

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

JULIO CESAR FRONCZAK

**CONFIGURAÇÃO DE UM DINAMÔMETRO PARA TESTES DE EFICIÊNCIA E
DESEMPENHO EM MOTORES DE INDUÇÃO ATÉ 10 CV**

Joinville

2022

JULIO CESAR FRONCZAK

**CONFIGURAÇÃO DE UM DINAMÔMETRO PARA TESTES DE EFICIÊNCIA E
DESEMPENHO EM MOTORES DE INDUÇÃO ATÉ 10 CV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro tecnológico de Joinville.

Orientadora: Dra. Aline Durrer Patelli Juliani

Joinville

2022

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, irmãos, namorada e toda minha família. Agradeço também à todas as pessoas que de alguma forma participaram deste meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Tenho eterna gratidão a minha família, que sempre me apoiou mesmo nos momentos mais difíceis dessa trajetória, sempre me trazendo uma forma melhor de enxergar a solução de para certos problemas. E hoje consigo concluir este trabalho graça a ajuda de todos.

Aos meus pais Ivete e Mario, que me deram suporte e nunca me deixaram faltar nada, me ensinando o real valor do trabalho e da educação para a vida toda. Me mostraram que ninguém está acima de ninguém, e que sempre que almejar algo maior, com esforço e dedicação a conquista será certa.

Agradeço a meus irmãos Paulo e Ana, que participaram na formação da pessoa que me tornei e a quem eu sempre pude recorrer, nem que fosse apenas para uma conversa rápida.

A minha namorada Beatriz, que mesmo durante longos anos, no decorrer deste trabalho, foi compreensiva nos momentos em que não pude estar presente.

Tenho muita gratidão a professora Aline Durrer Patelli Juliani, minha orientadora, por toda paciência que teve comigo durante todos esses anos, e por nunca ter desistido de me orientar e me ajudar até a conclusão deste ciclo.

Aos professores Diego Santos Greff e Dalton Luiz Rech Vidor, por terem aceitado o convite de participar de minha banca avaliadora e disponibilizarem seu tempo para este momento importante em minha vida.

Por fim agradeço a todos meus amigos, professores e pessoas que de alguma forma, boa ou ruim, participaram do meu caminho e tiveram alguma ação para chegar onde estou.

RESUMO

Sabe-se que grande parte da energia consumida no Brasil e no mundo vem do uso de motores elétricos de indução, principalmente no meio industrial. Neste cenário, é imprescindível evitar ao máximo o desperdício de energia que é consumida por essas máquinas. Uma das formas de amenizar este processo é o projeto de motores elétricos bem dimensionados e eficientes, onde sejam atendidos os requisitos da atividade para a qual estes equipamentos foram destinados. Entre as normas e regulamentações criadas para este desenvolvimento, a principal delas diz respeito a eficiência na fabricação de motores elétricos. O dinamômetro é um equipamento criado para a medição de torque e potência de motores elétricos, nele a máquina é testada e traz como resultado o desempenho do motor, através da análise da curva de torque *versus* velocidade, potência *versus* velocidade e a eficiência é obtida pelo cálculo das potências mensuradas. Este trabalho apresenta os principais dispositivos que configuram uma bancada de dinamômetro, sendo mostradas as suas funcionalidades e o propósito de sua escolha para o sistema. Modelos de equipamentos são propostos para a confecção de uma bancada de dinamômetro, considerando as suas principais especificações e aplicação em laboratório de pesquisa, para máquinas de até 10 CV. Além disso, alguns protocolos de comunicação possíveis de serem utilizados são apresentados.

Palavras-chave: Dinamômetro. Motor elétrico de indução. Eficiência.

ABSTRACT

It is known that much of the energy consumed in Brazil and in the world comes from the use of induction electric motors, mainly in the industrial environment. In this scenario, it is essential to avoid, as much as possible, the waste of electric energy in these machines' applications. This process is facilitated through well-sized and efficient electric motors, which could attend to the project requirements. Among the norms and regulations created for this development, the main one concerns the efficiency of manufactured electric motors. The dynamometer is equipment created to measure the torque and power of electric motors. The results are related to the motor performance: through the analysis of the torque versus speed curve, power versus speed, and the efficiency is calculated using the measured powers. This work presents the main devices that configure a dynamometer bench, showing their functionalities and the purpose of their choice for the system. Equipment models are proposed to manufacture a dynamometer bench, considering its main specifications and application in a research laboratory, for machines of up to 10 CV. In addition, some communication protocol suggestions are presented.

Keywords: Dynamometer. Electric Induction Motors. Efficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático do freio de Prony.....	16
Figura 2 – Exemplo de dinamômetro de histerese.....	17
Figura 3 – Quadrantes dos modos de operação do dinamômetro.....	18
Figura 4 – Exemplo de bancada de dinamômetro elétrico.....	19
Figura 5 – Estator do motor indução trifásico.....	20
Figura 6 – Rotor gaiola de esquilo.....	21
Figura 7 – Rotor bobinado.....	21
Figura 8 – Conjugado induzido em um motor de indução.....	22
Figura 9 – Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução.....	26
Figura 10-a) Campos magnéticos de um motor de indução sob condições de carga leve. 10-b) Campos magnéticos de um motor de indução sob condições de carga pesada.....	29
Figura 11 – a) Gráfico corrente do rotor I_R x Velocidade; b) Gráfico $B_{líq.}$ x Velocidade; c) Gráfico $\cos \theta_R$ x Velocidade e d) Gráfico Conjugado T_{ind} x Velocidade.....	31
Figura 12 – Gráfico Conjugado x Velocidade.....	32
Figura 13 a) – Curvas características de conjugado versus velocidade para velocidades abaixo da velocidade base. b) Curvas características de conjugado versus velocidade para velocidades acima da velocidade base e c) Curvas características de conjugado versus velocidade para todas as frequências.....	34
Figura 14 – Conversor em ponte completa.....	38
Figura 15 – Tensão na saída com forma de onda quadrada e forma de onda da corrente no estado estável para uma carga RL.....	39
Figura 16-a) Inversor em ponte completa usando IGBTs; b) Corrente no estado estável para uma carga RL.....	41
Figura 17 – Inversor em meia ponte usando IGBTs.....	41
Figura 18–Inversores com configurações trifásicas a) Fonte de tensão b) Fonte de corrente..	42
Figura 19–a) Inversor trifásico; b) Sequência de chaveamento para os seis degraus na saída.	43
Figura 20 – Tensão de linha a linha na saída.....	43
Figura 21 – a) tensão por fase para uma carga conectada em estrela não aterrada; b) corrente na fase A para uma carga RL.....	44
Figura 22 – Formas de onda da tensão na saída e forma de onda da corrente para uma carga RL.....	46

Figura 23 – <i>Strain gauge</i> e a influência de forças externas sob a resistência do condutor.....	48
Figura 24 – Exemplo de eixo de medição de torque.....	49
Figura 25 – Flange de medição de forma simplificada.....	49
Figura 26 – Emissor, receptor e disco com marcações.....	51
Figura 27 – Disco de resolução de <i>encoder</i>	52
Figura 28 – <i>Encoder</i> óptico incremental com sinais “A”, “B” e “O”.....	52
Figura 29 – Posição dos sinais “A” e “B” conforme o sentido de giro do <i>encoder</i>	53
Figura 30 – Disco com e sem sinal de sincronismo.....	53
Figura 31 – Discos de <i>encoders</i> absolutos.....	54
Figura 32 – Modelo de IHM.....	57
Figura 33 – Exemplo de modelo de resistor de frenagem.....	62
Figura 34 – Circuito simplificado do inversor com o resistor de frenagem instalado.....	64
Figura 35 – Acoplamento elástico – tipo estrela.....	66
Figura 36 – Exemplo de mesa coordenada.....	68
Figura 37 – Especificações técnicas do motor WEG – W22 – 15CV.....	69
Figura 38 – Motor que funciona como carga dinâmica no dinamômetro, modelo W22.....	69
Figura 39 – Inversor de frequência Danfoss – FC 301.....	71
Figura 40 – Esquemático de fiação básica do inversor FC 301.....	72
Figura 41 – Diferentes versões de acoplamento do <i>encoder</i> B58N.....	73
Figura 42 – Formato do sinal – <i>encoder</i> B58N.....	74
Figura 43 – Transdutor de torque T22 – 200Nm.....	75
Figura 44- Exemplo de instalação do transdutor para teste.....	76
Figura 45 – Resistor de frenagem Danfoss – MCE 101.....	77
Figura 46 – Dados técnicos do resistor de frenagem proposto – MCE 101.....	78
Figura 47 – Exemplo de interface da tela do CW500.....	79
Figura 48 – Exemplo de modo de exibição das grandezas no CW500.....	79
Figura 49 – Conexões CW500.....	81
Figura 50 – Acoplamento instalado no eixo do motor em teste e transdutor de torque.....	82
Figura 51 – Mesa coordenada MANROD M28.....	83
Figura 52 – Fonte de alimentação CA trifásica - FCAT 10000-60-25.....	84
Figura 53 – Conexões da IHM – B10S615.....	85
Figura 54 – a) Exemplo de dados mecânicos coletados - dinamômetro e inversor; b) Exemplo de dados elétricos coletados; c) curva de torque vs velocidade.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	DINAMÔMETRO E COMPONENTES	15
2.1	FUNCIONALIDADE	15
2.1.1	Tipos de dinamômetro.....	17
2.1.2	Proposta de dinamômetro	18
2.2	MOTORES DE INDUÇÃO	19
2.2.1	Características Construtivas.....	20
2.2.2	Conceitos básicos	22
2.2.2.1	<i>A obtenção do conjugado induzido em um motor de indução.....</i>	<i>22</i>
2.2.2.2	<i>O conceito de escorregamento do rotor</i>	<i>24</i>
2.2.2.3	<i>A frequência elétrica no rotor</i>	<i>25</i>
2.2.3	Potência e Conjugado em motores de indução trifásico	25
2.2.3.1	<i>Perdas e diagrama de fluxo de potência</i>	<i>26</i>
2.2.3.2	<i>Potência e Conjugado.....</i>	<i>27</i>
2.2.4	Características de Conjugado versus Velocidade do motor de indução trifásico	28
2.2.4.1	<i>Conjugado induzido do ponto de vista físico.....</i>	<i>28</i>
2.2.4.2	<i>Dedução da equação do conjugado induzido.....</i>	<i>32</i>
2.2.5	Controle de velocidade de motores de indução trifásicos	32
2.2.5.1	<i>Controle de velocidade por mudança de frequência de linha.....</i>	<i>33</i>
2.2.5.2	<i>Controle de velocidade por mudança de tensão de linha.....</i>	<i>36</i>
2.3	INVERSORES.....	37

2.3.1	Conversor em ponte completa	37
2.3.2	Inversor com onda quadrada	38
2.3.3	Inversor em meia ponte	41
2.3.4	Inversores trifásicos	42
2.3.4.1	<i>Inversor de seis degraus</i>	42
2.3.4.2	<i>Inversores trifásicos com PWM</i>	45
2.4	Transdutor de torque	47
2.4.1	Strain Gauge	47
2.4.2	Eixo de medição de torque	48
2.4.3	Flange de medição de torque	49
2.4.4	Transmissão dos dados do transdutor – sem contato	50
2.4.5	Medição de torque rotativo ou não rotativo	50
2.4.6	Medição de torque estático ou dinâmico	50
2.4.7	Aplicações típicas para transdutores de torque	50
2.5	encoder	51
2.5.1	Sinais de saídas do encoder	54
2.6	analisador de energia	54
2.6.1	Princípio de funcionamento	55
2.6.2	Análise avançada de energia	56
2.6.3	A importância do analisador de qualidade de energia	56
2.7	Interface homem máquina	57
2.7.1	Função da IHM	57
2.7.2	Vantagens de se utilizar uma IHM	58
2.8	protocolo de comunicação industrial	58
2.8.1	Modbus	59
2.8.2	CANopen	59
2.8.3	DeviceNet	60

