurável variante no tempo.



Figura 15 – Processo de aquisição de dados [21].

Para efetuar a interface entre o sensor e o computador, é necessário um dispositivo de *hardware* DAQ. Um *hardware* DAQ possui três principais funcionalidades descritas a seguir.

- Condicionamento de sinais: é composto por circuitos responsáveis por adequar o sinal analógico original recebido a ser digitalizado. As operações aplicadas no sinal podem ser de amplificação, atenuação, filtragem e isolamento.
- Conversor analógico digital (ADC - *analog to digital converter*: etapa onde os sinais analógicos são discretizados em uma taxa de amostragem e resolução digital definida. A frequência de amostragem utilizada deve ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal analógico para garantir a fidelidade dos dados, segundo o teorema de amostragem de Nyquist [22].
- Comunicação ao computador: para transmitir os dados de medição, é necessária uma interface que realize a comunicação ao computador. As interfaces mais comuns são USB, PCI, Ethernet e Wi-Fi, e cada uma possui suas particularidades de vantagens e desvantagens conforme as aplicações desejadas.

Por fim o computador é utilizado para processar, armazenar e visualizar os dados medidos. Para isso, o computador deve possuir os *drivers* necessários para o DAQ correspondente, que irá abstrair comandos e possibilitar a comunicação entre os dispositivos, possibilitando o desenvolvimento de aplicações, que auxiliará o usuário na aquisição, apresentação e análise dos dados medidos.

3 Sistema proposto

O motor elétrico WEG sujeito a ensaio se trata de um modelo de motor de indução trifásico de médio porte, possuindo na parte frontal do seu eixo um rolamento de rolos cilíndricos para suportar as grandes cargas radiais oferecidas pela aplicação, e na parte traseira, onde será efetivamente avaliado, há um conjunto de dois rolamentos angulares arranjados face a face que devem oferecer elevada rigidez a esforços axiais.

Para tornar possível a análise de rigidez do conjunto de rolamento traseiro do motor elétrico em fase final de produção, foi proposto um sistema de medição ilustrado pela Figura 16. Tal sistema é capaz de realizar um ensaio de tração e compressão no eixo do motor elétrico, adquirindo assim um gráfico de força *versus* deslocamento resultante da leitura da célula de carga em série com o atuador, e dos sensores de deslocamento posicionados na parte traseira do motor.

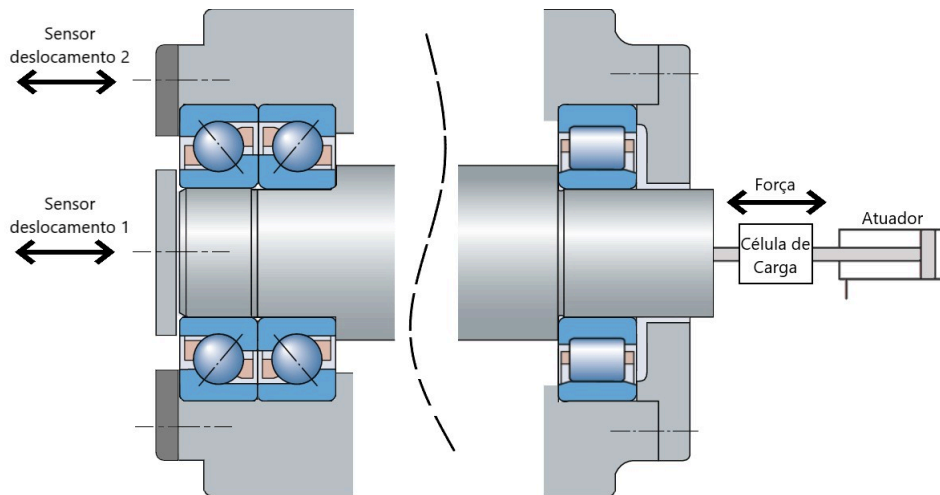


Figura 16 – Proposta de sistema de medição e atuação.

Na sequência são apresentadas as estratégias de dimensionamento e escolha dos componentes utilizados.

3.1 Requisitos do processo

Como qualquer sistema de medição, é necessário definir os intervalos de medição a serem efetuados, assim como a tolerância máxima de erro aceitável do processo para então dimensionar e especificar corretamente as soluções existentes no mercado.

O requerente do projeto exige que o ensaio de força seja efetuado até 8000 *N* tanto na compressão quanto na tração, e que no gráfico seja adquirido ao menos 20 pontos em cada regime. Considerando a aplicação do intervalo de força desejado, o sistema em condições

anormais deve-se deslocar de forma absoluta no máximo $100 \mu m$. Assim, considerando o intervalo de medição citado, neste trabalho o erro máximo permitido de leitura de força exercida é de $\pm 1\%$ da leitura atual, e o erro máximo permitido de leitura de deslocamento é de $\pm 10 \mu m$.

Todos os sistemas WEG que necessitam atender tolerâncias de medição, até mesmo os dispositivos novos, são passíveis de cadastro e calibração pelo departamento de Metrologia. Nesse contexto, no processo de inspeção de rigidez de rolamento aqui apresentado, a calibração do conjunto de aquisição de sinais de força e deslocamento se faz necessária.

3.2 Dimensionamento

3.2.1 Célula de carga

Ao visualizar os requisitos do projeto, observa-se a necessidade de uma célula de carga capaz de suportar com certo fator de segurança os esforços solicitados de tração e compressão. Para isso, decidiu-se utilizar uma célula de carga em miniatura da marca HBM, modelo U9C-10kN, que possui elevada rigidez e é recomendada para tarefas de medições dinâmicas. A célula em questão é ilustrada pela Figura 17 com características apresentadas pela Tabela 1.



Figura 17 – Célula de carga em miniatura U9C [23].

Tabela 1 – Principais especificações da célula de carga HBM U9C [23].

Características mecânicas	
Força nominal	10 <i>kN</i>
Força máxima permitida	15 <i>kN</i>
Deslocamento nominal	50 μm
Características elétricas	
Sensibilidade	1 <i>mV/V</i>
Tensão de excitação	5 <i>V</i>
Classe de precisão	0,02
Temperatura referência	23 $^{\circ}C$
Características construtivas	
Conexão	Ponte completa - 4 fios
Comprimento cabo	1,5 <i>m</i>
Material	Aço inoxidável
Peso	100 <i>g</i>
Grau de proteção	IP67

3.2.2 Condicionador de sinais

Para mensurar os sinais elétricos advindos da célula de carga e transformá-los em dados, é necessário a utilização de um condicionador de sinais. Nesse caso, optou-se por utilizar um condicionador de sinais industrial marca HBM modelo ClipX BM40 como demonstrado na Figura 18. Esse produto se trata de um equipamento, que oferece altos níveis de precisão e de taxa de amostragem para suprir os requisitos. Como apresentado pelo Anexo D, possui capacidade de conexão de até sete tipos de transdutores, com diversas funções e grandes facilidades de integração ao oferecer compatibilidade com protocolos de comunicação Ethernet, PROFIBUS, PROFINET, e OPC-UA referente à IIoT (*Industrial Internet of Things*), além de ser compatível com a célula de carga, já que são produtos do mesmo fabricante.



Figura 18 – Condicionador de sinais ClipX [24].

Tabela 2 – Especificações ClipX [25]

Características gerais	
Tensão de alimentação	10 à 30 V (recomendado 24 V)
Entradas de medição	1
E/S Digitais	4
Saídas analógicas	1 (Tensão/Corrente)
Classe de precisão	0,01
Conversor A/D	24 bits
Taxa de amostragem	19,2 kS/s
Filtro ativo passa-baixa	Bessel ou Butterworth, 0.02 à 200 Hz
Tecnologia de transdutores	Strain gauge full e half bridge, sensor piezoresistivo, transdutor potenciométrico, PT100, tensão ($\pm 10V$) e corrente ($\pm 20mA$)
Características utilizando <i>strain gage</i> de ponte completa	
Faixa de medição	2,5 ou 5 mV/V
Comprimento cabo permitido	<100 m
Não linearidade	0.005% do valor de fundo de escala

Para facilitar a configuração inicial, o condicionador oferece um *web service* acessível pelo navegador do computador conectado, permitindo efetuar configurações rápidas de sensibilidade, filtros, pré-cálculos, valores de zeramento, assim como visualização dos valores de tensão e força mensurados pela célula de carga.

3.2.3 Sensores de deslocamento LVDT

Como o interesse é efetuar a medição resultante de deslocamento entre pista interna e externa, neste projeto será utilizado dois sensores de deslocamento localizados em posições distintas da região traseira do motor.

Dado o intervalo de deslocamento máximo, para a correta leitura foi escolhido utilizar de sensores de medição da marca *Marposs*, modelo *Red Crown 2 U10* [26] de retorno por mola com alcance de medição de $\pm 1mm$. Esse sensor de deslocamento possui um erro de precisão dado por

$$e(\mu m) = \pm(0,2 + K) \quad (3.1)$$

onde K é o valor em módulo medido em mm . Dessa forma, além de proporcionar uma precisão dez vezes maior que o requisitado, o sensor apresentado na Figura 19 possui eletrônica de condicionamento de sinal com taxa de amostragem de até 1000 amostras/-segundo embutida em sua conexão USB, dispensando condicionadores de sinais ou demais periféricos para a leitura de deslocamento em um computador.



Figura 19 – Sensor de deslocamento LVDT Marposs Red Crown 2.

3.2.4 Desenvolvimento de ferramentaria

Como o departamento de Metrologia ficou responsável pelo sistema de medição e interface, analogamente o setor de Ferramentaria da WEG foi o responsável por desenvolver e fornecer a unidade hidráulica, os suportes metálicos de fixação dos sensores e atuadores, assim como o painel elétrico utilizado pelo projeto. Dessa forma, em seguida é apresentado os detalhes necessários para possibilitar a correta integração do sistema de medição ao *hardware* disponibilizado pela Ferramentaria.

3.2.4.1 Unidade Hidráulica

O setor de Ferramentaria da WEG já dispunha de uma unidade hidráulica parcialmente adequada ao projeto. Tal unidade conta com motor elétrico trifásico WEG de 3 cv

de potência, bomba, tanque, filtro hidráulico, válvulas reguladoras de fluxo, assim como a válvula direcional 4/3 vias duplamente pilotada por 24Vcc com centro tandem. Esse tipo de válvula, com simbologia representada pela Figura 20, permite que o cilindro hidráulico seja acionado em ambos os sentidos, contudo, quando em repouso, o cilindro permanece bloqueado e o fluxo hidráulico retorna ao tanque, aliviando a pressão exercida pela bomba hidráulica.



Figura 20 – Válvula hidráulica sobre as válvulas reguladoras de fluxo.

Para completar a unidade, uma empresa terceirizada especializada desenvolveu um atuador hidráulico dimensionado para o projeto com 10cm de curso de haste, assim como inseriu uma válvula proporcional comandada por uma unidade de controle eletrônico através de sinal analógico de tensão (0-10V) ou corrente (4-20mA) [27, 28], possibilitando exercer força de forma controlada, proporcional ao sinal de tensão ou corrente aplicada. A unidade hidráulica completa é apresentada na Figura 21.



Figura 21 – Unidade hidráulica utilizada.

3.2.4.2 Painel elétrico

Um painel elétrico foi desenvolvido principalmente para efetuar o acionamento da unidade hidráulica e adquirir sinais de máquina necessários. No painel há todo o acionamento de energia elétrica trifásica e as devidas proteções necessárias ao motor elétrico da bomba hidráulica, assim como botoeiras de emergência para proteção ao usuário. Desse modo, na percepção do sistema de medição, sinais de contato seco são dispostos como entradas digitais, assim como é necessário gerar três sinais de saídas digitais para acionar o motor elétrico da bomba e as solenóides da válvula direcional, e um sinal de saída analógico para a válvula proporcional, resultando nas entradas e saídas descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Entradas e saídas disponibilizadas no painel na percepção da placa de aquisição de sinais.

Sinais de Entrada	Sinais de Saida
Emergencia Pressionada	Liga bomba
Bomba ligada	Solenóide Avanço
Disjuntor desligado	Solenóide Retorno
Filtro entupido	Tensão Válvula Proporcional

3.2.4.3 Suporte metálico de fixação dos dispositivos

Para fixar os dispositivos que realizam a medição e atuação, foram desenvolvidos dois suportes metálicos representados na Figura 22 que são fixados por parafusos nos furos roscados existentes do motor. O primeiro dispositivo é voltado para a parte frontal do motor, oferece fixação para o atuador hidráulico e é fixado com quatro parafusos. O segundo dispositivo é voltado para a parte traseira do motor, oferece dois alojamentos para os sensores de deslocamento LVDT e é fixado ao motor com dois parafusos.