2.8.4	Hart	60
2.8.5	EtherCAT	60
2.8.6	AS-Interface	60
2.8.7	EtherNet/IP	61
2.8.8	Profinet	61
2.8.9	Profibus	61
2.8.10	Escolha do protocolo	62
2.9	RESISTOR DE FRENAGEM	62
2.9.1	Frenagem elétrica – Dissipativa (Dinâmica)	63
2.9.2	Solução por frenagem dissipativa	64
2.10	ACOPLAMENTO MECÂNICO PARA EIXOS	64
2.10.1	Função do acoplamento	65
2.10.2	Classificação e tipos	65
2.11	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	66
2.12	MESA para ALINHAMENTO – x, y, z	67
3	resultados	68
3.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO – WEG – W22 - 15CV	68
3.2	inversor de frequência danfoss – fc 301	70
3.3	ENCODER INCREMENTAL – DYNAPAR - B58N	72
3.4	TRANSDUTOR DE TORQUE – HBM T22	75
3.5	RESISTOR DE FRENAGEM – Danfoss mce 101	76
3.6	ANALISADOR DE ENERGIA – YOKOGAWA - CW500	78
3.7	ACOPLAMENTOS ROTEX GS - SEM FOLGA	81
3.8	MESA COORDENADA – MANROD-MR-28	82
3.9	FONTE DE ALIMENTAÇÃO trifásica – SUPPLIER - FCAT 10000-60-25	83
3.10	IHM – delta – b10s615	84
3.11	CUSTO DOS COMPONENTES E ORÇAMENTO TOTAL	87

4	CONCLUSÃO.....	89
	REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

De toda energia consumida no Brasil, quase 26% provém do uso de motores elétricos industriais. Apenas em 2016, o desperdício de energia ocasionado pelo consumo desses equipamentos foi equivalente ao consumo médio de 4,47 milhões de residências ao longo de um ano (WEG, 2019). Considerando apenas o consumo energético dentro de uma indústria, em média os motores elétricos representam quase 70% de toda a eletricidade utilizada na planta fabril (POTÊNCIA PORTAL, 2021).

Certos requisitos de desempenho estabelecidos por normas técnicas e outras regulamentações devem ser atendidos quanto a fabricação de motores de indução. Um dos requisitos diz respeito a sua eficiência, que é dada pela relação entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica na entrada, e a diferença entre elas se deve as perdas (FILIPPO FILHO, 2013). A potência de saída mecânica nominal é calculada com base na divisão do torque pela velocidade de operação. A potência elétrica na entrada é calculada com base na tensão e corrente fornecidas ao motor.

Para se medir a potência e torque aplicados em máquinas, utiliza-se o dinamômetro, que também tem a finalidade de fornecer a carga dinâmica durante os testes do equipamento em prova (ZHU; WANG; HOU, 2017). Como resultados de um teste de desempenho de um motor no dinamômetro, são a curva de torque *versus* velocidade e a curva de potência *versus* velocidade (FARLEY, 2012).

O dinamômetro é equipamento constituído basicamente por um motor que funciona como carga dinâmica do sistema, um inversor para fazer o controle, sensores de rotação e torque, uma interface para parametrização e recebimento de dados e um sistema de dissipação da energia devolvida ao inversor.

Neste processo da configuração de uma bancada de dinamômetro, são abordados os conceitos dos principais componentes que o constituem, mostrando-se um pouco da funcionalidade individual e da sua contribuição no sistema. Abordam-se, de forma breve, os protocolos de comunicação por meio dos quais é estabelecida a comunicação entre os dispositivos. Por fim, apresentam-se propostas de modelos de equipamentos que podem ser utilizados em sua confecção, trazendo os motivos pela sua opção.

1.1 OBJETIVOS

Para obter a configuração de uma bancada de dinamômetro para testes de eficiência e desempenho em motores elétricos de indução, até 10 CV, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Propor a configuração de um dinamômetro, para testes em bancada experimental universitária, de motores elétricos de indução de até 10 CV, para avaliar a eficiência e desempenho dos motores através dos parâmetros elétricos e mecânicos obtidos nos testes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o funcionamento e utilidade dos principais componentes empregados na elaboração da bancada do dinamômetro;
- Verificar os protocolos de comunicação essenciais para controle e troca de dados entre os componentes do dinamômetro;
- Propor os equipamentos necessários para a montagem da bancada do dinamômetro.
- Realizar um levantamento dos custos de cada componente proposto e o orçamento total da configuração.

2 DINAMÔMETRO E COMPONENTES

Para alcançar os objetivos propostos por este trabalho, é importante entender conceitos atrelados aos componentes que fazem parte da configuração do dinamômetro, além de ser necessário compreender como é feita a comunicação, controle e troca de dados entre estes componentes.

O presente capítulo expõe uma breve descrição sobre os tipos de dinamômetros, os principais componentes, dentre eles, os motores de indução utilizados como carga e a ser testado, o inversor de frequência, transdutor de torque, encoder, analisador de energia, fonte de alimentação e a interface homem máquina (IHM). São abordados também, alguns dos protocolos de comunicação industriais necessários para comunicação entre os componentes e a estrutura utilizada como suporte de fixação do motor.

2.1 FUNCIONALIDADE

Em bancadas de teste de motores, o dinamômetro é a parte fundamental do sistema. Além de ser utilizado para medir a potência e o torque aplicados nas máquinas, ele tem também a finalidade de fornecer a carga dinâmica durante os testes do equipamento em prova (ZHU; WANG; HOU, 2017). Na medição de desempenho de um motor primário, testado em um dinamômetro, os principais resultados de saída são a curva de torque *versus* velocidade e a curva de potência *versus* velocidade do motor testado, ou ambas (FARLEY, 2012).

O propósito do dinamômetro é simular uma carga no motor para medir a quantidade de energia que pode ser produzida pelo motor em teste contra essa carga. A potência não é medida de forma direta, ela é um produto das medições de torque e velocidade (FARLEY, 2012). Uma forma para definir a potência é apresentada na equação 1.

$$P = T\omega \quad (1)$$

Onde:

P = Potência;

T = Torque;

ω = Velocidade angular;

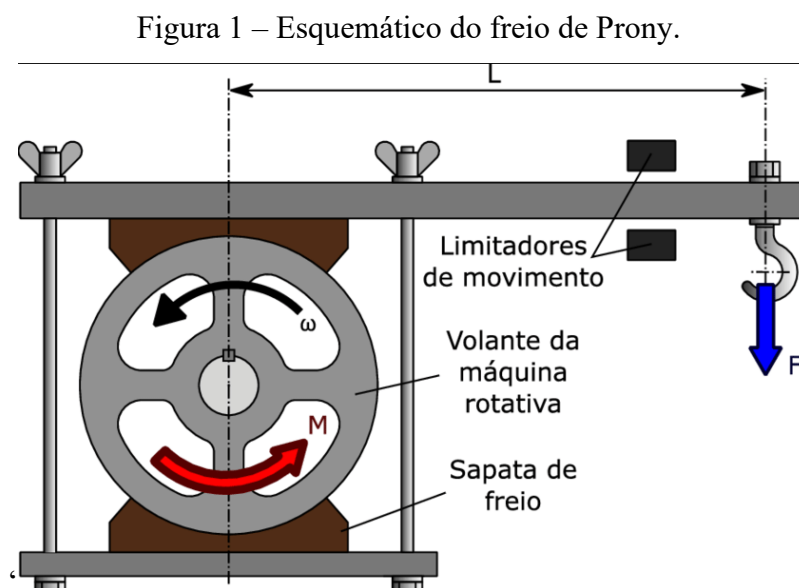
Há vários métodos diferentes para se aplicar carga em um motor, como uma carga inercial ou algum tipo de freio. Alguns exemplos de freios como carga podem ser, um rotor

com um compasso de calibre, bombas de água, freio de corrente parasita ou um freio de partículas magnéticas. Segundo Farley (2012), todos esses exemplos são utilizados em dinamômetros, atualmente, sendo que todos possuem vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação específica. Grande parte desses freios são versões do clássico *Prony Brake* (Freio de Prony).

Gaspard Clair François Marie Riche De Prony foi a primeira pessoa a descobrir como medir o torque em um eixo rotativo. Sabe-se que o torque é simples de medir em uma situação estática, no entanto, se a intenção é medir o torque em um objeto em movimento, o processo de medição torna-se muito mais difícil. De Prony, francês, que viveu no século 19 e era engenheiro, inventou o *Prony Break*, usando duas vigas de madeira de forma simétrica que foram presas ao eixo de um motor rotativo de um lado e estendido como um braço do outro. Este tipo de grampo permitia que o eixo girasse dentro dele, a força deste grampo no eixo podia ser aumentada apertando as porcas dos parafusos que unia os dois pedaços de madeira (FARLEY, 2012).

Um peso era movido ao longo do braço até que ambas as vigas ficassem na horizontal e a velocidade do motor desejada fosse obtida. Através deste peso, era possível medir o torque, pois a distância podia ser medida e o peso era conhecido.

Assim, qualquer dispositivo que consiga diminuir a velocidade de um eixo rotativo, enquanto mede o torque, pode ser considerado um freio de Prony. Um modelo de freio de Prony é apresentado na figura 1.



Fonte: Elvis Bertoti (2018).

2.1.1 Tipos de dinamômetro

De acordo com Zhu, Wang e Hou (2017), vários tipos de dinamômetros foram desenvolvidos nas últimas décadas, entre eles estão: Dinamômetro de freio d'água, dinamômetro de corrente parasita, dinamômetro de histerese e dinamômetro elétrico. Os quatro primeiros estão classificados como dinamômetros de absorção de potência, ao ponto que o último pertence ao tipo de transferência de potência. Um dinamômetro de histerese é mostrado na figura 2.

Figura 2 – Exemplo de dinamômetro de histerese.



Fonte: Magtrol - Motor Testing & Sensors (2022).

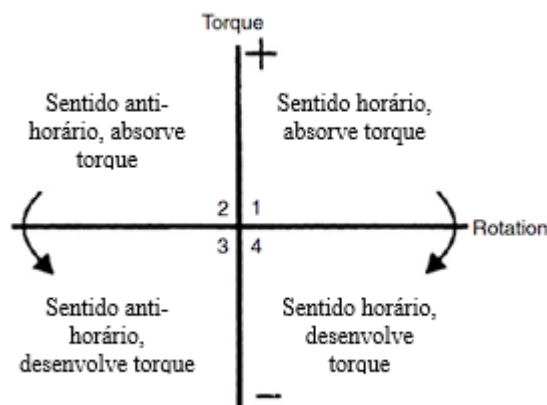
Dinamômetros de absorção de potência: Absorvem a energia mecânica e fazem com que ela se transforme em calor e seja dissipada diretamente. Exceto o dinamômetro de freio d'água, os demais desta categoria não podem ser utilizados com alta capacidade de potência, pois possuem baixas taxas de dissipação de calor. Como a temperatura do corpo ficaria muito alta, isto afetaria a precisão e estabilidade do dinamômetro, podendo até mesmo causar a queima do mesmo.

Dinamômetros de absorção de potência tem grande desperdício de energia, sendo não favoráveis ao meio ambiente e sendo substituídos pelos dinamômetros de transferência de potência.

Dinamômetros de transferência de potência: Dinamômetros elétricos pertencem a esta classe. Eles possibilitam os motores elétricos, a serem testados, funcionarem nos modos motorização e geração, fazendo com que possam, também, absorver energia mecânica e transformá-la em elétrica. Diferentemente dos dinamômetros de absorção, este tipo de dinamômetro consegue reaproveitar a energia gerada ou devolvê-la à rede elétrica. Desta forma, é possível ter uma redução significativa do consumo de energia. Além disso, este tipo de dinamômetro tem a vantagem de alta capacidade de potência.

As operações do dinamômetro são de acordo com o tipo escolhido. Os quatro quadrantes são mostrados na figura 3: 1 e 2 são referentes à motorização e 3 e 4 à geração. Enquanto os dinamômetros de absorção de potência operam nos quadrantes 1 e 2, os dinamômetros elétricos podem operar nos quatro.