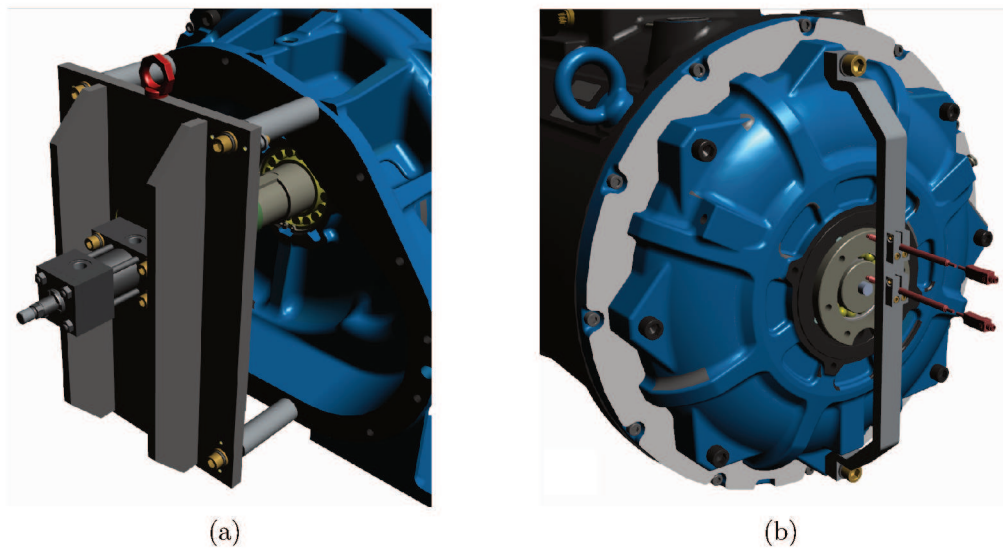


Figura 22 – Representação tridimensional dos suportes metálicos. (a) Suporte metálico para o atuador hidráulico. (b) Suporte metálico para os sensores de deslocamento LVDT.

3.2.5 Dispositivo DAQ

Como placa de aquisição de sinais, o modelo USB-6001 da National Instruments (NI), apresentado na Figura 23 foi escolhido para o projeto, pois é um dispositivo com boa relação custo benefício que supre as necessidades de GPIOs (*general purpose inputs and outputs*), e de nível de tensão de saída analógica necessária para o acionamento em tensão da válvula proporcional, conforme especificado na Tabela 4.



Figura 23 – Dispositivo NI DAQ USB-6001 [29].

Tabela 4 – Características do dispositivo DAQ [30].

E/S Digital	
Canais	13 entradas/saídas
Faixa de tensão máxima	-0.3V até 5.5V em relação ao D GND
Corrente máxima de saída	+/- 4mA
Entrada analógica	
Canais	4 diferenciais ou 8 com terra comum
Resolução ADC	14 bit
Taxa de aquisição	20kS/s compartilhada entre canais
Faixa de tensão de entrada	+/- 10V
Saída analógica	
Canais	2
Resolução DAC	14 bit
Faixa de tensão de saída	+/- 10V
Taxa de atualização	5kS/s

3.2.6 Computador

Para a integração dos dispositivos mencionados de aquisição e geração de sinais de máquina, medição de deslocamento e força, é utilizado um computador com requisitos mínimos para executar o software LabVIEW 2017, que será a interface de desenvolvimento e programação do sistema. Além disso, são necessárias três portas USB para conexão dos sensores de deslocamento e o dispositivo DAQ, e uma porta Ethernet para comunicação com o condicionador de sinais ClipX e resolução mínima do monitor de 1366x768 *pixels* devido o *layout* da aplicação desenvolvida. O computador em questão, o painel elétrico e a unidade hidráulica são apresentadas na Figura 24.

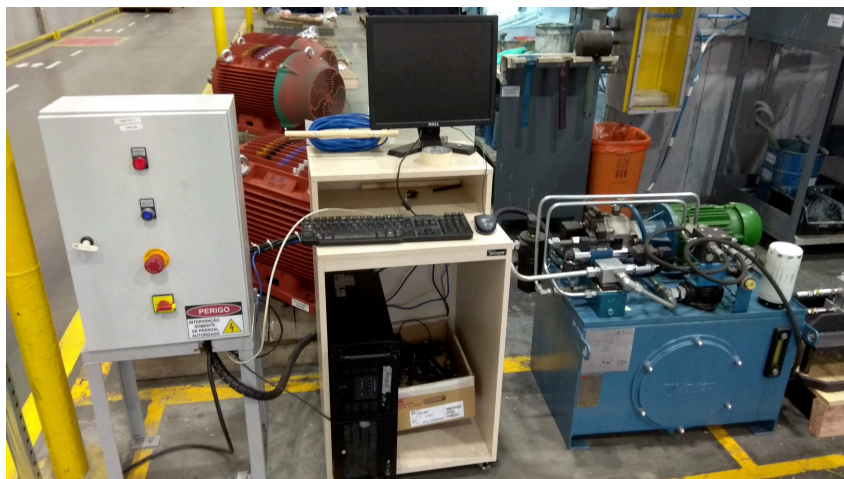


Figura 24 – Disposição do conjunto de painel elétrico, computador e unidade hidráulica.

3.3 Desenvolvimento do Hardware

As conexões de hardware apresentadas no Apêndice A são dispostas em três níveis básicos da pirâmide da automação de forma a apresentar com clareza os dispositivos envolvidos em forma hierárquica. O nível é composto dos dispositivos de campo, representados por sensores, atuadores, entradas e saídas digitais e analógicas da planta. No segundo nível há os dispositivos envolvidos com o controle do processo, aqui populados pelo dispositivo DAQ e o condicionador de sinal ClipX. Já o terceiro nível é composta pelo nível de supervisão, a qual oferecerá, através de um PC, uma interface gráfica entre homem e máquina, processamento e armazenamento das informações pertinentes em banco de dados local ou remoto. A seguir são apresentados mais detalhes sobre as conexões de cada dispositivo de medição.

3.3.1 Medição de deslocamento

Os sensores de deslocamento utilizados são conectados diretamente ao computador via duas conexões USB, comunicando-se com o computador mediante instalação dos devidos *drivers* de comunicação necessários fornecidos pelo fabricante.

3.3.2 Medição de força

Para a medição de força, o condicionador de sinais ClipX é conectado à célula de carga e envia a medição para o computador através da comunicação Ethernet ponto a ponto via endereço de IP estático. A área do bloco pontilhado A) do Apêndice A é detalhada no Apêndice B, que com o objetivo de manter uma infraestrutura mais flexível possível, foi necessário uma extensão de cabo e um conector externo ao painel para melhor manuseio da célula de carga durante a montagem do ensaio.

Assim, para efeitos de preservação da confiabilidade de leitura e compensação de temperatura da junta, o cabo de extensão da célula de carga inicia a seis fios levando a tensão de excitação necessária provida pelo ClipX até um dos lados do conector DB9 desenvolvido, o outro lado do conector então é conectado aos quatro fios à célula de carga. Além das conexões de ponte completa, é necessário a conexão do aterramento da malha de blindagem do cabo, pois sem ela a estabilidade de leitura fica comprometida devido ao ambiente suscetível à interferências eletromagnéticas na qual os cabos estão situados. Por fim, vale citar que o ClipX é alimentado utilizando 24Vcc existente no painel elétrico.

3.3.3 Dispositivo de aquisição

A ligação elétrica do dispositivo DAQ contida na área pontilhada B) do Apêndice A é detalhada no Apêndice C. Devido a adequação dos níveis de tensão e corrente do dispositivo, os sinais de máquina acionam as bobinas de relés 24Vcc [31], e os seus contatos chaveiam o sinal alto de 5Vcc provido pelo DAQ para as entradas digitais do mesmo.

Quanto ao acionamento digital das saídas, é necessário a utilização de um relé de interface no intermédio do acionamento [32]. Assim, o sinal de nível alto de 5Vcc aciona o relé de estado sólido de interface, o qual proporciona 24Vcc para as bobinas dos relés de acionamento. Tais dispositivos possuem contatos com maior capacidade de tensão e corrente, permitindo assim o envio do sinal de controle para o painel elétrico acionar a máquina/unidade hidráulica via contadores.

Por último, a saída analógica é ligada diretamente à unidade de controle eletrônico (EL6) da válvula proporcional, pois os dispositivos trabalham na mesma faixa de tensão de 0-10V. O único cuidado necessário na programação é direcionar o sinal do DAQ para ser sempre positivo, uma vez que sua faixa de trabalho é de +/-10V.

3.4 Calibração dos sistemas de medição

A calibração no departamento de Metrologia, em sua maioria, é efetuada através da comparação entre o sistema de medição a ser calibrado e um sistema de medição padrão previamente calibrado. Tal sistema padrão é acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Assim sendo, as canetas de medição de deslocamento foram calibradas dentro de sua faixa de utilização em uma máquina de medição universal de comprimento (ULM – *universal length measuring machine*), que oferece precisão de centésimos de micrômetro.

Para calibrar o sistema de medição de força, são utilizados uma prensa hidráulica e um conjunto de célula de carga padrão e indicador de força. Dessa forma, a célula de carga a ser calibrada passa a ser montada em série com a célula padrão para as duas

estarem sujeitas ao mesmo esforço. Assim, a célula de carga e o condicionador de sinais são calibrados através da prensa hidráulica dentro de sua faixa de medição de -8000N até 8000 N.

3.5 Desenvolvimento de Software

Considerando que o sistema será utilizado por um determinado operador, é fundamental a disponibilidade de uma interface gráfica entre homem e máquina que satisfaça os requisitos do processo e seja de simples interpretação.

São diversas as soluções de *software* para aquisição, processamento e geração de sinais. O *software* LabVIEW é uma dessas soluções, que se trata de um ambiente de desenvolvimento de instrumentação virtual através de diagrama de blocos, mantendo a programação em alto nível de abstração com o objetivo de simplificar a utilização de equipamentos de medição e geração de sinais. Neste trabalho, o LabVIEW 2017 foi utilizado para o desenvolvimento da programação do sistema e das interfaces. Para cada interface desenvolvida, uma VI (*Virtual Instrument*) é criada no LabVIEW. Uma VI é um ambiente programável composto de duas janelas, um painel frontal, que é a interface virtual que usuário final normalmente irá visualizar, e um diagrama de blocos, que é a programação de desenvolvida que roda por trás dos componentes do painel frontal.

3.5.1 Aplicação no sistema geral de medições

O *software* desenvolvido durante este trabalho está incluído como uma aplicação dentro da árvore do projeto de medições chamado de IMS - *Inspection and Measurement System* do departamento de Metrologia. O IMS possui o objetivo de centralizar os sistemas de medição desenvolvidos para possibilitar a reutilização de código, facilitar a manutenção quando necessário, assim como o controle de versionamento do programa através do uso de *Subversion*.

As aplicações que são desenvolvidas dentro do IMS podem usufruir de funcionalidades existentes como o registro de ações (log), atualização de versão de forma automática via rede, armazenamento temporário de informações (cache), barra de informações para disponibilização de mensagens ao usuário, comunicação com ERP e quatro idiomas de linguagem (português do Brasil, inglês, espanhol e chinês simplificado).

3.5.2 Bibliotecas de comunicação

Para possibilitar a correta comunicação com os equipamentos utilizados, foi necessário desenvolver bibliotecas de comunicação para os dispositivos com base nas notas de aplicação e/ou códigos de demonstração do fabricante.

3.5.2.1 Sensor de deslocamento

Para efetuar a comunicação com os sensores de deslocamento Red Crown 2, uma biblioteca de comandos seriais foi desenvolvida. Especificamente, a partir da seleção da porta de comunicação serial do dispositivo, é disponibilizado funções para efetuar a configuração inicial, abertura de comunicação, leitura instantânea de deslocamento, checagem da conexão, e fechamento de comunicação.

3.5.2.2 Condicionador de sinais

Na biblioteca de comandos TCP/IP desenvolvida para a comunicação com o ClipX, a partir da inserção do endereço IP estático do dispositivo e da respectiva porta de rede, é disponibilizada funções para conectar e desconectar o dispositivo, efetuar a leitura instantânea do sinal elétrico bruto, leitura da conversão direta em força (através da tabela de correspondência de tensão e força calibrada pelo fabricante), zeramento de força relativo (tara) e *reset* do zeramento de força.

Além das funções citadas, foi necessário desenvolver um procedimento para efetuar a pré-configuração do dispositivo, de forma similar ao que é oferecido via *web service* do equipamento, contudo com valores fixos estabelecidos pela aplicação. A execução desse procedimento de inicialização faz que qualquer ClipX conectado possua exatamente os mesmos parâmetros. As operações de configuração inicial realizadas são detalhadas a seguir:

- limpar zeramento de força (tara);
- atribuir conexão de transdutor em ponte completa (*full bridge*);
- definir sensibilidade de leitura em 2,5mV/V;
- atribuir utilização de filtro Bessel com frequência de corte em 10Hz;
- inserção da tabela de calibração com 5 pontos de tensão versus força fornecida pelo fabricante;

3.5.3 Desenvolvimento de interfaces e operação

Para possibilitar a operação do sistema, foram desenvolvidas algumas interfaces através do LabVIEW, respeitando o fluxo do processo e buscando trazer intuitividade para que o sistema tenha uma curva de aprendizado mais breve possível. Para isso, na Figura 25 é apresentada as opções de navegação das telas que são detalhadas a seguir.

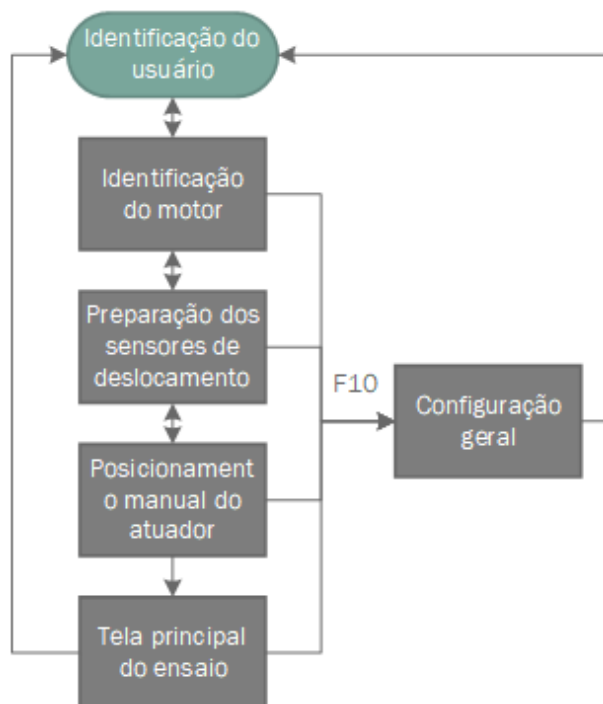


Figura 25 – Fluxograma de navegação entre telas de interface.

3.5.3.1 Identificação do usuário

A primeira tela do sistema apresentada na Figura 26 é composta por uma interface de identificação do usuário que irá operar o sistema. Isso se faz necessário para determinar quais interfaces o usuário tem acesso perante o nível do seu perfil (básico ou intermediário), assim como a rastreabilidade de ações tomadas vinculadas ao *login* através do *log*. A identificação ocorre através da leitura de código identificador único (*QR Code* ou *Data Matrix*) presente no seu crachá ou do login de rede individual da rede WEG. Por se tratar de uma operação comum entre as aplicações, o IMS já possui essa interface implementada.

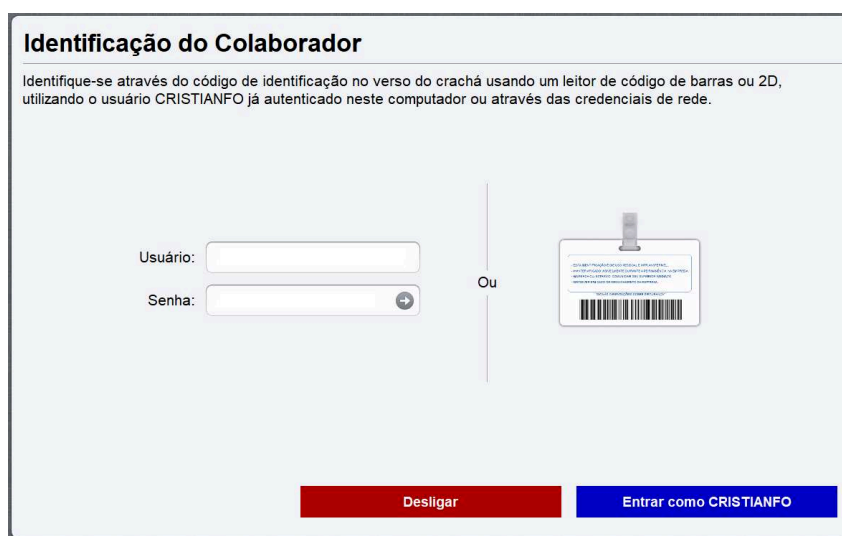


Figura 26 – Interface de identificação do usuário.

3.5.3.2 Configuração geral

Para flexibilizar a parametrização do processo, é imprescindível uma interface que possibilite aos usuários com perfil superior de acesso, a alteração de parâmetros e seleção do processo de medição a ser efetuado. Deste modo, se o usuário estiver logado, possuir privilégios suficientes e pressionar a tecla de atalho F10, a tela de configuração é apresentada. Ao salvar os parâmetros são gravados, e ao retornar o logout é efetuado e é apresentada a tela de identificação. Em seguida é apresentado as duas principais configurações a serem realizadas pelo usuário.

3.5.3.2.1 Configuração de parâmetros do processo

Para definir o ensaio a ser efetuado e alterar os parâmetros relativos ao mesmo, ao acessar a tela de configuração geral, o usuário deve selecionar o tipo de inspeção como “Análise da rigidez do rolamento através de inspeção de força”. Em seguida, conforme Figura 27, é apresentado ao usuário todos os dados parametrizáveis do processo, como endereços de comunicação, limites máximos permitidos de força e deslocamento, valor de incremento da rampa de tensão da válvula proporcional, e a faixa aceitável de zeramento dos sensores LVDT, detalhados a seguir:

- Tolerância para zeramento das canetas: faixa de deslocamento absoluta utilizada na tela de preparação dos sensores de deslocamento LVDT.
- Tolerância para zeramento da célula: faixa de força absoluta necessária para zeramento de força na célula no início do ensaio.
- Rampa de tensão da válvula: tensão que é incrementada por segundo na válvula proporcional durante o ensaio.
- Limite absoluto de força: Força máxima permitida durante a utilização do software.
- Limite absoluto de deslocamento: Deslocamento máximo permitido durante a utilização do software.
- Limite superior de força: É o limite superior que deve ser atingido ao efetuar o ensaio de tração e compressão.
- Limite inferior de força: É o limite inferior de força que o sistema atinge para trocar de estado entre tração, compressão e fim.
- Limite superior de tensão analógica de saída (AO): É a tensão máxima que a válvula proporcional pode atingir. É necessário por segurança caso leitura de força falhe durante o ensaio.

- Limite inferior de tensão analógica de saída (AO): É o limite inferior de tensão aplicada na válvula proporcional. Se faz necessário para ajustar a tensão que faz com que o sistema saia da inércia e realmente efetue força.

Configuração Geral

Opções: Tipo de inspeção ou monitoramento

Tipo de inspeção ou monitoramento: Análise da rigidez do rolamento através de

Endereço USB da caneta do eixo:

Endereço USB da caneta da tampa:

Endereço do transdutor de força:

Tol. para zeramento das canetas: 0,00 mm

Tol. para zeramento da célula: 0,00 kN

Rampa de tensão da válvula: 0,00 V/s

Limite absoluto da força: 0,00 kN

Limite absoluto do deslocamento: 0,00 mm

Lim. Sup. Força: 0 N

Lim. Inf. Força: 0 N

Lim. Sup. AO: 0,00 V

Lim. Inf. AO: 0,00 V

Voltar **Salvar**

Figura 27 – Aba de configuração dos parâmetros do processo.

3.5.3.2.2 Aquisição e geração de sinais através de tasks

Tasks são tarefas virtuais criadas para configurar as portas dos dispositivos que efetuarão a função aquisição ou geração de sinal. Entre as configurações, pode-se definir E/S das portas digitais, temporização, gatilho, contagem, frequência de amostragem, níveis máximos e mínimos do sinal, entre outras propriedades. Desse modo, cada porta ou conjunto de portas de E/S comum devem possuir ao menos uma *task* associada para seu correto funcionamento.

Em vista disso, um nome foi definido a cada função de aquisição ou geração a ser realizada, assim cada função é programada unicamente de forma *hard-coded* à *task* adequada. Dessa maneira, cabe ao usuário somente atribuir as funções com as portas disponíveis do dispositivo conforme a ligação elétrica efetuada.

Para isso, na tela de configuração geral, ao selecionar na primeira caixa de seleção a opção “Aquisição e geração de sinais”, é disponibilizado para o usuário as funções de geração ou aquisição de sinais cadastradas, a placa de aquisição detectada pelo sistema, as portas compatíveis disponíveis e a possível negação do sinal de entrada através do campo “Inverter saída”. Ao clicar em “+” a porta é atribuída à tarefa e os dados são inseridos na lista de funções associadas, conforme apresentado na Figura 28. Como exemplo, suponha que seja selecionado uma função para acionar a bomba hidráulica. No campo de seleção

das portas será apresentado somente as possíveis saídas digitais compatíveis que não utilizadas por outra função.



Configuração Geral

Opções: Aquisição e geração de sinais

Função: Botoeira vermelha

Placa de aquisição: USB-6009

Porta: Dev1/port0/line3

Inverter saída:

+

Lista de funções:

Função	Placa de aquisição	Porta
Botoeira verde (Invertida)	USB-6009	Dev1/port0/line0

Selecione "Função", "Placa de aquisição" e "Porta" e clique em "+" para acrescentar uma nova função na lista. Dê um duplo clique com o mouse sobre uma linha da lista para excluí-la.

Voltar Habilitar teste dos sinais Salvar

Figura 28 – Aba de configuração de aquisição e geração de sinais.

3.5.3.3 Identificação do motor

Para associar o ensaio ao motor elétrico, uma interface com capacidade de identificar unicamente o motor a ser ensaiado através da Ordem de Produção (OP) e do Número de Série (NS) providos pelas linhas de montagem é necessária. Nessa interface retratada na Figura 29, o usuário munido das folhas de produção interna que acompanham o motor, deve informar corretamente os campos requisitados para habilitar o avanço para a próxima tela. A validação se dá através da verificação se o NS pertence à OP presente no sistema ERP da WEG.

3.5.3.4 Preparação dos sensores de deslocamento

Como a caneta de medição LVDT possui retorno por mola, esta se encontra posicionada sempre no seu fundo de escala com erro máximo associado conforme a Equação (3.1). Uma tela que auxilie o operador a efetuar o posicionamento próximo da leitura central de $0 \mu m$ onde o erro é mínimo é desenvolvida para efetuar o posterior ensaio com leituras mais confiáveis possíveis.

Nesta etapa, é necessária efetuar a montagem do suporte metálico dos sensores ao motor conforme apresentado na Figura 31, conectar os sensores ao computador, posicioná-los dentro da faixa central de medição e efetuar a fixação dos mesmos no suporte. O avanço de tela só é habilitado quando as canetas estiverem posicionadas dentro da faixa parametrizável desejada ilustrada em verde na Figura 30.

Identificação do motor

Preencha todos os campos utilizando o teclado numérico e clique em avançar.

Ordem de produção: 0022420470

Número de série: 1050476169

Número do material: 14382699

MOTOR 110kW 2P 280S/M

Voltar Avançar

Figura 29 – Interface de identificação do motor.

Preparação dos sensores de deslocamento

Posicione os sensores de deslocamento dentro da faixa central de medição.

Sensor deslocamento eixo (μm)

Sensor deslocamento carcaça (μm)

Voltar

Figura 30 – Interface de preparação dos sensores de deslocamento LVDT.

3.5.3.5 Posicionamento manual do atuador

Para auxiliar a montagem do conjunto da célula de carga e haste do atuador ao eixo do motor a ser ensaiado, necessitou-se de uma interface que possibilite o operador efetuar pequenos incrementos ou decrementos de posição ao longo do curso da haste, uma vez que em repouso o atuador se encontra imóvel devido à forma construtiva da unidade hidráulica. Nessa interface mostrada na Figura 32, a movimentação do atuador só é disponibilizada a partir do momento que o usuário ligar a bomba hidráulica e não houver nenhum estado de falha na máquina, estado na qual será detalhado na tela principal de ensaio.