Figura 3 – Quadrantes dos modos de operação do dinamômetro.



Fonte Martyr et al. (2012).

2.1.2 Proposta de dinamômetro

Neste trabalho é proposto um dinamômetro elétrico baseado no motor de indução. Serão abordados os principais componentes que compõem a bancada de um dinamômetro, suas aplicações no sistema, de forma a ter uma clareza do funcionamento de cada dispositivo em separado e no todo.

De forma resumida, o dinamômetro proposto é composto de um motor de indução que funciona como carga dinâmica contra o motor em teste. Este motor-carga, tem seu controle efetuado por um inversor de frequência, os parâmetros do teste e dados coletados são configurados e visualizados por meio da Interface Homem Máquina.

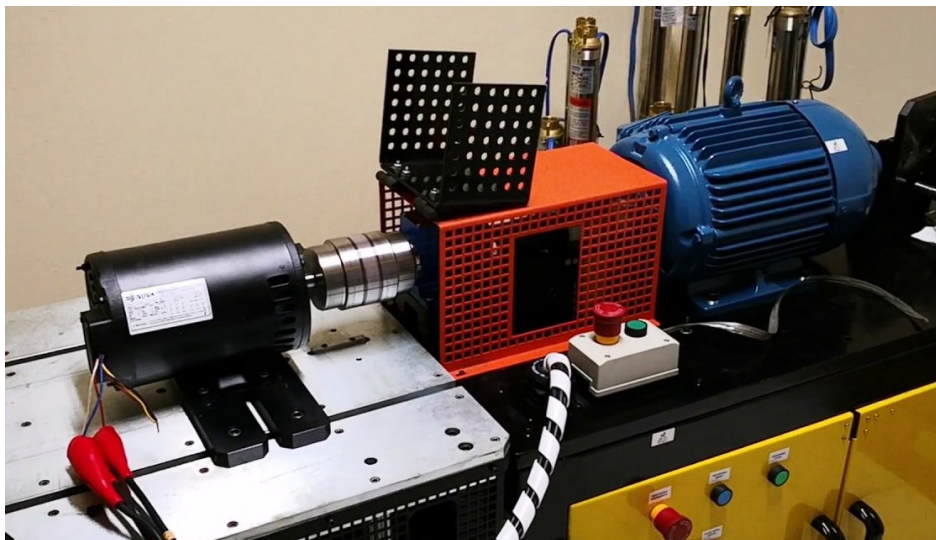
Durante o processo de teste são coletados dados de rotação através do encoder, e de torque por meio do transdutor de torque. O motor em teste é conectado através de seu eixo com o eixo do motor em carga, com o auxílio de um acoplamento, sendo o motor em teste fixado a uma mesa coordenada para o completo alinhamento entre ambos. Uma fonte de alimentação é utilizada a fim de manter estável a energia fornecida durante todo o teste. Toda a energia fornecida e os dados de potência, gerados pelo motor em teste, são verificados e exibidos pelo analisador de energia.

Para a proteção do inversor e dissipação de energia gerada na frenagem do motor-teste, é instalado junto ao inversor um resistor de frenagem.

Na comunicação e troca de dados entre todos os dispositivos que possuem alguma forma de cabeamento e informação a transmitir, são utilizados protocolos de comunicação para orientar o tráfego de dados entre todos de forma organizada.

Na figura 4, é possível observar um dinamômetro simplificado, de forma a ter uma orientação da estrutura do sistema a ser desenvolvido.

Figura 4 – Exemplo de bancada de dinamômetro elétrico.



Fonte: LHF Instrumentação (2022).

2.2 MOTORES DE INDUÇÃO

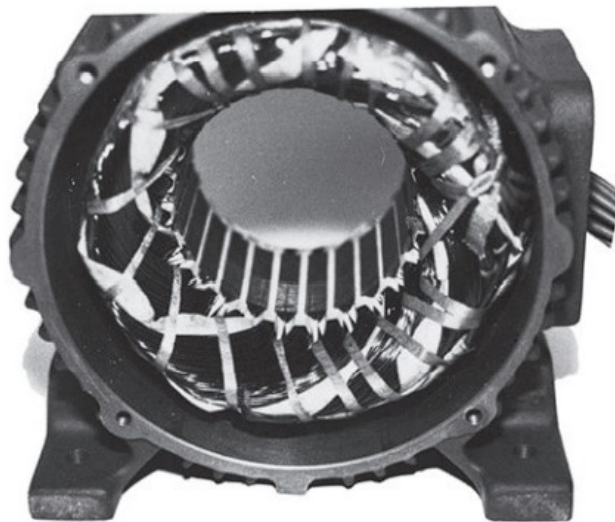
O conceito de máquina de indução está relacionado ao fato de que a tensão no rotor não necessita de nenhuma conexão física de cabos para ser induzida no rotor, a principal

diferença entre este tipo de motor e os demais é que ele não necessita de corrente de campo CC para entrar em funcionamento (CHAPMAN, 2013).

2.2.1 Características Construtivas

Em aspectos físicos o motor de indução trifásico possui um estator semelhante de uma máquina síncrona, tendo diferença com relação a construção do rotor (CHAPMAN, 2013). Um estator com 2 polos, é mostrado na Figura 5.

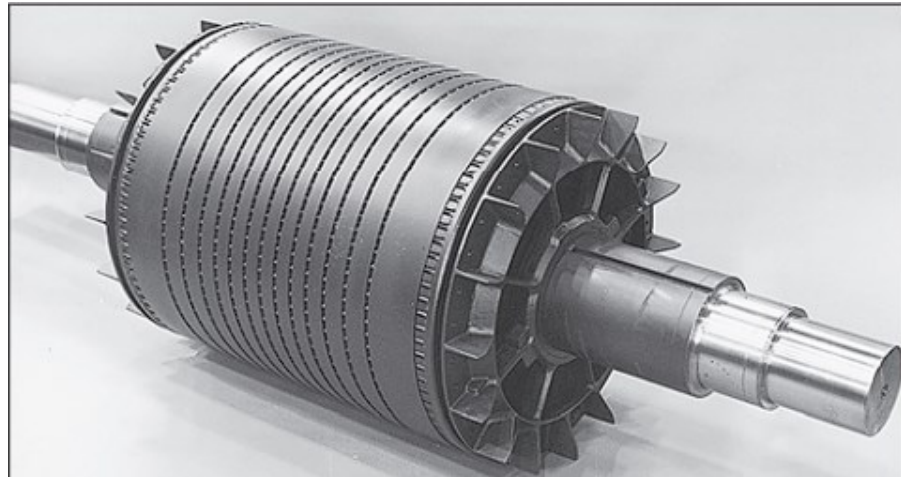
Figura 5 – Estator do motor indução trifásico



Fonte: Chapman (2013, p. 308)

Para motores de indução há dois tipos de rotores que são inseridos no estator, um deles chamado de gaiola de esquilo e o outro rotor bobinado (CHAPMAN, 2013). Na Figura 6 é mostrado um rotor do tipo gaiola de esquilo.

Figura 6 – Rotor gaiola de esquilo.

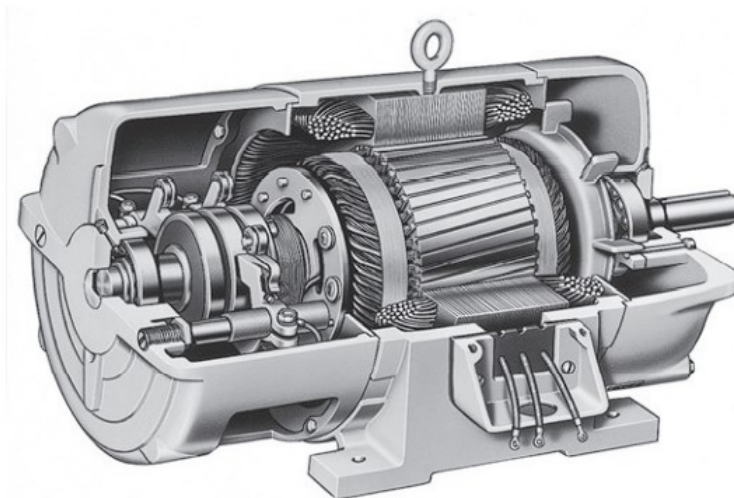


Fonte: Chapman (2013, p. 308)

De acordo com Chapman (2013), rotores gaiola de esquilo são formados por ranhuras em sua superfície, onde são encaixadas barras condutoras e estas são colocadas em curto-circuito em ambas extremidades por anéis de curto-circuito. Este tipo de rotor leva esta denominação devido à semelhança dos condutores com as rodas em que os esquilos fazem exercícios em suas gaiolas.

Já rotores bobinados, exemplificado na Figura 7, possuem um conjunto de enrolamentos trifásicos, onde as 3 fases dos enrolamentos do rotor são ligadas em Y e as terminações são ligadas à anéis deslizantes no eixo do rotor. Por meios de escovas apoiadas nos anéis deslizantes, os enrolamentos são colocados em curto-circuito(CHAPMAN, 2013).

Figura 7 – Rotor bobinado.



Fonte: Chapman (2013, p. 311)

Rotores bobinados além de possuírem custos mais elevados de confecção, comparado ao modelo gaiola de esquilo, exigem também mais manutenção devido aos desgastes das escovas e anéis deslizantes, por este motivo rotores gaiola de esquilo são amplamente utilizados.

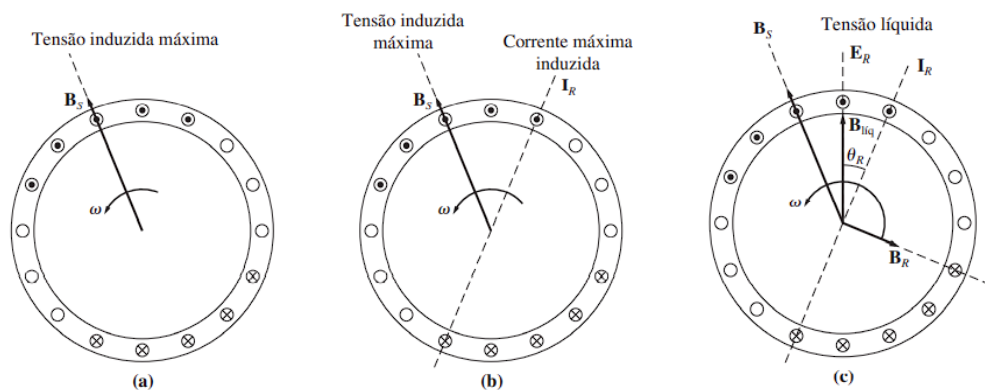
2.2.2 Conceitos básicos

Nesta seção é abordado um resumo do funcionamento básico de motores de indução e são abordados alguns termos relativos a este tipo de motor.

2.2.2.1 A obtenção do conjugado induzido em um motor de indução

Segundo Chapman (2013), a aplicação de um conjunto trifásico de tensões em um estator de motor de indução, com rotor gaiola de esquilo, representado na Figura 8, resulta em um conjunto trifásico de correntes circulando no estator. Devido à esta circulação de corrente, um campo magnético é produzido e expresso pela densidade de fluxo magnético \mathbf{B}_s , girando em sentido anti-horário.

Figura 8 – Conjugado induzido em um motor de indução.



Fonte: Chapman (2013, p. 312)

A figura 8(a) mostra que a densidade de fluxo magnético girante \mathbf{B}_s induz uma tensão nas barras do rotor; Na 8(b) a tensão induzida no rotor faz com que surja um fluxo de corrente no rotor, atrasado em relação a tensão, devido a indutância do rotor; 8(c) Esta corrente induzida no rotor produz um fluxo magnético girante \mathbf{B}_R (atrasado 90° em relação a ela mesma). O fluxo

magnético girante \mathbf{B}_R age em conjunto com \mathbf{B}_{liq} (densidade de fluxo magnético resultante), produzindo desta forma um conjugado anti-horário na máquina (CHAPMAN, 2013).

A velocidade do campo magnético é dada pela equação 2.

$$n_{sinc} = \frac{120f_{se}}{P} \quad (2)$$

Onde:

f_{se} é a frequência do sistema aplicada ao estator em hertz

P é o número de polos da máquina

A densidade de fluxo magnético girante \mathbf{B}_s passa pelas barras do rotor e induz uma tensão nelas, esta tensão induzida (e_{ind}) determinada em uma dada barra do rotor é dada pela equação 3:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (3)$$

Em que:

\mathbf{v} = Velocidade da barra em relação ao campo magnético (m/s)

\mathbf{B} = Vetor densidade de fluxo magnético (T)

\mathbf{l} = comprimento do condutor dentro do campo magnético (m)

A tensão induzida em uma das barras do rotor é proporcionada através do movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético dos estator. Acompanhando o sentido representado na Figura 6, sendo para direita a velocidade das barras superiores do rotor em relação ao campo magnético, a tensão induzida nessas barras será para fora da página, já com relação as barras inferiores será para dentro (CHAPMAN, 2013).

Conforme diz Chapman (2013), o resultado desse movimento é um fluxo de corrente para fora das barras superiores e para dentro das barras inferiores. Nota-se na Figura 6-b, que pelo rotor possuir uma estrutura indutiva, a corrente de pico do rotor está atrasada em relação a tensão de pico do rotor. Assim, o fluxo de corrente do rotor produz a densidade do fluxo magnético do rotor \mathbf{B}_R .

O conjugado induzido na máquina é dado pela equação 4, onde k é um fator que depende de características construtivas:

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \quad (4)$$

Ficando o conjugado resultante no sentido anti-horário, mesmo sentido do conjugado induzido do rotor, o rotor acelera nesse sentido.

Através dos conceitos abordados nota-se que há um limite superior finito para a velocidade do motor, pois se o rotor do motor de indução atingir a velocidade síncrona, as barras que o compõe ficariam estacionárias em relação ao campo magnético, assim não haveria tensão induzida. Desta forma, se e_{ind} for 0, não há corrente nem campo magnético no rotor, por consequência o conjugado induzido seria zero e as perdas por atrito fariam com que o rotor perdesse velocidade (CHAPMAN, 2013).

2.2.2.2 O conceito de escorregamento do rotor

De acordo com Chapman (2013), a tensão induzida nas barras do rotor provém da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Há dois termos importantes utilizados para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos: *velocidade de escorregamento* e *escorregamento*.

A velocidade de escorregamento é definida pela diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, e é dada pela equação 5.

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (5)$$

em que:

n_{esc} = velocidade de escorregamento da máquina (rpm)

n_{sinc} = velocidade dos campos magnéticos (rpm)

n_m = velocidade mecânica do eixo do motor (rpm)

Já o escorregamento é a velocidade relativa, seu conceito é definido pela equação 6:

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (6)$$

Observa-se que se o motor alcançar a velocidade síncrona, escorregamento (s) será zero, e se o rotor estiver estacionário, então $s=1$.

Podemos também encontrar a velocidade mecânica do rotor em função do escorregamento e da velocidade síncrona, expresso por 7.

$$n_m = (1-s) \cdot n_{sinc} \quad (7)$$

2.2.2.3 A frequência elétrica no rotor

Pode-se associar o motor de indução a um transformador, já que ele funciona induzindo tensões e correntes no rotor. Pensando desta maneira, o enrolamento primário (estator) induz uma tensão no enrolamento secundário (rotor), porém a frequência do secundário não será necessariamente a mesma do primário (CHAPMAN, 2013).

De acordo com Chapman (2013), o rotor estando parado a sua frequência será a mesma do estator, e com ele girando na velocidade síncrona, sua frequência será zero. Então, se $n_m = 0$ a frequência do rotor será $f_{re} = f_{se}$ e o escorregamento $s = 1$, e para $n_m = n_{sinc}$ a frequência do rotor será $f_{re} = 0$ e $s = 0$. Para outras velocidades do rotor, a frequência do rotor é diretamente proporcional à diferença entre velocidade do fluxo magnético n_{sinc} e a velocidade do rotor n_m .

Assim, a frequência no rotor pode ser denotada por 8.

$$f_{re} = s \cdot f_{se} \quad (8)$$

Visto que n_{sinc} é expressa pela equação (2), então fazendo algumas substituições na equação de frequência do rotor, verifica-se que ela pode ser expressa por 9.

$$f_{re} = \frac{P}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad (9)$$

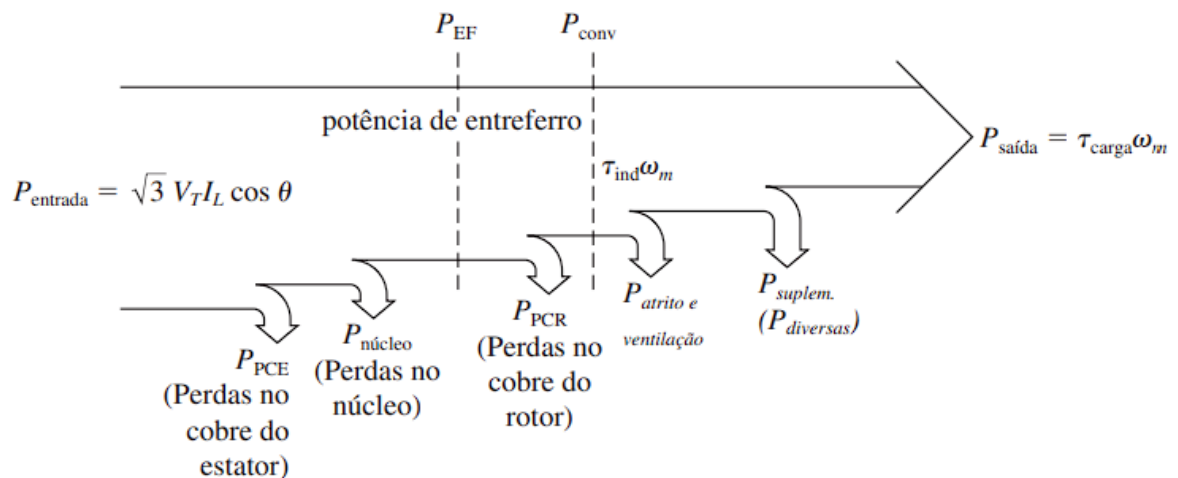
2.2.3 Potência e Conjugado em motores de indução trifásico

Pode-se dizer que um motor de indução seria análogo a um transformador rotativo, onde a entrada é um sistema trifásico de tensões e correntes. Se o rotor é associado como sendo o enrolamento secundário, como este está em curto-circuito, não há saída elétrica, mas sim saída mecânica. Utilizando desta analogia pode-se ter a relação entre a potência elétrica de entreferro e a potência mecânica de saída, (CHAPMAN, 2013).

2.2.3.1 Perdas e diagrama de fluxo de potência

A figura 9 mostra o fluxo de potência de um motor de indução, sendo a potência de entrada P_{entrada} , as primeiras perdas encontradas são dadas por perda Joule nos enrolamentos do estator ($P_{\text{PCE}} = \text{Perdas no cobre do estator}$). Outras perdas são ocasionadas por histerese e correntes parasitas no aço elétrico do estator e rotor ($P_{\text{núcleo}}$). O restante da potência nesse ponto é transferida do estator ao rotor através do entreferro ($P_{\text{EF}} = \text{Potência de entreferro}$). Como há uma corrente que circula também no rotor, há perda Joule ($P_{\text{PCR}} = \text{Perdas no cobre do rotor}$), o restante é convertido da forma elétrica para forma mecânica (P_{conv}). Por último, são subtraídas as perdas por atrito e ventilação (P_{AeV}) e as perdas suplementares ($P_{\text{suplem.}}$). A potência que sobra é a potência de saída do motor ($P_{\text{saída}}$) (CHAPMAN, 2013).

Figura 9 – Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução.



Fonte: Chapman (2013, p. 322)

Devido ao motor de indução sempre operar perto da velocidade síncrona, o movimento relativo dos campos magnéticos sobre a superfície do rotor é lento, por isso as perdas no núcleo do rotor são muito menores com relação as do estator (CHAPMAN, 2013).

Conforme Chapman (2013), as perdas por atrito, ventilação e suplementares serão maiores quanto maior for a velocidade do motor de indução, porém de forma inversa menores serão as perdas no núcleo. Estas três categorias de perdas podem ser combinadas e denominadas como *perdas rotacionais*. Em detrimento de diversas perdas variarem em sentidos opostos com

a mudança de velocidade, as perdas rotacionais totais de um motor podem ser consideradas constantes com a velocidade variável.

2.2.3.2 Potência e Conjugado

Assim, conforme Chapman (2013), as perdas no cobre do estator, e as perdas no cobre do rotor podem ser encontradas.

Nos enrolamentos do estator, as perdas podem ser calculadas pela equação 10, sendo I_1 a corrente de fase e R_1 a resistência de fase.

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (10)$$

Desta forma, a potência de entreferro pode ser encontrada, conforme equação 11.

$$P_{EF} = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo} \quad (11)$$

Outra forma de encontrar a potência de entreferro é mostrada pela equação 12, sendo I_2 a corrente e R_2 a resistência do rotor.

$$P_{EF} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (12)$$

Como em um transformador ideal a potência não se altera, quando é referida de um lado para o outro, pode-se expressar as perdas no enrolamento do rotor pela equação 13.

$$P_{PCR} = 3I_R^2 R_2 \quad (13)$$

Fazendo a subtração da potência de entrada, das perdas nos enrolamentos e do aço, a restante é convertida da forma elétrica para a mecânica, ou também chamada de *potência mecânica desenvolvida* (CHAPMAN, 2013) ou eletromagnética. Essa potência é obtida pela equação 14.

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (14)$$

Tendo como base as equações (12) e (13), é possível observar que as perdas no enrolamento do rotor são iguais à potência entregue no entreferro multiplicada pelo escorregamento:

$$P_{PCR} = sP_{EF} \quad (15)$$

Portanto, segundo Chapman (2013), quanto menor o escorregamento do motor, menores serão as perdas no rotor da máquina. Assim, se o rotor estiver parado, o escorregamento será $s = 1$ e a potência entregue no entreferro será consumida inteiramente no rotor. Como $P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR}$, é possível encontrar outra relação entre potência de entreferro e a potência convertida da forma elétrica em mecânica:

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} \quad (16)$$

Desta maneira, conhecendo as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares, a potência de saída poderá ser obtida por 17.

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{AeV} - P_{suplem}. \quad (17)$$

O conjugado gerado pela conversão de potência elétrica em mecânica é definido como o *conjugado induzido* T_{ind} , o qual difere dos conjugados disponíveis nos terminais do motor em um valor que é igual aos conjugados de ventilação e atrito da máquina (CHAPMAN, 2013). O conjugado induzido, também denominado *conjugado desenvolvido ou torque eletromagnético*, é dado pela equação 18, onde ω_m é a velocidade angular mecânica (rad/s).

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (18)$$

2.2.4 Características de Conjugado versus Velocidade do motor de indução trifásico

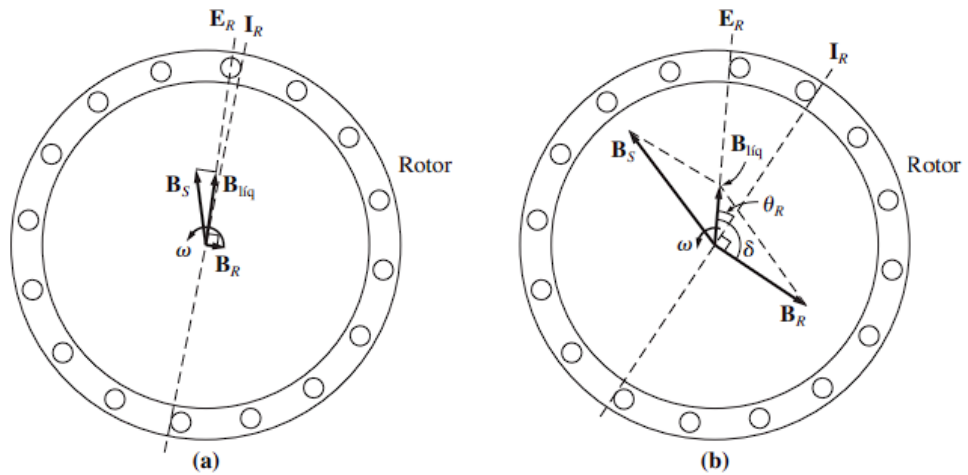
Através do ponto de vista físico do comportamento do campo magnético do motor, será examinada a relação entre o conjugado e a velocidade. Por fim, uma equação genérica para o conjugado será deduzida em função do escorregamento.