Figura 31 – Montagem do suporte metálico com os sensores de deslocamento.

Para a montagem mecânica dos dispositivos, primeiramente deve-se efetuar o recuo total do atuador com auxílio da interface e montagem prévia dos componentes conforme a Figura 33a. Após isso, o suporte metálico é fixado aos furos roscados da carcaça do motor e o conjunto acoplado a haste do atuador é avançado via interface até atingir a face do dispositivo localizado no eixo do motor. Por fim, este conjunto é fixado com parafusos ao dispositivo localizado no eixo do motor, resultando na Figura 33b. Ao finalizar a montagem do conjunto, o usuário deve avançar para a tela principal de ensaio.

3.5.3.6 Interface de ensaio

A tela principal de ensaio, apresentada na Figura 34, tem como objetivo efetuar o ensaio de tração e compressão gradualmente, disponibilizar um gráfico com curvas atualizadas a cada segundo ao usuário e, por fim, exportar o gráfico em formato de imagem e os pontos em formato de planilha para posterior análise.

Em condições ideais de operação, o usuário deverá acionar a bomba hidráulica e iniciar o ensaio através da interface. A partir desse momento, uma lógica de funcionamento automática é adotada pela interface e o usuário acompanha o status atual dos procedimentos pela barra de informações na parte inferior da página.

Considerando que o sistema acoplado mecanicamente contará com uma tensão mecâ-

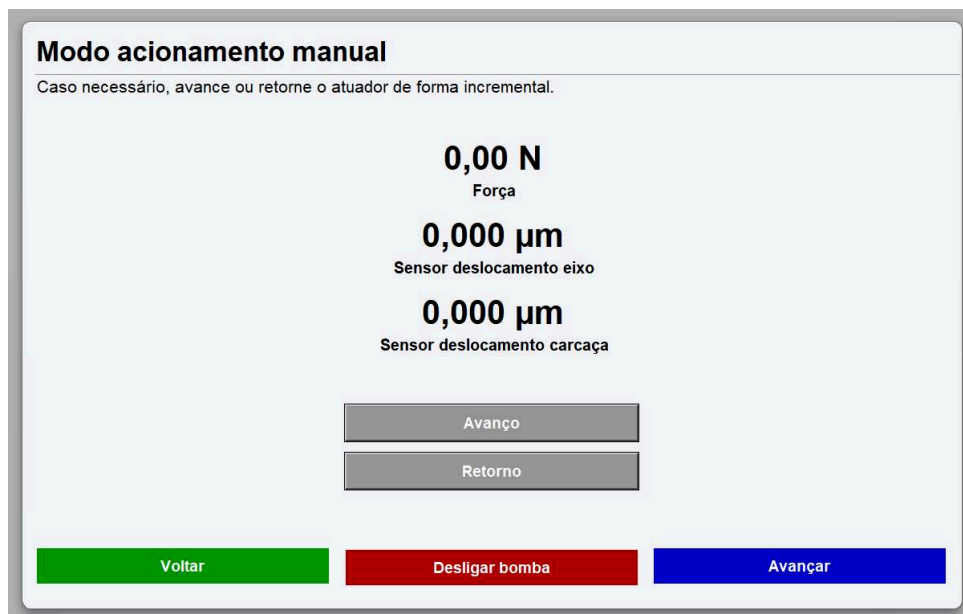


Figura 32 – Interface de acionamento manual do atuador.

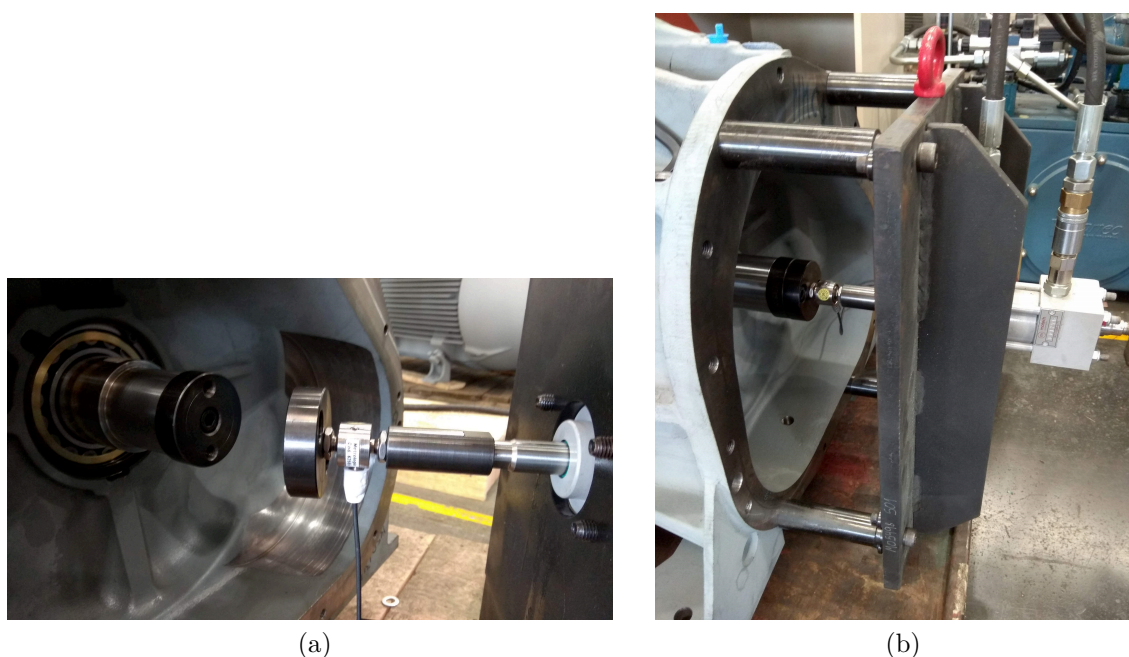


Figura 33 – Montagem mecânica do conjunto de medição e atuação de força. (a) Recuo do atuador e montagem prévia dos componentes. (b) Fixação do conjunto de célula de carga e haste do atuador ao eixo do motor, e do suporte metálico à carcaça do motor.

nica inicial, o primeiro procedimento efetuado pelo sistema é o zeramento da força lida pela célula de carga. Para isso, o sistema efetua força gradual no sentido contrário da força medida pela célula de carga até atingir a faixa central de zeramento que é parametrizável. Após a força lida estabilizar por 3 segundos dentro dessa faixa, é atribuído o zero relativo do ensaio. Em seguida, os pontos de força e deslocamento passam a ser

gravados no gráfico a cada incremento de força e o ensaio de compressão é liberado para inicialização.

Para efetuar o ensaio de compressão, o sistema começa aplicando força gradual no sentido de compressão através do acréscimo de tensão a cada segundo na válvula proporcional. Após atingir o limite superior de força ou máxima tensão de saída analógica, o sistema começa a etapa de alívio de compressão. Nessa etapa, a direção da força ainda continua no sentido de compressão, mas com o decréscimo de tensão na válvula proporcional. Conseqüentemente, ocorre o alívio de força, resultando em uma curva que tende a voltar ao ponto zero. Após a força atingir o limite inferior de força ou tensão analógica de saída, o ensaio de tração é iniciado.

Para o ensaio de tração, a direção da força é invertida através da válvula direcional e a lógica de funcionamento é análoga ao ciclo de compressão, com a diferença que os sinais lidos são negativos. Ao final do ciclo de tração, ao atingir a condição final de limite inferior, o ensaio é parado, as saídas controláveis são desligadas e o gráfico e a planilha de pontos são exportados. O título dos arquivos é formado pela data do ensaio, a ordem de produção e o número de série anteriormente gravados na tela de identificação do motor.

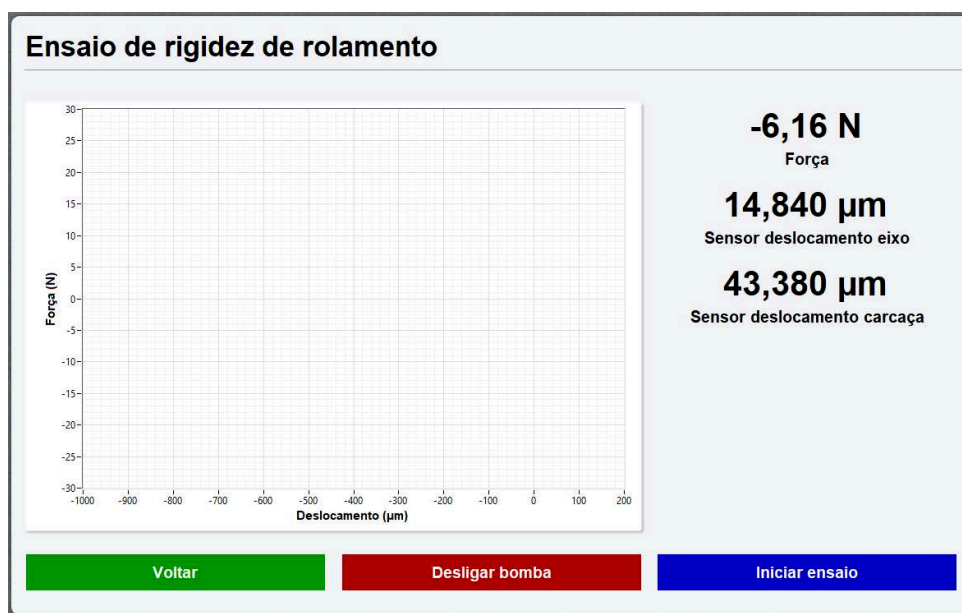


Figura 34 – Interface principal de ensaio.

3.5.3.6.1 Monitoramento de falhas

Entre suas funcionalidades, condições não ideais também são monitoradas. Conforme apresentado na Figura 35, abaixo dos indicadores de medição é mostrado ao usuário caso alguma condição de falha aconteçam ao longo do tempo, tais como:

- botão de emergência pressionado;

- disjuntor da bomba desligado;
- mau funcionamento do filtro hidráulico;
- erros de leitura dos sensores;
- limites excessivos de força ou deslocamento.

Todas essas causas produzem o efeito de parar eventuais ensaios e leituras, desligar a bomba hidráulica e a válvula direcional, zerar a tensão válvula proporcional e impedir o religamento do sistema até a falha desaparecer. Caso o desligamento da bomba não for bem sucedido - através da leitura da entrada digital de status da bomba -, o sistema acusa erro no desligamento através de mensagem na barra de informações.

O status da bomba hidráulica é constantemente monitorado e seu valor é atualizado no campo texto de seu botão de ligar/desligar. Para o botão da bomba ficar visível ao usuário, nenhuma condição de falha pode existir. O botão de início do ensaio só é habilitado caso a bomba esteja ligada.

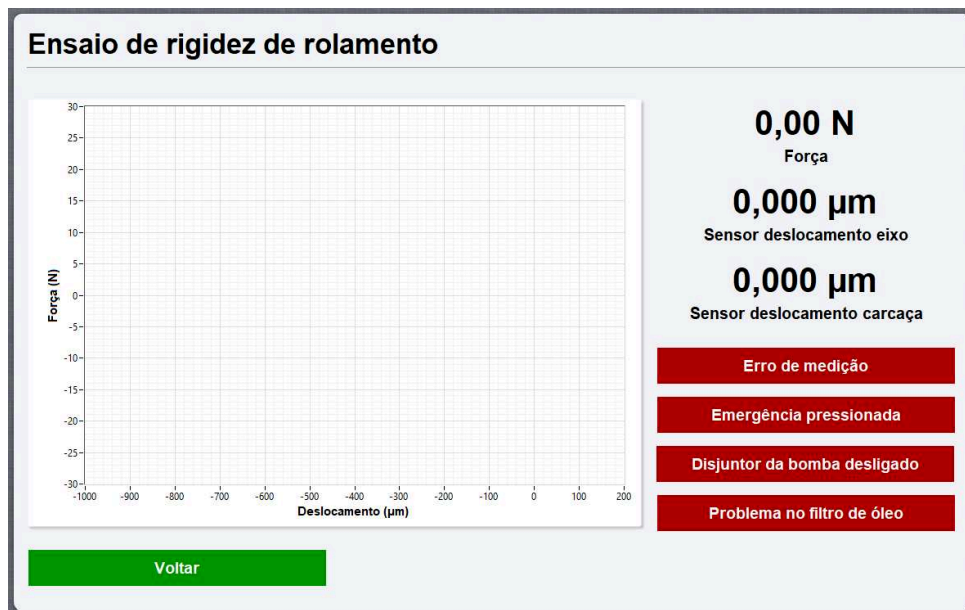


Figura 35 – Interface principal de ensaio com possíveis falhas.

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da execução do ensaio no sistema descrito no Capítulo 3. Inicialmente é apresentada a metodologia de ensaio, contendo a parametrização utilizada no sistema, a configuração de aquisição e geração de sinais, assim como o critério de aceitação a ser levado em conta para a análise das curvas. Posteriormente é apresentada uma discussão sobre os dados obtidos.

Na análise dos dados, os pontos adquiridos são expostos em formas de curvas, as quais são analisadas em duas formas. A primeira análise consiste na observação da linearidade das curvas de tração e compressão. A segunda forma é uma análise adicional através da observação do coeficiente angular da inclinação da curva, que pelo sentido físico após adequação das unidades, representa a rigidez mecânica em N/m .

Por último, são apresentadas as estatísticas de rigidez mecânica dos 34 ensaios efetuados, possibilitando determinar um comportamento médio do ensaio até o presente momento.

4.1 Metodologia do ensaio

4.1.1 Configuração do sistema

4.1.1.1 Parâmetros do processo

Os parâmetros de configuração geral do sistema proposto são apresentados na Figura 36. Os parâmetros relacionados a endereços de comunicação e limites de segurança são definidos conforme verificação dos endereços lidos pelo computador e pelas especificações de *hardware*, respectivamente. Porém, os parâmetros relacionados ao processo, tais como rampa de tensão, faixa de zeramento da célula de carga, e limite inferior de tensão de saída analógica, tiveram de ser definidos via testes em campo para conhecer até onde a dinâmica do sistema hidráulico suportava atender tais parâmetros (pré carga inicial do sistema, inércia, dentre outros fatores).

4.1.1.2 Aquisição e geração de sinais

Conforme citado na Seção 3.5.3.2.2 do Capítulo 3, é necessário configurar as portas do dispositivo DAQ para efetuar a aquisição e geração de sinais de acordo com a ligação elétrica do sistema. Para isso, efetuou-se a seleção de portas conforme o apresentado na Figura 37, a qual está de acordo com o esquemático de ligação elétrica do DAQ que foi desenvolvido em colaboração com o departamento de Ferramentaria, responsável pelo painel elétrico.

Configuração Geral

Opções: Tipo de inspeção ou monitoramento

Tipo de inspeção ou monitoramento: Análise da rigidez do

Endereço USB da caneta do eixo: COM3

Endereço USB da caneta da tampa: COM4

Endereço do transdutor de força: 192.168.0.99

Tol. para zeramento das canetas: 0,10 mm

Tol. para zeramento da célula: 0,30 kN

Rampa de tensão da válvula: 0,10 V/s

Limite absoluto da força: 8,50 kN

Limite absoluto do deslocamento: 1,00 mm

Lim. Sup. Força: 8000 N

Lim. Inf. Força: 100 N

Lim. Sup. AO: 9,50 V

Lim. Inf. AO: 4,00 V

Voltar Salvar

Figura 36 – Aba da tela de configuração geral contendo os parâmetros do sistema.

Função	Placa de aquisição	Porta
Botoeira verde	USB-6001	Dev2/port0/line0
Botoeira vermelha	USB-6001	Dev2/port0/line1
Botoeira azul	USB-6001	Dev2/port0/line2
Emergência (Invertida)	USB-6001	Dev2/port0/line3
Bomba hidráulica	USB-6001	Dev2/port0/line4
Disjuntor da bomba (Invertida)	USB-6001	Dev2/port0/line5
Acionar bomba hidráulica	USB-6001	Dev2/port1/line0
Retorno do cilindro	USB-6001	Dev2/port1/line1
Avanço do cilindro	USB-6001	Dev2/port1/line2
Controle da válvula proporcional	USB-6001	Dev2/ao0

Figura 37 – Lista de funções associadas às portas do dispositivo DAQ.

4.1.2 Critério para classificação do motor

O grande objetivo do sistema de medição é efetuar os esforços de tração e compressão e adquirir uma curva de força *versus* deslocamento. Posteriormente, a curva é analisada de forma visual pelo operador do sistema. Nesse processo de análise visual, o operador verifica se a curva obtida se assemelha à uma reta, confirmando a reação linear dos componentes rolantes fixados. Caso positivo, o motor é classificado como aprovado no ensaio e segue para as operações finais de fabricação.

Caso a curva não se assemelhe com uma reta e apresente reações não lineares, exemplificado pela Figura 38, a primeira ação a ser tomada é verificar os dispositivos do ensaio a fim de detectar folgas de fixação e repará-las quando necessário, então o ensaio é repetido. Na segunda vez que o sistema apresentar o mesmo comportamento de falha, o motor é classificado como reprovado e deve ser encaminhado para os colaboradores responsáveis pela revisão da fixação dos anéis de fixação dos rolamentos. Caso esse não seja o problema, a causa deve ser apurada por algum colaborador especializado do setor de engenharia.

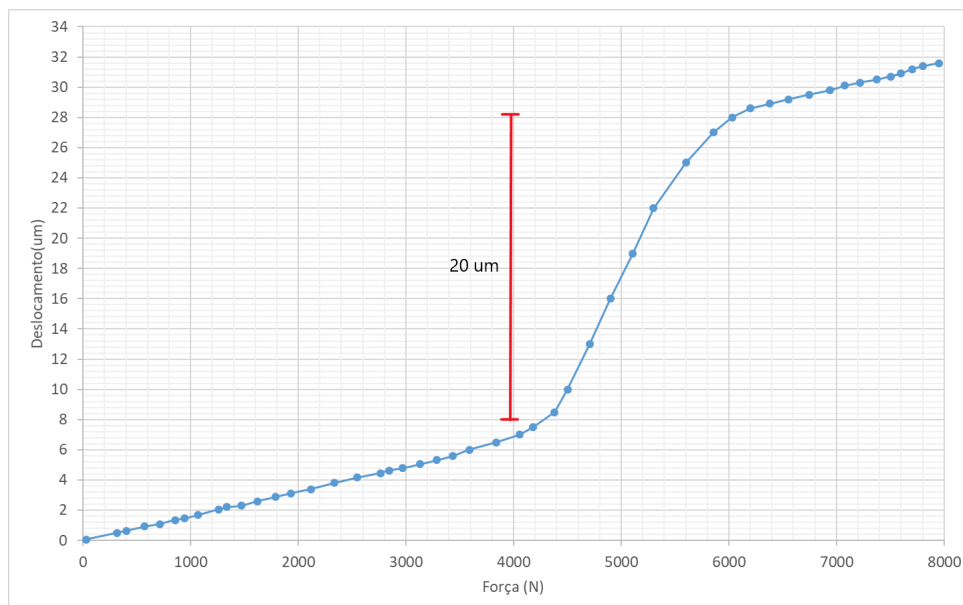


Figura 38 – Curva artificial ilustrando um comportamento não linear apresentando deslocamento excessivo.

4.1.3 Primeiro teste em meia carga

Por motivos de segurança, o primeiro ensaio efetuado teve seu parâmetro de limite de força exercido dividido pela metade. Dessa forma, utilizando-se das interfaces do *software*, primeiramente foi realizado a identificação do usuário e do motor, o posicionamento dos sensores LVDT, e posterior montagem do atuador e célula de carga conforme apresentado na Figura 39. Na tela principal de ensaio, as condições de falhas foram testadas através do disjuntor do motor, do botão de emergência, da desconexão dos sensores de medição e da diminuição da margem dos parâmetros de segurança.

Em seguida, ao eliminar as condições de falha, a bomba hidráulica foi ligada e o ensaio foi iniciado. Conseqüentemente, o sistema iniciou sua atuação automática realizando procedimentos de zeramento de força, compressão, alívio de compressão, tração, alívio de tração e exportação dos dados, resultando na tela apresentada na Figura 40. Essa tela, por se tratar de uma versão inicial do *software*, os eixos estavam em ordem inversa do requisitado, que foram posteriormente reposicionados. Nesse primeiro momento, foi possível efetuar a validação da lógica, de rotinas de segurança e de exportação de dados do *software* desenvolvido.

O gráfico obtido em primeiro momento foi conforme o esperado, demonstrando reação linear ao longo do ensaio de tração e compressão. Contudo, as análises das curvas são efetuadas utilizando a plena carga requisitada pelo processo demonstrado nas amostras descritas na próxima seção.



Figura 39 – Montagem e disposição do conjunto de ensaio.

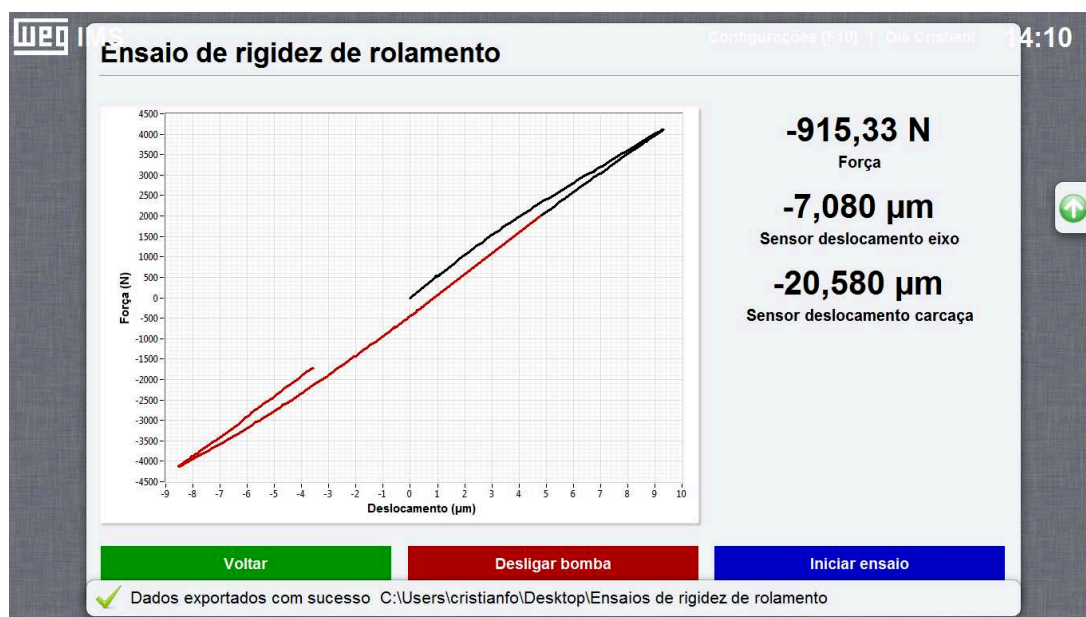


Figura 40 – Tela resultante do primeiro ensaio em meia carga.

4.2 Análise das curvas

Ao realizar o ensaio, conseguiu-se adquirir 34 amostras de motores idênticos exportadas pelo software que foram pós-processadas e classificadas em melhor caso, caso mais frequente e pior caso, apresentadas nas subseções seguintes.

As principais curvas de interesse são as curvas individuais de tração e compressão, onde há aumento de pressão. Por isso, as curvas de alívio não são analisadas, porém

estão presentes no sistema pois são de suma importância para aliviar as tensões no eixo do motor. Caso não houvesse um alívio gradual entre um regime de compressão e outro de tração, os efeitos indesejados poderiam ser amplificados.

4.2.1 Primeira amostra - Melhor caso

O gráfico representando os pontos das curvas exportados pelo *software* é apresentado na Figura 41, onde as primeiras observações são em torno das particularidades do sistema. Com exceção da compressão que começa do zero relativo, há espaços entre uma curva e outra. Entre a curva de alívio de compressão e o início da curva de tração isso fica evidente, apresentando no eixo de força aproximadamente $2000N$ entre um ponto e outro. Isso ocorre pois mesmo com o alívio total através dos comandos elétricos, a unidade hidráulica está ajustada fisicamente para fornecer um mínimo de força, representando a pré-carga existente no sistema hidráulico, sendo uma espécie de força necessária para vencer a inércia do atuador, muito evidente quando o sentido da força é alterado.

Em resumo técnico, quando a válvula direcional está acionada para algum dos sentidos, mesmo sem tensão na válvula proporcional, há uma espécie de *bypass* hidráulico fornecendo a força de pré-carga mínima. Somente quando a válvula proporcional oferece uma tensão acima de $4V$, é que o sistema começa realmente a efetuar força além da pré-carga. Por isso, o parâmetro de limite inferior da tensão de saída analógica informado na Figura 36 é de $4V$ para agilizar o processo de ensaio. Essa mesma analogia é válida para as posteriores amostras.