2.2.4.1 Conjugado induzido do ponto de vista físico

Na figura 10-a) é mostrado um motor de indução com rotor gaiola de esquilo que inicialmente está operando a vazio e, portanto, muito próximo da velocidade síncrona. Para esta máquina o campo magnético líquido \mathbf{B}_{liq} é produzido pela corrente de magnetização \mathbf{I}_M , a qual flui no circuito equivalente do motor. O módulo da corrente de magnetização e \mathbf{B}_{liq} são

diretamente proporcionais a tensão E_1 . Esta última sendo constante, o campo magnético líquido do motor também será constante.

Figura 10-a) Campos magnéticos de um motor de indução sob condições de carga leve. 10-b) Campos magnéticos de um motor de indução sob condições de carga pesada.



Fonte: Chapman (2013, p. 329)

No caso apresentado na figura 10-a), o escorregamento do rotor é muito pequeno, consequentemente, o movimento relativo entre o rotor e os campos magnéticos também é muito pequeno, o mesmo se aplica à frequência do rotor. Devido ao movimento relativo ser pequeno, a tensão induzida E_R nas barras do rotor e a corrente resultante I_R também serão pequenas. Como a frequência do rotor é muito pequena, a reatância do rotor será praticamente zero e a corrente máxima I_R do rotor está quase em fase com a tensão E_R do rotor. Por isso, a corrente do rotor produzirá um pequeno campo magnético B_R , em um ângulo um pouco maior que 90° atrás do campo magnético B_{liq} . Observa-se que a corrente do estator será bem elevada, pois mesmo a vazio, ela fornecerá a maior parte de B_{liq} (CHAPMAN, 2013).

A equação 19 fornece o conjugado induzido, o qual mantém o rotor girando.

$$T_{ind} = k B_R \times B_{liq} \quad (19)$$

Seu valor é dado por:

$$T_{ind} = k B_R B_{liq} \text{sen } \delta \quad (20)$$

Observando a figura 10-b) e supondo a aplicação de uma carga ao motor de indução, nota-se que à medida que a carga do motor aumenta, a velocidade do rotor diminui e o escorregamento aumenta. Deste modo, há agora mais movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator. Com este movimento relativo maior, uma tensão elevada de rotor E_R será produzida e com isso produzirá também uma corrente de rotor I_R maior. Elevando esta corrente, o campo magnético B_R do rotor também aumenta, porém, o ângulo entre a corrente do rotor e B_R também se altera. Em consequência do aumento do escorregamento do motor, a frequência do rotor eleva-se e a reatância do rotor sobe. Na figura 10-b) é apresentado o motor de indução funcionando com uma carga bem elevada, nota-se que a corrente do rotor subiu e que o ângulo δ aumentou. Enquanto o aumento em B_R tende a elevar o conjugado, o aumento do ângulo δ tende a diminuir o conjugado. Como o primeiro efeito é maior do que o segundo, o conjugado induzido total eleva-se para suprir o aumento de carga do motor (CHAPMAN, 2013).

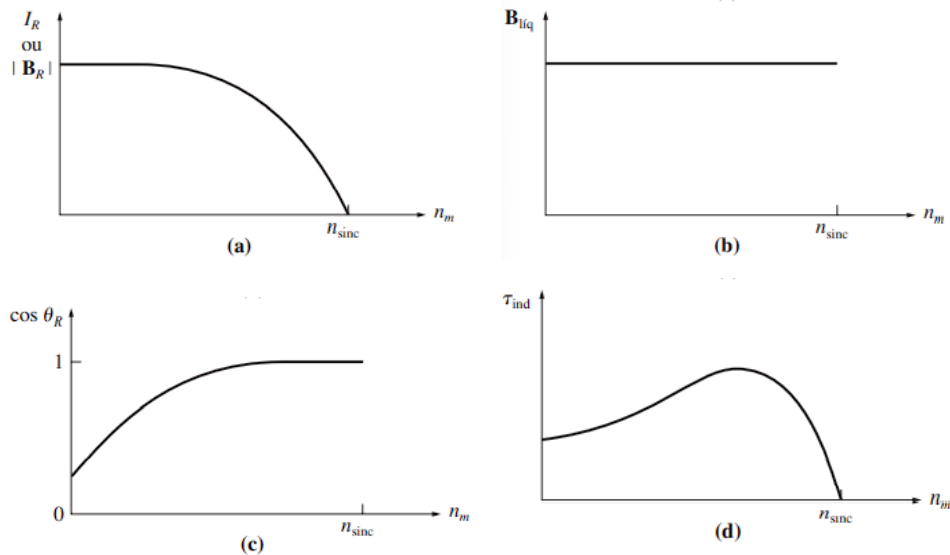
O ponto de conjugado máximo de um motor de indução acontece quando ao aumentar a carga no eixo, o termo $\text{sen } \delta$ diminui mais do que o aumento de B_R , havendo um aumento de carga nesse ponto, T_{ind} diminui e o motor para.

A fim de deduzir o comportamento total da máquina, cada termo da expressão 20 pode ser analisado de forma separada, como seguem:

- B_R – Desde que o campo magnético do rotor não esteja saturado, ele será diretamente proporcional à corrente que nele circula. A corrente do rotor aumenta com o aumento do escorregamento (diminuição da velocidade) – Figura 9-a).
- B_{liq} . Como o campo magnético líquido do motor é proporcional à E_1 , desse modo ele será aproximadamente constante, e curva B_{liq} versus velocidade está mostrada na Figura 9-b).
- $\text{sen } \delta$. O ângulo δ entre os campos magnéticos líquido e do rotor pode ser expresso de uma maneira muito útil, observando a figura 8-b) nota-se que o ângulo δ é igual ao ângulo do fator de potência do rotor mais 90° , assim, $\text{sen } \delta = \text{sen}(\theta_R + 90^\circ) = \cos \theta_R$, esse termo é o fator de potência do rotor (FP_R). Este fator de potência resultante é dado pela equação 21, onde X_{R0} é a reatância do rotor. O gráfico do fator de potência do rotor versus a velocidade é exibido na figura 11-c).

$$FP_R = \cos\left(\arctg \frac{X_{R0}}{R_R}\right) \quad (21)$$

Figura 11 – a) Gráfico corrente do rotor I_R x Velocidade; b) Gráfico $B_{liq.}$ x Velocidade; c) Gráfico $\cos \theta_R$ x Velocidade e d) Gráfico Conjugado T_{ind} x Velocidade.



Fonte: Chapman (2013, p. 331)

De acordo com Chapman (2013), como o conjugado induzido é proporcional ao produto desses 3 termos, a característica de conjugado versus velocidade de um motor de indução pode ser construída com a multiplicação gráfica dos três gráficos: Figura 11-a) à c), resultando a figura 11-d).

A curva da figura 11-d) pode ser dividida em três regiões. A primeira é a região de escorregamento baixo da curva (próxima da velocidade síncrona), nessa faixa o escorregamento do motor aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento da carga e a velocidade mecânica do rotor diminui de forma também linear com a carga. Em operação normal, o motor de indução tem uma queda de velocidade linear.

A segunda região pode ser denominada região de escorregamento moderado, onde a frequência do rotor é maior do que antes e também a reatância do rotor é da mesma ordem de magnitude da resistência do rotor. O conjugado de pico do motor ocorre no ponto onde, para um incremento de carga, o aumento da corrente de rotor é contrabalançado de forma exata pela diminuição do fator de potência do rotor.

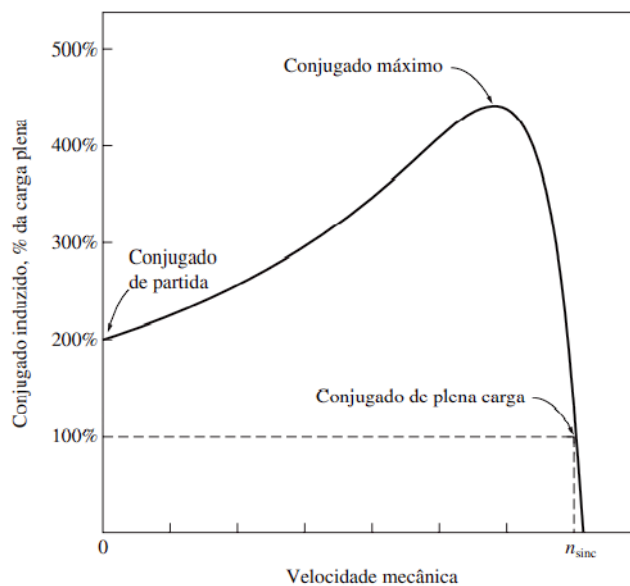
Já a terceira região da curva é denominada região de escorregamento elevado, o conjugado induzido diminui com o aumento da carga, pois o incremento da corrente do rotor é completamente sobrepujado pela diminuição do fator de potência do rotor.

2.2.4.2 Dedução da equação do conjugado induzido

Conforme Chapman (2013), é possível usar o circuito equivalente de um motor de indução e seu diagrama de fluxo de potência para desenvolver uma expressão genérica do conjugado induzido como função da velocidade. As diversas deduções e rearranjos de equações as que o autor submete o estudo do conjugado induzido de um motor de indução – os quais não cabem ao escopo deste trabalho - estão detalhadas em Chapman (2013, p. 333-335).

Na figura 12 é apresentado um gráfico do conjugado de um motor de indução em função da velocidade e do escorregamento.

Figura 10 – Gráfico Conjugado x Velocidade.



Fonte: Chapman (2013, p. 336)

2.2.5 Controle de velocidade de motores de indução trifásicos

Até o advento dos acionamentos modernos de estado sólido, os motores de indução eram em geral boas máquinas para aplicações que exigissem um controle considerável de velocidade (CHAPMAN, 2013).

O funcionamento normal de um motor de indução típico é inferior a 5% do escorregamento.

Há duas técnicas que podem ser usadas para controlar um motor de indução. Uma delas consiste em variar a velocidade síncrona – velocidade dos campos magnéticos do estator e do rotor - pois a velocidade do rotor é sempre próxima de η_{sinc} . Outra forma de variar a velocidade do motor compreende variar o escorregamento do motor para uma dada carga.