Voltando-se para a análise visual de linearidade da curva, observou-se que nesta amostra as curvas apresentaram um forte comportamento linear, baixa histerese mecânica, com alinhamento entre os ciclos de compressão e tração, deslocamento pico a pico de aproximadamente $27\mu m$ e distribuição homogênea dos pontos, demonstrando que houve a correta parametrização do processo. Além disso, percebe-se que o comportamento do conjunto de rolamentos ao exercer os esforços axiais desta amostra permaneceu linear e está de acordo com o esperado. Essa amostra apresenta um dos melhores resultados visuais.

Para efetuar uma análise adicional de rigidez mecânica através da inclinação das curvas, primeiramente é efetuado a regressão linear sobre as retas de interesse (compressão e tração) via *software* de planilhas Microsoft Excel, a regressão linear é um procedimento que obtém uma reta com coeficiente angular a e coeficiente linear b na forma

$$Y = aX + b \quad (4.1)$$

que melhor representa os pontos em questão. Sua representatividade é indicada pelo coeficiente de determinação R^2 , coeficiente que varia de 0 até 1, indicando em porcentagem quanto o modelo de reta consegue representar os valores observados. Devido à disposição

dos eixos do gráfico e das unidades de medida, a rigidez mecânica Rm é adquirida na forma de

$$Rm = \frac{1}{a} * 1.10^6 N/m \quad (4.2)$$

Realizando a análise dos valores de rigidez apresentados no gráfico da Figura 41, percebeu-se que os pontos foram muito bem representados pela reta oferecida via regressão linear através do coeficiente de determinação R^2 próximo de 1, demonstrando matematicamente a boa linearidade observada visualmente. O valor de rigidez mecânica de aproximadamente $6.10^8 N/m$ é uma das maiores rigidezes entre as amostras e será utilizado para comparação com as amostras subsequentes. Essa amostra é caracterizada como um ensaio aprovado.

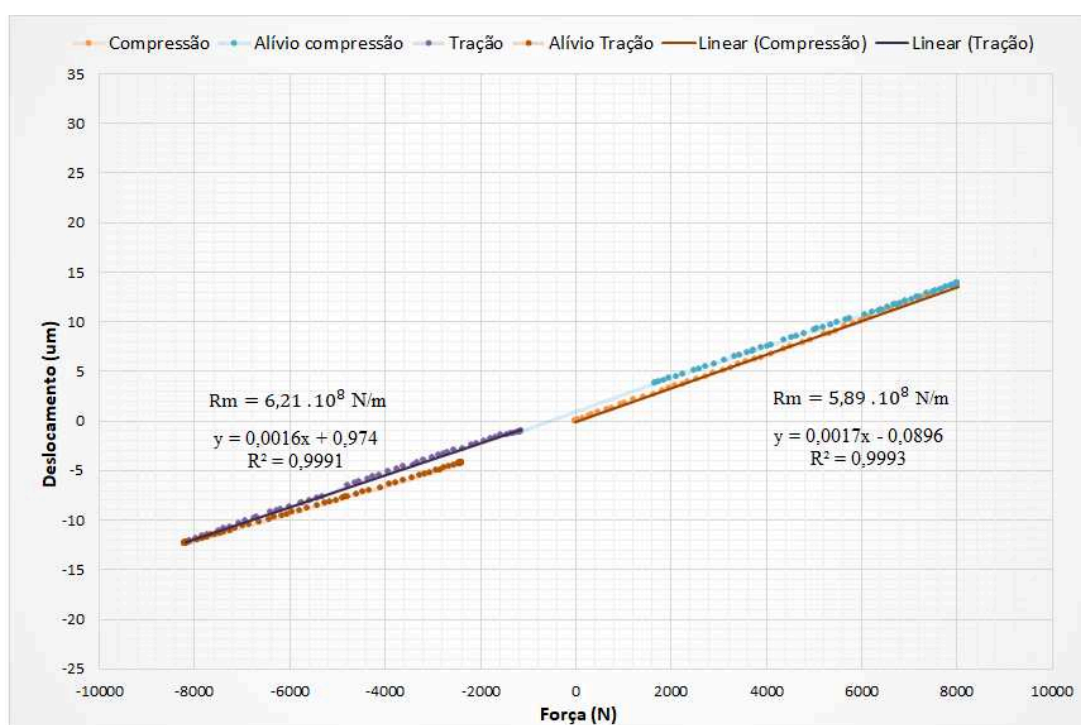


Figura 41 – Primeira amostra contendo as curvas dos regimes de tração e compressão dos pontos exportados pelo software.

4.2.2 Segunda amostra - Caso mais frequente

Na segunda amostra cujo resultado é apresentado na Figura 42, observa-se que o ciclo como um todo possui uma histerese maior. As curvas em geral possuem algum desalinhamento e a inclinação menor das curvas fez com que houvesse um deslocamento maior de pico a pico se comparado a primeira amostra ($35\mu m$). Entretanto, as curvas de tração e compressão são aproximadamente lineares.

Em sequência, analisando o valor da rigidez mecânica dos regimes de compressão e tração, observa-se que apesar da análise visual acusar certa divergência entre o esperado, a análise individual das curvas de interesse apresenta uma linearidade adequada, e segundo

a regressão linear efetuada, há uma boa representatividade dos pontos, e uma rigidez mecânica aproximada de 4.10^8 N/m , equivalente a $\frac{2}{3}$ da rigidez do melhor caso. Portanto essa amostra é caracterizada como um ensaio aprovado.

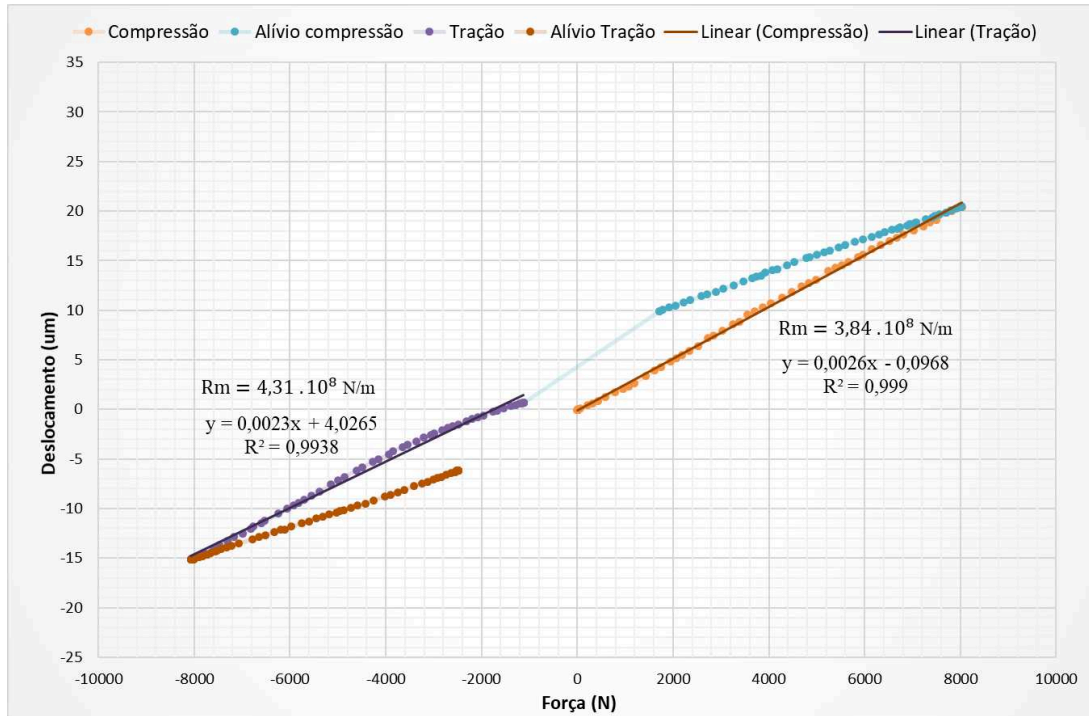


Figura 42 – Segunda amostra contendo as curvas dos regimes de tração e compressão dos pontos exportados pelo software.

4.2.3 Terceira amostra - Pior caso

No resultado apresentado na Figura 43 referente à terceira amostra, as curvas de tração e compressão estão alinhadas e apresentam linearidade. Porém, a principal observação é a inclinação diferente na curva de compressão apresentando baixa rigidez mecânica se comparada com as outras amostras, efeito que faz com que o deslocamento pico a pico fique cerca de 70% maior ($50\mu\text{m}$) do que a segunda amostra. Entretanto, mesmo que o deslocamento absoluto seja grande, a reação dos componentes continua linear e portanto o ensaio é caracterizado como aprovado.

4.2.4 Compilação de rigidez mecânica das amostras de ensaio

Para melhor visualização, compilou-se o resultado dos 34 ensaios efetuados até então, para aplicação de ferramentas gráficas que possam demonstrar algum comportamento em comum dos mesmos.

Dessa forma, a Figura 44 apresenta um gráfico de linha dos valores de rigidez mecânica nos regimes de compressão e tração contendo também a média dos valores. Nesse

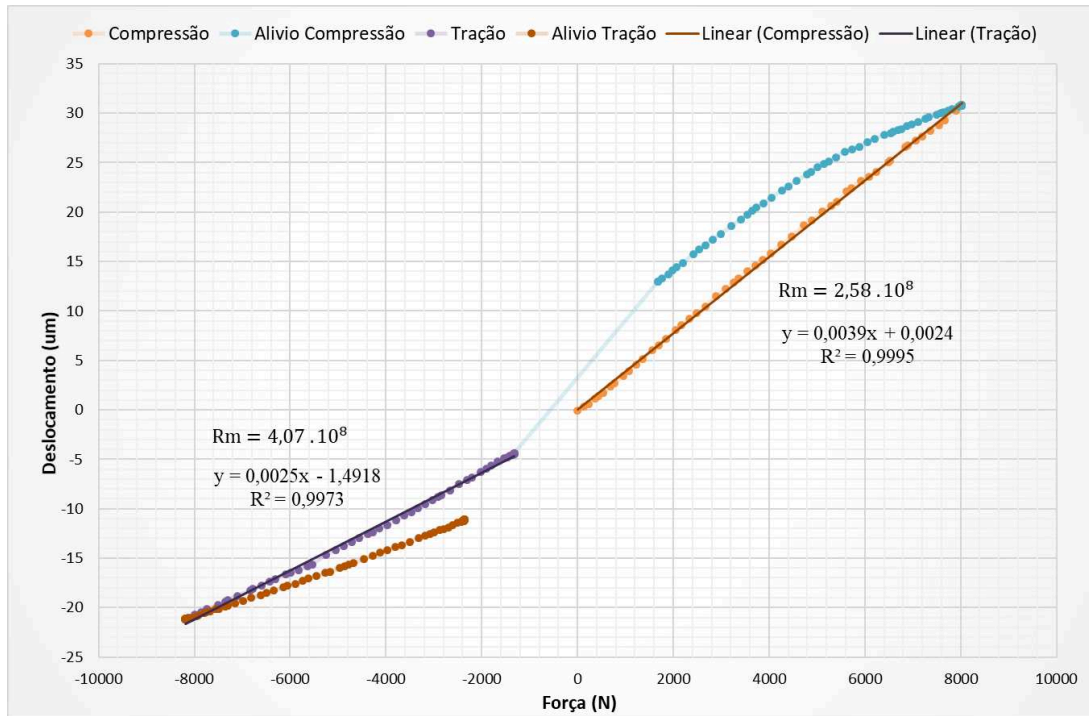


Figura 43 – Terceira amostra contendo as curvas dos regimes de tração e compressão dos pontos exportados pelo software.

gráfico é perceptível alguns pontos acima e abaixo da média, contudo observa-se um comportamento comum com o valor médio da rigidez mecânica de tração e compressão em aproximadamente $4,5 \cdot 10^8 \text{ N/m}$. Por isso, a segunda amostra é classificada como o caso mais frequente, grande responsável pela média dos valores. O melhor caso e pior caso são pontos acima e abaixo da curva de média que acontecem usualmente entre as amostras.