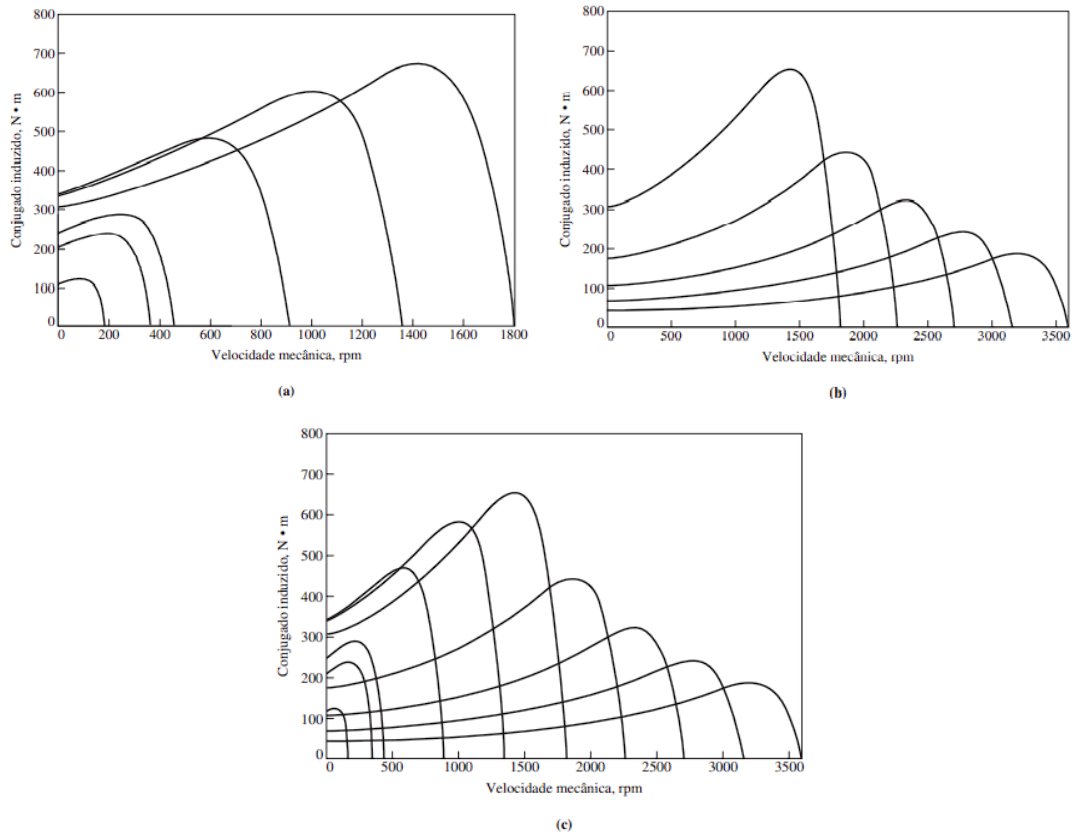
Baseado na equação (2), nota-se que as formas de variar a velocidade síncrona da máquina são: alterando a frequência elétrica e alterando o número de polos da máquina. O escorregamento pode ser controlado variando a resistência do rotor ou a tensão de terminal do motor.

As técnicas de controle empregadas neste trabalho abordam os casos de controle de velocidade, por mudança da frequência de linha e um breve comentário sobre o controle de velocidade por mudança da tensão de linha.

2.2.5.1 Controle de velocidade por mudança de frequência de linha

Segundo relata Chapman (2013), se a frequência elétrica aplicada ao estator de um motor de indução for alterada, a velocidade de rotação η_{sinc} dos seus campos magnéticos mudará de forma diretamente proporcional à alteração da frequência elétrica. Outro ponto que irá se alterar será o ponto de carga à vazio, como pode ser observado na figura 13. Nas condições nominais ao qual o motor foi projetado, a velocidade síncrona do motor é também conhecida como velocidade base.

Figura 13 a) – Curvas características de conjugado versus velocidade para velocidades abaixo da velocidade base. b) Curvas características de conjugado versus velocidade para velocidades acima da velocidade base e c) Curvas características de conjugado versus velocidade para todas as frequências.



Fonte: Chapman (2013, p. 368)

Utilizando a forma de controle por frequência variável, pode-se ajustar a velocidade do motor tanto para cima como para baixo da velocidade base. O acionamento do motor feito pelo controle de velocidade pela variação da frequência, proporciona uma faixa de controle que vai desde um valor baixo, como 5% da velocidade de base até um valor que pode chegar ao dobro dessa velocidade. Para que não haja riscos no funcionamento do motor, é importante estabelecer certos limites de tensão e conjugado aplicados.

Se o motor estiver funcionando em velocidades abaixo da velocidade base, para um funcionamento apropriado é necessário reduzir a tensão de terminal aplicada ao estator, esta diminuição deve ser aplicada de forma linear com a diminuição da frequência do estator. Este processo é chamado de *redução dos valores nominais*. Caso não seja realizado este processo,

haverá a saturação do aço do núcleo do motor de indução e correntes excessivas de magnetização circularão na máquina (CHAPMAN, 2013).

Como o motor de indução é basicamente um transformador em rotação, o fluxo no núcleo de um motor de indução pode ser obtido a partir da lei de Faraday, expressa pela equação 22, onde N é o número de espiras e ϕ (Wb) é o fluxo magnético.

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (22)$$

Se for aplicada ao núcleo uma tensão $v(t) = V_M \sin \omega t$, o fluxo resultante ϕ é expresso pela equação 23.

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega \quad (23)$$

Logo, se a frequência elétrica aplicada ao estator for diminuída em 10%, permanecendo constante o valor da tensão aplicada, o fluxo no núcleo do motor aumentará em torno de 10% e a corrente de magnetização do motor subirá.

Na região não saturada da curva de magnetização do motor, o aumento da corrente de magnetização será também em torno de 10%, porém na região saturada da curva de magnetização para que haja um aumento de 10% de fluxo, deverá haver um aumento muito maior da corrente de magnetização. De acordo com Chapman (2013), os motores de indução são projetados para operar próximo do ponto de saturação de suas curvas de magnetização. Desse modo, o aumento de fluxo em decorrência da diminuição na frequência fará com que correntes de magnetização excessivas circulem no motor.

Para se evitar correntes de magnetização excessiva e sempre que a frequência estiver abaixo da nominal, a tensão aplicada ao estator é diminuída de forma diretamente proporcional à diminuição da frequência.

Se a tensão aplicada a um motor de indução for variada de forma linear com a frequência abaixo da velocidade base, o fluxo do motor permanecerá praticamente constante e deste modo o conjugado máximo que o motor pode fornecer mantém-se bem elevado. Contudo, a potência nominal máxima do motor deverá ser diminuída através do decréscimo de frequência para proteger o circuito de estator do sobreaquecimento (CHAPMAN, 2013).

Para um motor de indução trifásico, a potência fornecida é dada por:

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (24)$$

Assim, é possível observar que se a tensão de linha eficaz (V_L) for diminuída, a potência máxima P deverá ser diminuída também, de outro modo, a corrente que flui no motor será excessiva fazendo com que o motor sobreaqueça.

Na figura 13-a) são apresentadas as curvas características de conjugado versus velocidade abaixo da velocidade base, assume-se que o valor da tensão do estator varia de forma linear com a frequência.

Caso a frequência elétrica aplicada ao motor seja maior do que a frequência nominal, a tensão do estator deverá ser mantida com o valor nominal. Se o comportamento da saturação for analisado e levado em consideração, pode-se elevar a tensão acima do valor nominal do motor. Porém, a fim de se proteger a isolação do enrolamento do motor, a tensão é limitada ao valor nominal. Quanto mais elevada for a frequência elétrica em relação à velocidade base, o fluxo resultante na máquina diminui e o conjugado máximo também diminui. Assumindo que a tensão do estator é mantida constante, na figura 13-b) são apresentadas as curvas características de conjugado versus velocidade do motor de indução para velocidades superiores a velocidade base.

Como afirma Chapman (2013), se, abaixo da velocidade base, a tensão de estator for variada linearmente com a frequência e, acima da velocidade base, for mantida constante no valor nominal, então as curvas resultantes são como as apresentadas na figura 13-c).

2.2.5.2 Controle de velocidade por mudança de tensão de linha

O conjugado desenvolvido por um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada (CHAPMAN, 2013). Considerando que uma carga tenha uma característica de conjugado versus velocidade, como o exposto na figura 8, se a tensão de linha for variada a velocidade do motor poderá ser controlada dentro de uma determinada faixa limitada. Esse método é mais utilizado para pequenos motores que acionam ventiladores e pequenas máquinas.

2.3 INVERSORES

Circuitos utilizados para converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) são denominados inversores, eles transferem potência de uma fonte CC para uma carga CA. Um dos objetivos dos inversores é criar uma tensão CA quando houver somente uma fonte CC disponível (HART, 2012).

Como define Fitzgerald *et al.* (2006), inversores são algumas configurações de circuitos que podem ser usadas para converter CC na potência elétrica, de frequência e tensão variáveis, que é requerida para muitas aplicações de acionamentos de motores.

Há uma grande diversidade de topologias e configurações de inversores com características específicas para certas aplicações. No estudo desenvolvido neste trabalho, são abordadas as principais topologias e que são de interesse para o estudo em questão.

2.3.1 Conversor em ponte completa

A topologia de conversor em ponte completa é o circuito básico para converter CC em CA. Neste tipo de conversor, visto na figura 12, uma saída CC é sintetizada a partir de CC através do fechamento e abertura de chaves numa sequência adequada. A depender de que chaves estão fechadas e/ou abertas, a tensão de saída v_0 pode ser $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$, ou até zero. A tabela 1 abaixo mostra a tensão na saída v_0 conforme a combinação de chaves fechadas.

Tabela 1 – Chaves fechadas e tensão de saída resultante.

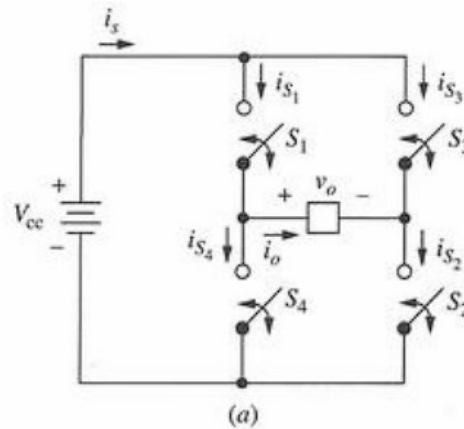
Chaves Fechadas	Tensão na saída v_0
S1 e S2	$+V_{cc}$
S3 e S4	$-V_{cc}$
S1 e S3	0
S2 e S4	0

Fonte: Hart (2012, p. 333)

É válido observar que S_1 e S_4 não podem ser fechadas ao mesmo tempo, nem S_2 e S_3 , pois isso acarretaria em um curto circuito na fonte CC. No controle de abertura e fechamento das chaves é preciso acomodar os tempos de transição de chaveamento ou comutação. Se houver sobreposição de chaves quando “ligadas” ocorrerá um curto-circuito, ou falha de

disparo-direto, na fonte CC. Este tempo que é permitido para o chaveamento é chamado de tempo morto ou tempo branco.

Figura 14 – Conversor em ponte completa.



Fonte: Hart (2012, p. 334)

2.3.2 Inversor com onda quadrada

O esquema mais simples de chaveamento para o conversor em ponte completa produz uma tensão na saída com onda quadrada (HART, 2012). Se S_1 e S_2 são fechadas, a chave conecta $+V_{cc}$ à carga, ou $-V_{cc}$ quando estiverem fechadas S_3 e S_4 . Este chaveamento periódico da tensão para a carga nessa faixa entre $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ produz uma tensão com onda quadrada na carga. Mesmo que esta saída não esteja na forma de uma senóide, em algumas aplicações ela é uma forma adequada de alimentação.

A forma de onda da corrente na carga dependerá dos componentes da carga, se for uma carga resistiva, a forma de onda da corrente será igualada com a forma da tensão de saída. Já se a carga for indutiva, ela terá uma corrente com qualidade mais próxima de senoidal do que a tensão por conta da propriedade de filtragem da indutância.

Considerando uma carga RL em série e uma tensão na saída com onda quadrada, se supormos que as chaves S_1 e S_2 , na figura 14, fechem no instante $t = 0$, a tensão na carga é $+V_{cc}$ e a corrente aumentará tanto na carga quanto em S_1 e S_2 . Esta corrente é expressada pela soma das respostas forçada e natural (HART, 2012).

$$i_0(t) = i_f(t) + i_n(t) = \frac{V_{cc}}{R} + Ae^{-t/\tau} \quad \text{para } 0 \leq t \leq T/2 \quad (25)$$

Onde A é uma constante avaliada a partir da condição inicial em $\tau = L/R$.