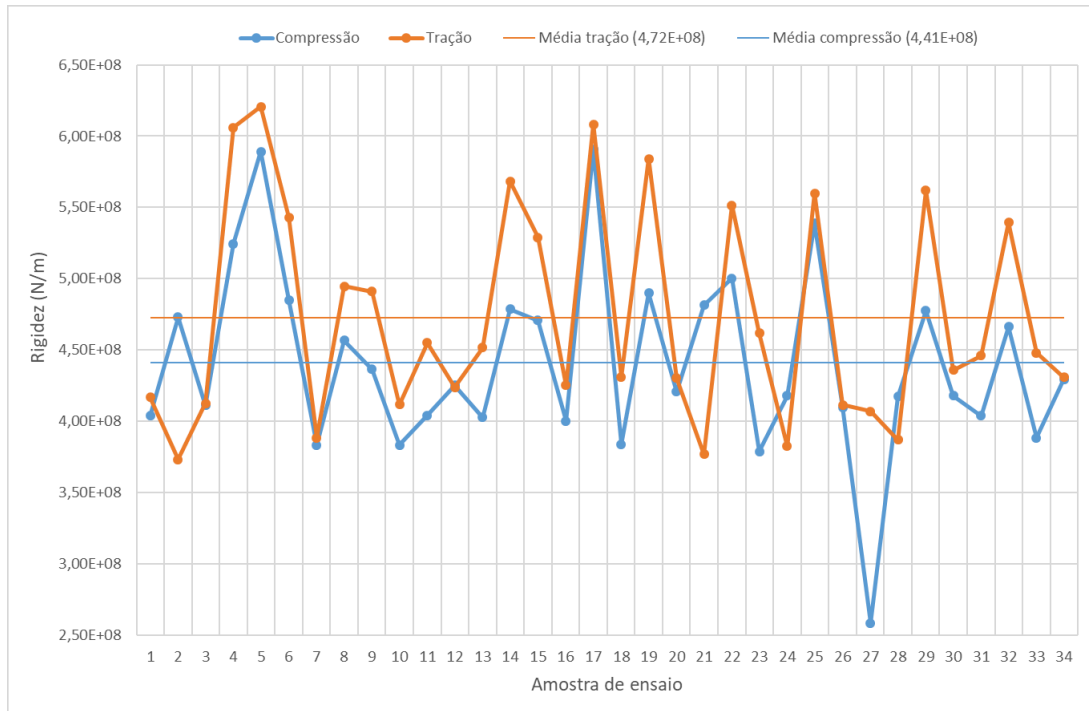


Figura 44 – Gráfico de linha contendo a rigidez apresentada nas amostras adquiridas e a média de cada regime.

4.2.5 Possíveis causas dos casos marginais

Ainda que as curvas de interesse possuam a linearidade desejada, os efeitos observados nas amostras podem advir de diversas causas, tais como: pré-carga do conjunto de rolamentos diferente, tempo de acomodação e elasticidade mecânica, folga na montagem dos dispositivos de ensaio, diferenças de dimensão do alojamento do rolamento e a ausência de um ajuste fino na unidade hidráulica.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de medição de rigidez de rolamentos de motores. O sistema proposto gera uma curva de força *versus* deslocamento, permitindo que o operador valide adequadamente a qualidade da fabricação e principalmente da montagem dos rolamentos do motor sob análise.

Na pesquisa realizada, para realizar a integração de *hardware* e *software* necessária para atingir os objetivos, foi necessário estudar os dispositivos industriais disponíveis, os requisitos do processo e do cliente e trabalhar com múltiplas equipes. Assim, foi possível conceber um fluxo de processo e conseqüentemente idealizar as interfaces gráficas e bibliotecas necessárias para atender a demanda do projeto e da empresa WEG.

Ao implementar e lidar com o sistema desenvolvido de inspeção de rigidez de rolamento em campo, percebeu-se que a disponibilização dos parâmetros para o usuário torna o sistema robusto e flexível. As interfaces navegáveis foram funcionais, instrutivas e objetivas, e nesse sentido, a tela principal de ensaio ofereceu segurança potencial tanto ao usuário quanto ao *hardware* disponibilizado. Com os ajustes iniciais de parâmetros efetuados em campo, verificou-se que o sistema desenvolvido em LabVIEW foi capaz de realizar o ensaio, apresentando curvas de tração e compressão, e posterior exportação dos dados para o computador do usuário de forma eficiente.

Ao analisar as amostras gerados pelo sistema, verificou-se que as curvas apresentam formas similares, mas dispostas em regiões ligeiramente diferentes devido as causas particulares do motor ensaiado e/ou do sistema. Analisando individualmente somente as curvas de tração e compressão, verificou-se que todas as amostras são aceitas pelo critério ao apresentarem reação linear mediante os esforços realizados. Diante da aprovação de todas as amostras, deve ser estudado pelo requerente do projeto se somente o critério de aceitação visual será o suficiente e se ele não está sobredimensionado. Por se tratar de um motor de médio porte, foi inviável efetuar o ensaio com um motor com rolamentos soltos a fim de simular um rolamento problemático, e portanto não foram encontradas amostras problemáticas utilizando os motores devidamente montados em estado final de produção.

A um passo além da análise visual, foi proposto uma análise da inclinação da curva, que fisicamente representa a rigidez mecânica no trecho. Nessa análise pode-se averiguar casos que apresentavam linearidade, contudo com baixa rigidez mecânica. Sugere-se que esse efeito deve ser registrado para futura avaliação, caso o critério de aceitação venha a ser complementado.

Após a execução deste trabalho, percebeu-se que o tempo de preparação e o tempo de análise posterior são as etapas que mais demandam tempo de mão de obra. Como oportunidades para trabalhos futuros, sugere-se a análise automatizada da linearidade da

curva de força *versus* deslocamento para eliminar a subjetividade da aprovação visual ou o trabalho de análise manual, bem como o desenvolvimento de um sistema mecânico de encaixe rápido para a montagem necessária. Este projeto foi voltado para a aprovação de um único lote, contudo caso se torne um ensaio de linha, essas sugestões devem se tornar prioridade.

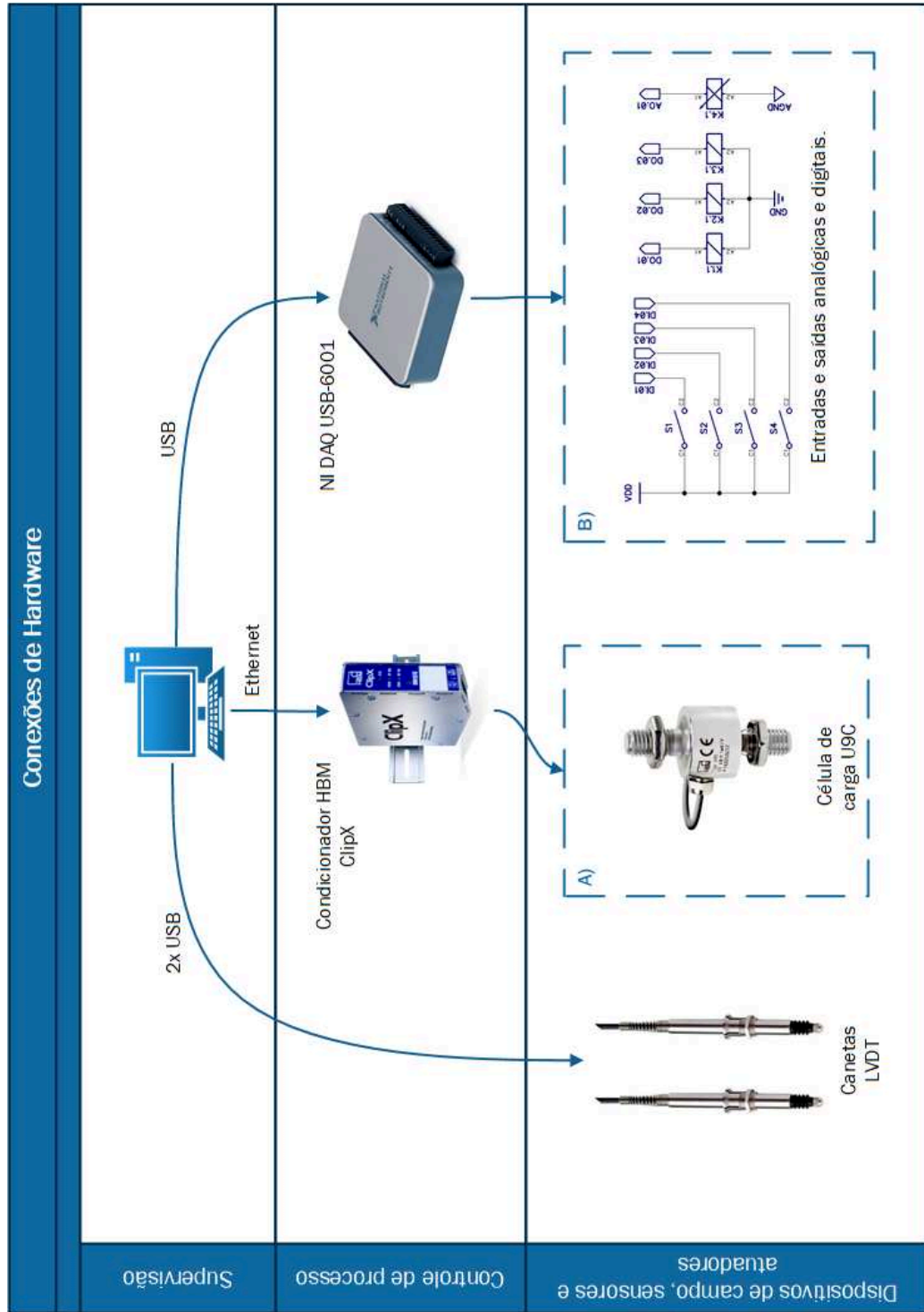
Referências Bibliográficas

- 1 FRANCISCO, A. M. S. *Motores de Indução Trifásico*. 2006. Portugal: Editora ETEP. 11p. Apostila.
- 2 REZENDE, P. H. O.; BISPO, D. Análise econômica em motores de indução trifásicos. *Horizonte Científico*, v. 9, n. 1, 2015.
- 3 CARDOSO, R. B. et al. Avaliação da economia de energia, atribuída a ações de etiquetagem energética, em motores de indução no brasil. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, n. 1, p. 29–47, 2009.
- 4 KREUTZFELD, S. et al. *Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução pelo método dos elementos finitos*. 1–2 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.
- 5 PIRES, W. d. I. et al. *Estudo do comportamento das perdas no ferro em motores de indução alimentados por conversores de frequência*. 1–2 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- 6 FEIGENBAUM, A. *Total Quality Control*. McGraw-Hill, 1983. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2DgQjwEACAAJ>>.
- 7 NETO, J. J. d. C. et al. Identificação e classificação de defeitos em rolamentos a partir de um andrômetro. Blumenau, SC, 2019.
- 8 Mistry, R. et al. Influencing factors on motor vibration and rotor critical speed in design, test and field applications. In: *2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 227–236.
- 9 CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. 307-314 p.
- 10 PETRUZELLA, F. *Electric Motors and Control Systems*. McGraw-Hill Higher Education, 2015. ISBN 9781259335143. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=g4pzCgAAQBAJ>>.
- 11 PETRUZELLA, F. *Motores Elétricos e Acionamentos: Série Tekne*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. 131-134 p.
- 12 GUIA de especificação de motores. WEG S.A., 2019. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2019.
- 13 ROLAMENTOS de rolos cilíndricos. NSK, 2019. Disponível em: <<http://www.nsk.com.br/rolamentos-de-rolos-cilindricos-serie-emm-vs-2803.htm>>. Acesso em: 14 out. 2019.

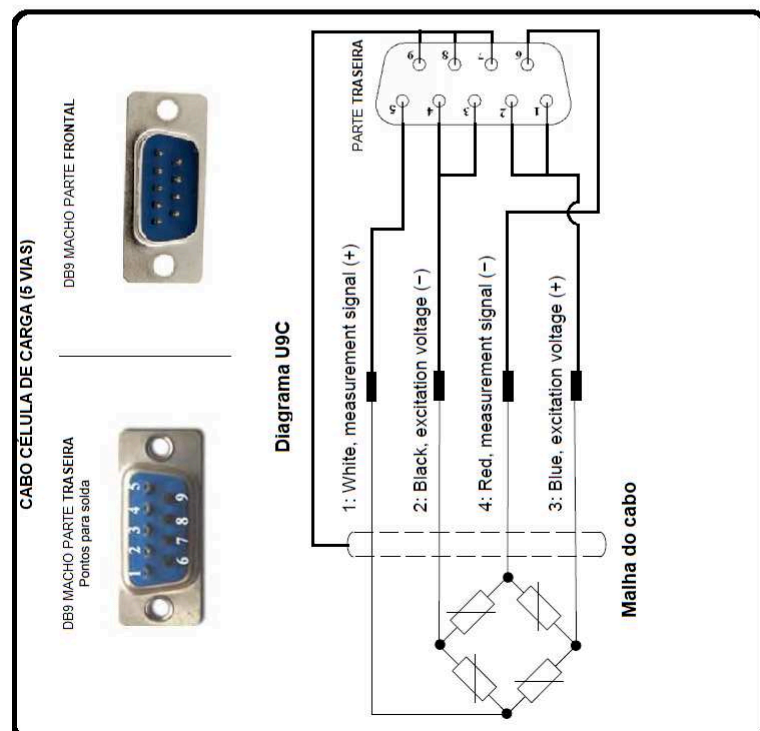
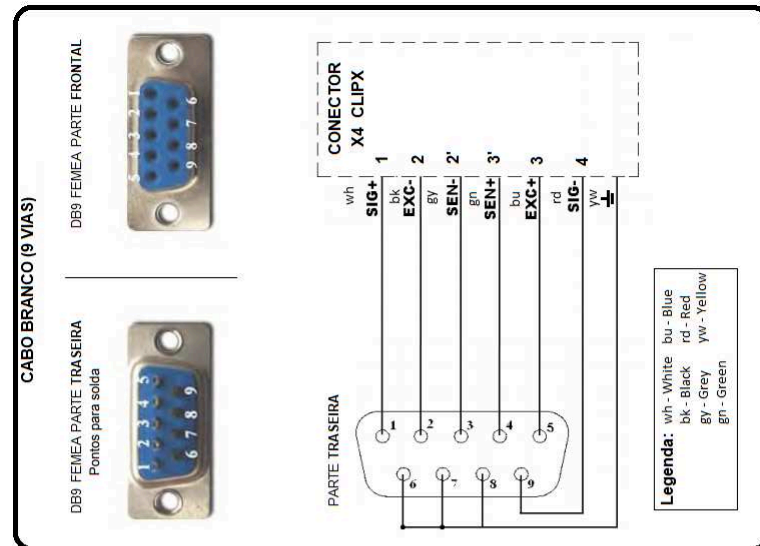
- 14 ANGULAR contact ball bearings. SKF, 2019. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/index.html>>. Acesso em: 14 out. 2019.
- 15 ANGULAR contact ball bearing combinations. NSK, 2019. Disponível em: <http://nsk.com.br/upload/file/NSK_CAT_E1254f_148-151.pdf>. Acesso em: 14 out. 2019.
- 16 O que é sistema hidráulico. Hennings, 2019. Disponível em: <<http://www.hennings.com.br/noticia/leo-explicao-que-e-sistema-hidraulico/>>. Acesso em: 25 out. 2019.
- 17 MEASURING position and displacement with LVDTs. National Instruments, 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-position-and-displacement-with-lvdt.html>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- 18 BÁSICO sobre medição de deformação. National Instruments, 2019. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6896/nocoes-basicas-de-medicao-de-deformacao/>>. Acesso em: 20 out. 2019.
- 19 MEDIÇÕES de deformação com Strain Gages. National Instruments, 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/07/measuring-strain-with-strain-gages.html>>. Acesso em: 20 out. 2019.
- 20 COMO uma célula de carga trabalha. HBM, 2019. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>>. Acesso em: 27 out. 2019.
- 21 O que é aquisição de dados. National Instruments, 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso em: 27 out. 2019.
- 22 OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. *Discrete-Time Signal Processing: Pearson New International Edition*. Pearson Education Limited, 2013. 15 p. ISBN 9781292038155. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=LLupBwAAQBAJ>>.
- 23 HBM - HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. *U9C Force Transducer - Datasheet*. [S.l.], 2019. Rev. 1.1. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/3926/celula-de-carga-u9c-para-forcas-de-tracao-e-compressao/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- 24 GUCKES, M. *Measurement Technology 4.0 – Optimize Your Production Processes*. Darmstadt, Germany, 2019. 3 p. Disponível em: <<https://www.hbm.com/en/7262/white-paper-measurement-technology-with-clipx/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- 25 HBM - HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. *ClipX Industrial Amplifier Datasheet*. [S.l.], 2019. Rev. 1.0. Disponível em: <<https://www.hbm.com/en/7077/clipx-precise-industrial-signal-conditioner/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- 26 MARPOSS. *Red Crown 2 U10*. [S.l.], 2018. Rev. 1.0. Disponível em: <<https://www.marposs.com/eng/product/lvdt-hbt-usb-and-digitized-probes>>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- 27 ARGO HYTOS. *Datasheet - Unidade de controle eletrônico digital plug-in EL6*. [S.l.], 2016. Rev. 1. Disponível em: <https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Datasheet_EL6_ha9150_EN.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2019.

- 28 ARGO HYTOS. *Datasheet - Válvula de controle proporcional SR4P2-B2*. [S.l.], 2019. Rev. 2. Disponível em: <https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Datasheet_SR4P2-B2_ha5117_EN.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- 29 USB-6001. National Instruments, 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6001.html>>. Acesso em: 17 nov. 2019.
- 30 NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USB-6001 - Low-Cost DAQ USB Device*. [S.l.], 2014. Rev. 1. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/manuals/374369a.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- 31 WEG. *Borne relé BTWR P16E26 NA E NF*. [S.l.], 2016. Rev. 9. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb6/h0d/WEG-bornes-linha-btw-50022910-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2019.
- 32 PHOENIX CONTACT. *Borne relé de interface 5V DC NA*. [S.l.], 2018. Rev. 1. Disponível em: <<https://www.phoenixcontact.com/online/portal/br?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2980241&library=brpt&tab=1>>. Acesso em: 18 dez. 2019.

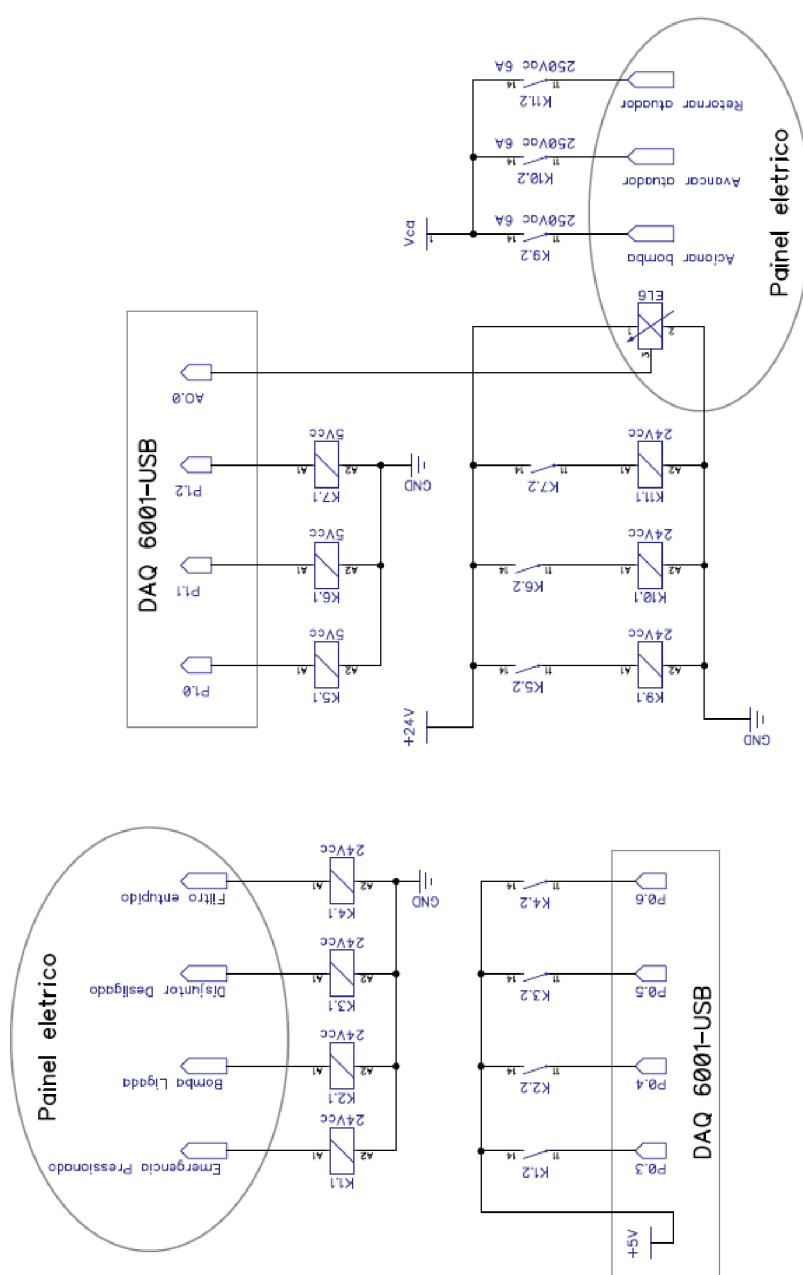
A Conexões gerais de hardware



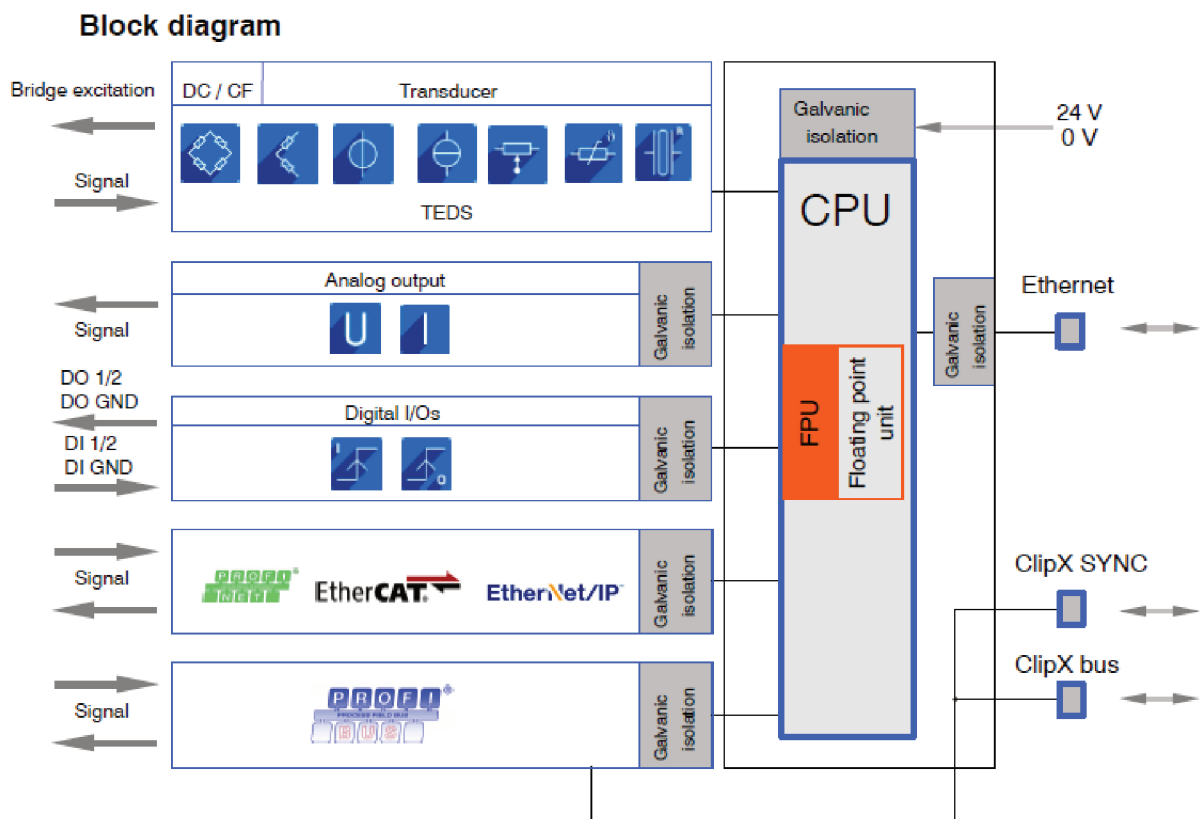
B Conexões de hardware da célula de carga



C Esquema elétrico da conexão do dispositivo DAQ com o painel elétrico



D Diagrama de Blocos e isolamento elétrica do ClipX



Fonte: [25]