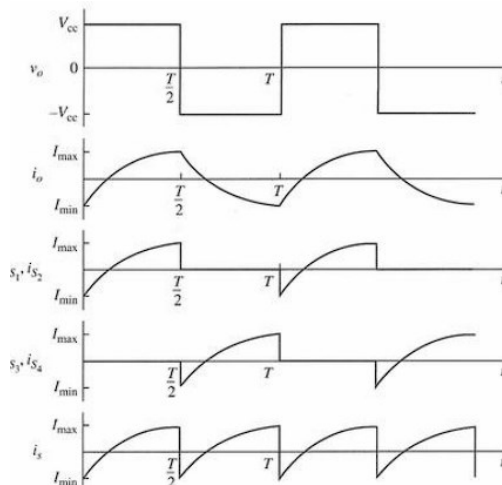
Em $t = T/2$, S_1 e S_2 abrem e S_3 e S_4 fecham, assim a tensão na carga RL torna-se $-V_{cc}$ e a corrente tem a forma:

$$i_0(t) = \frac{-V_{cc}}{R} + B e^{-(t-T/2)/\tau} \text{ para } T/2 \leq t \leq T \quad (26)$$

Onde a constante B é avaliada a partir da condição inicial.

De acordo com Hart (2012), quando o circuito é energizado pela primeira vez e a corrente inicial no indutor é zero, ocorre um transiente antes que a corrente na carga atinja uma condição de estado estável. Na condição de estado estável, i_0 é periódica e simétrica perto de zero, como é notado na figura 15. Admitindo que na equação 25, a condição inicial para a corrente seja I_{min} e a condição inicial para a corrente descrita na equação 26 seja I_{max} .

Figura 15 – Tensão na saída com forma de onda quadrada e forma de onda da corrente no estado estável para uma carga RL.



Fonte: Hart (2012, p. 336)

Avaliando a equação 25 em $t = 0$, e da mesma forma a equação 26 para $t = T/2$. Fazendo as devidas simplificações chega-se que, no estado estável as formas de onda das correntes descritas pelas equações 27 e 28 se tornam então:

$$i_0(t) = \frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-t/\tau} \text{ para } 0 < t < T/2 \quad (27)$$

$$i_0(t) = \frac{-V_{cc}}{R} + \left(I_{max} + \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{(t-T/2)/\tau} \text{ para } T/2 < t < T \quad (28)$$

Avaliando a equação 27 em $T/2$ é obtida uma expressão para I_{max} e por simetria I_{min} , pois $I_{min} = -I_{max}$. Feita essa análise, chega-se na expressão para I_{max} I_{min} como sendo:

$$I_{max} = -I_{min} = \frac{V_{cc}}{R} \left(\frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \right) \quad (29)$$

A corrente numa carga RL no estado estável, pode ser descrita pelas equações (27), (28) e (29) quando é aplicada uma tensão com forma de onda quadrada. Na figura 13 estão a forma das correntes resultantes na carga, fonte e chaves.

Segundo Hart (2012), a potência absorvida na carga pode ser determinada por $I_{rms}^2 R$, como mostrado na equação (30). A parte de integração pode ser simplificada, pois a forma de onda é simétrica, como pode-se considerar que cada quadrado do semiperíodo da corrente é idêntico, é possível avaliar apenas o primeiro semiperíodo.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[\frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-t/\tau} \right]^2 dt} \quad (30)$$

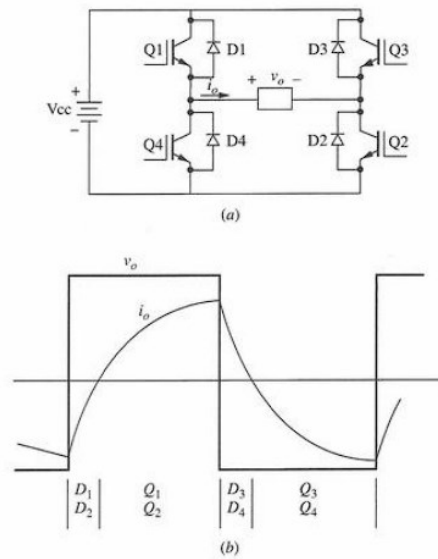
Se considerarmos as chaves como sendo ideais, a potência fornecida pela fonte deverá ser a mesma potência que a carga absorve. Na fonte cc, a potência absorvida é:

$$P_{cc} = V_{cc} I_s \quad (31)$$

As correntes nas chaves apresentadas na figura 15, mostram que no circuito em ponte completa, as chaves devem ser capazes de conduzir as correntes tanto positivas como negativas para a carga RL. Pensando nos circuitos eletrônicos reais, como eles só podem conduzir corrente em um único sentido, é necessário o uso de diodos de realimentação em paralelo (antiparalelo), em cada chave. Quando a corrente na chave é negativa, o diodo de regeneração transporta a corrente. Já quando a corrente é positiva, os diodos ficam polarizados reversamente e não conduzem (HART, 2012).

O inversor em ponte completa, com as chaves implementadas com transistores bipolares com porta isolada (IGBTs) e diodos de regeneração, pode ser visto na figura 16-a). As correntes, tanto no diodo quanto no transistor para uma tensão em onda quadrada e carga RL, estão representadas na figura 16-b).

Figura 16-a) Inversor em ponte completa usando IGBTs; b) Corrente no estado estável para uma carga RL.

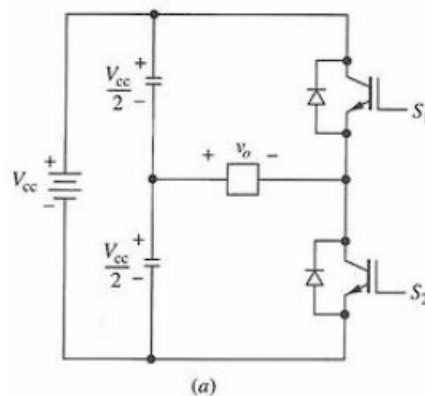


Fonte: Hart (2012, p. 339)

2.3.3 Inversor em meia ponte

O circuito do conversor em meia ponte, apresentado na figura 17, pode ser usado como inversor para ser aplicado em fontes de alimentação CC. Este circuito possui o número de chaves reduzido para dois, por conta da divisão de tensão CC da fonte em duas partes com os capacitores. Cada capacitor terá os mesmos valores e tensão de $V_{cc}/2$. Na alternância das chaves, quando S_1 é fechada a tensão na carga é $-V_{cc}/2$, se S_2 é fechada, a tensão na carga muda para $+V_{cc}/2$ (HART, 2012).

Figura 17 – Inversor em meia ponte usando IGBTs.



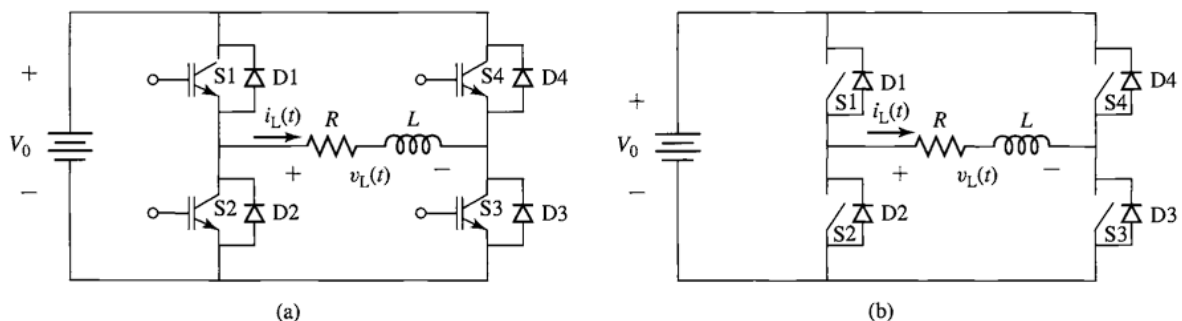
Fonte: Hart (2012, p. 349)

A tensão na chave, quando está aberta, é duas vezes a tensão na carga, ou V_{cc} . Assim, como visto no inversor em ponte completa, para evitar um curto-circuito na fonte é necessário que haja um “tempo morto” entre a abertura das chaves e também são necessários diodos de regeneração para possibilitar uma continuidade de corrente nas cargas indutivas.

2.3.4 Inversores trifásicos

Conforme cita Fitzgerald *et al.* (2006), a maioria dos acionamentos de frequência variável é trifásica. Nas figuras 18-a) e 18-b) são mostradas as configurações básicas dos inversores trifásicos de motores – Fontes de tensão e de corrente. As chaves mostradas são consideradas ideais, mas sabe-se que a capacidade de bidirecionalidade é obtida, em uma implementação prática, combinando-se componentes semicondutores de chaveamento, como um IGBT e um MOSFET, e um diodo de polaridade oposta – regeneração.

Figura 18 – Inversores com configurações trifásicas a) Fonte de tensão b) Fonte de corrente

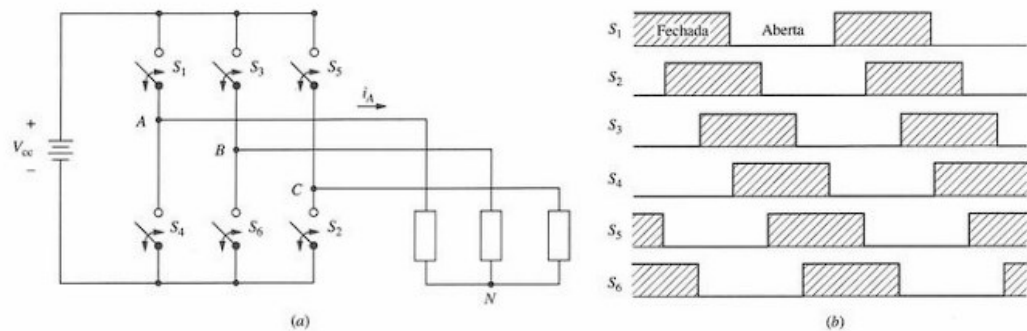


Fonte: Fitzgerald *et al.* (2006, p. 520)

2.3.4.1 Inversor de seis graus

Na figura 19-a), é apresentado um circuito que a partir de uma fonte CC produz uma saída trifásica CA. Uma das principais aplicações deste circuito é para realizar o controle de rotação de motores de indução através da variação da frequência de saída. A comutação das chaves é feita na sequência mostrada na figura 19-b).

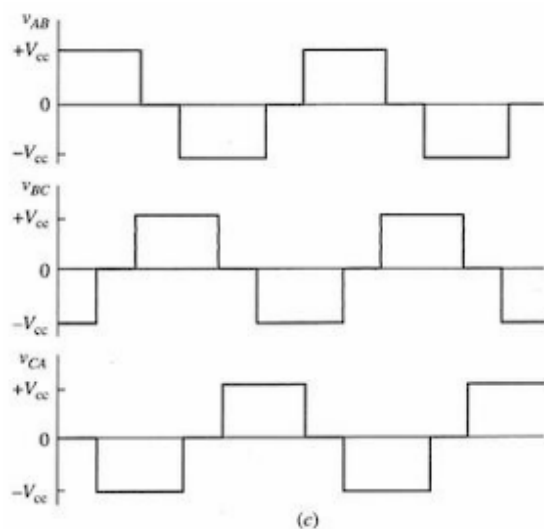
Figura 19 – a) Inversor trifásico; b) Sequência de chaveamento para os seis degraus na saída.



Fonte: Hart (2012, p. 376)

Conforme Hart (2012), cada chave tem uma taxa de trabalho igual a 50%, e a ação do chaveamento ocorre a cada intervalo de tempo $T/6$, ou intervalos com ângulos de 60° . Importante notar que as chaves S_1 e S_4 fecham e abrem de forma oposta uma à outra, assim como nos pares (S_2 e S_5) e (S_3 e S_6). Como nos inversores monofásicos estudados, esses pares de chaves devem trabalhar de uma maneira que não sejam fechadas ao mesmo tempo para evitar que ocorra um curto-circuito na fonte. Desta forma, as tensões instantâneas v_{A0} , v_{B0} e v_{C0} são $+V_{cc}$ ou zero. A tensão de linha de saída v_{AB} , v_{BC} e v_{CA} são $+V_{cc}$, zero ou $-V_{cc}$. Na figura 20 é apresentada a tensão na saída produzida pela sequência de chaveamento da figura 19-b).

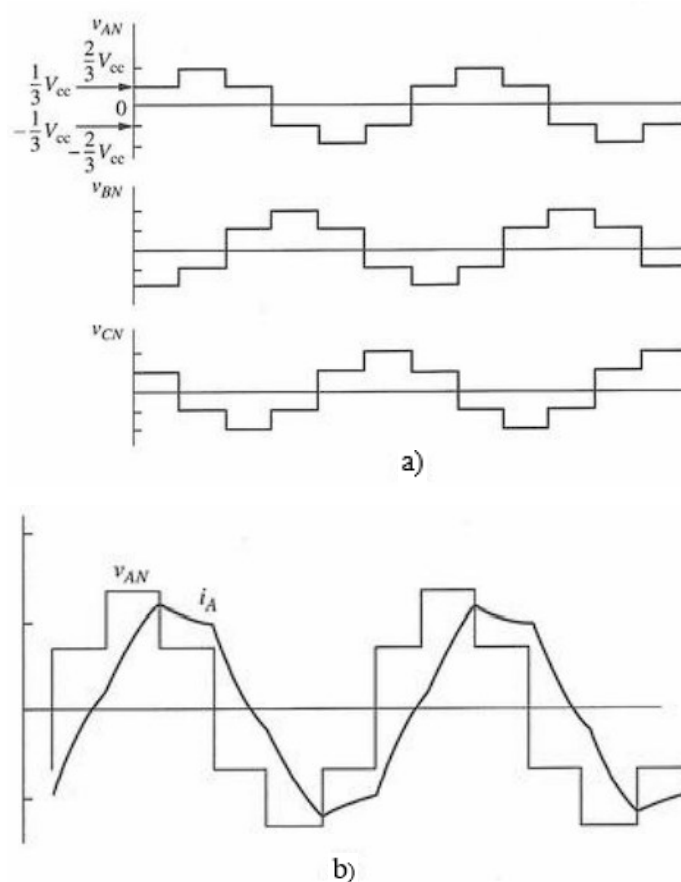
Figura 20 – Tensão de linha a linha na saída.



Fonte: Hart (2012, p. 376)

Nesta tensão de saída, pode ser feita a conexão de uma carga trifásica em ligação triângulo ou em estrela, com o neutro não aterrado. Se a ligação for em estrela, a conexão mais comum de cargas, as tensões e corrente são mostradas na figura 21. Este circuito é chamado de inversor de seis degraus, por causa das formas de onda da saída da tensão de fase, resultante das seis comutações por período (HART, 2012).

Figura 21 – a) tensão por fase para uma carga conectada em estrela não aterrada; b) corrente na fase A para uma carga RL.



Fonte: Hart (2012, p. 377)

Segundo Hart (2012), as séries de Fourier para a tensão na saída têm uma frequência fundamental igual à frequência de chaveamento. As frequências das harmônicas são de ordens $6k \pm 1$, para $k = 1, 2, \dots$ ($n = 5, 7, 11, 13, \dots$). As harmônicas pares, a terceira e as múltiplas da terceira harmônica não existem.

Considerando uma tensão na entrada de V_{cc} , uma carga conectada em estrela não aterrada, terá uma saída com os seguintes coeficientes de Fourier:

$$V_{n,L-L} = \left| \frac{4V_{cc}}{n\pi} \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) \right|$$

$$V_{n,L-N} = \left| \frac{2V_{cc}}{3n\pi} \left[2 + \cos\left(n \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right| \quad n = 1, 5, 7, 11, 13, \dots \quad (32)$$

A frequência de saída pode ser alterada mudando-se a frequência de chaveamento. A magnitude da tensão na saída dependerá do valor da tensão de entrada da tensão CC de alimentação. Ajustando-se a tensão CC de entrada, é possível controlar a tensão na saída do inversor de seis degraus.

2.3.4.2 Inversores trifásicos com PWM

A modulação por largura de pulso (PWM) pode ser utilizada tanto para os inversores monofásicos como para os inversores trifásicos. O chaveamento PWM possui algumas vantagens: filtros reduzidos para a redução das harmônicas e possibilidade de controle da amplitude da frequência fundamental (HART, 2012).

O funcionamento do chaveamento PWM consiste que cada chave é controlada pela comparação da referência da onda senoidal com a onda triangular portadora. A frequência fundamental da saída não difere da frequência da onda de referência. A amplitude de saída é estabelecida pelas amplitudes relativas das ondas de referência e da portadora.

Nos inversores trifásicos de seis degraus, as chaves mostradas na figura 19-a) precisam ser controladas aos pares, como sendo (S₁, S₄), (S₂, S₅) e (S₃, S₆). Assim, alternadamente, quando um par de chaves é fechado, o outro é aberto. Cada um dos pares de chave precisa de uma referência com onda senoidal. Cada uma das três senoides de referências são separadas por 120°, para que a saída trifásica seja balanceada (HART, 2012). O controle das chaves segue a ordem a seguir:

S₁ é ligada quando $v_a > v_{tri}$

S₂ é ligada quando $v_c > v_{tri}$

S₃ é ligada quando $v_b > v_{tri}$

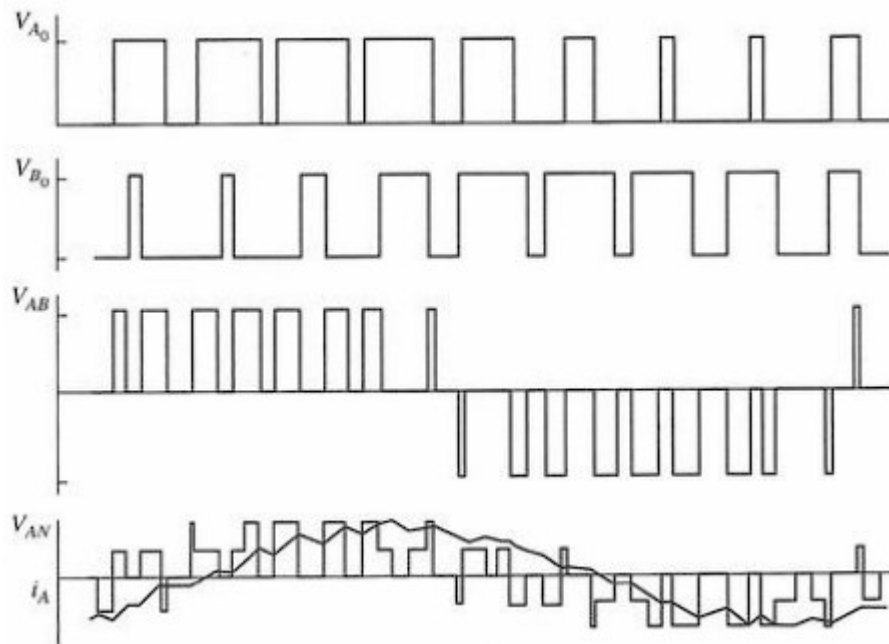
S₄ é ligada quando $v_a < v_{tri}$

S₅ é ligada quando $v_c < v_{tri}$

S₆ é ligada quando $v_b < v_{tri}$

Segundo Hart (2012), as harmônicas serão minimizadas se a frequência da portadora for escolhida tendo frequências de referência com números ímpares e múltiplos de 3, isto é, 3, 9, 15... vezes a frequência. Na figura 22, é possível observar as tensões para um PWM do inversor trifásico.

Figura 22 – Formas de onda da tensão na saída e forma de onda da corrente para uma carga RL.



Fonte: Hart (2012, p. 379)

Para as tensões de linha a linha, os coeficientes de Fourier para o esquema de chaveamento do PWM trifásico são relacionados com os do PWM bipolar do monofásico, tratado na seção 8.12 de Hart (2012), por:

$$V_{n3} = \sqrt{A_{n3}^2 + B_{n3}^2} \quad (33)$$

onde,

$$A_{n3} = V_n \text{sen} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi}{3} \right) \quad (34)$$

$$B_{n3} = V_n \text{cos} \left(\frac{n\pi}{2} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi}{3} \right) \quad (35)$$

Os principais coeficientes de Fourier estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Amplitudes normalizadas V_{n3}/V_{cc} para as tensões de linha a linha do PWM trifásico.

	$m_a = 1$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$n = 1$	0,866	0,779	0,693	0,606	0,520	0,433	0,346	0,260	0,173	0,087
$m_f = 2$	0,275	0,232	0,190	0,150	0,114	0,081	0,053	0,030	0,013	0,003
$2m_f = 1$	0,157	0,221	0,272	0,307	0,321	0,313	0,282	0,232	0,165	0,086

Fonte: Hart (2012, p. 333)

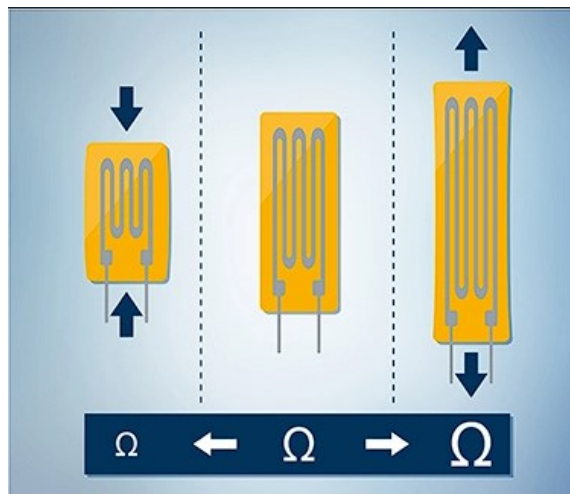
2.4 TRANSDUTOR DE TORQUE

Os sensores de torque possuem diversos modelos e configurações, porém todos eles têm algumas características em comum. São abordados no decorrer deste tópico o projeto de alguns sensores para entender como os transdutores de torque funcionam (HBM AN HBK COMPANY, 2022).

2.4.1 Strain Gauge

Os transdutores de torque utilizam para a medição a tecnologia de *strain gauge* (SG). Neste tipo de sensor, geralmente em um corpo de metal, são montados os *strain gauge*, que são formados por uma folha fina e um condutor elétrico firmemente conectado a ela. À medida que a folha, juntamente com o condutor, muda de forma, há também uma mudança na resistência elétrica. Dessa forma, é possível avaliar quanta carga está atuando naquele momento no SG (HBM AN HBK COMPANY, 2022). Na figura 23, é apresentado o aspecto do *strain gauge* e seu comportamento sob a ação de forças externas.

Figura 23 – *Strain gauge* e a influência de forças externas sob a resistência do condutor.



Fonte: Hbm An Hbk Company (2022)

Sob a ação de uma carga externa atuando no sensor, o SG se deforma, assim como o elemento da mola, aumentando e diminuindo a resistência, conforme o sentido da carga, podendo dessa forma dar início a medição.

Segundo informa Hbm An Hbk Company (2022), o corpo de medição de um transdutor de torque não está sujeito à tensão ou compressão, mas à *torção*. Este tipo de sensor não é submetido a forças atuando em uma ou duas direções opostas, mas sim a uma força de alavanca ou torque. Portanto, os *strain gauges* que equipam os sensores de torque são especiais, pois são ótimos em registrar cargas por torção.

Dois projetos comuns de transdutores de torque são o *eixo de medição* e o *flange de medição*.

2.4.2 Eixo de medição de torque

O eixo de medição consiste em um eixo, muitas vezes oco, onde os SGs são montados, geralmente em uma seção cônica no meio do eixo. Este eixo é fechado por uma caixa. O eixo, ou rotor, é a parte móvel do transdutor, enquanto a carcaça ou estator é fixa. Estas duas peças são interconectadas por rolamentos de baixa fricção e folga zero. O eixo de medição de torque é mostrado na figura 24.

Figura 24 – Exemplo de eixo de medição de torque.



Fonte: Hbm An Hbk Company (2022)

O transdutor pode ser montado em uma bancada ou estrutura de testes através de grampos do tipo cubo, em ambas as extremidades do eixo.

2.4.3 Flange de medição de torque

Mesmo apresentando uma estrutura semelhante aos eixos de medição, os flanges de medição, como mostrado na figura 25, são diferentes. São formados por um eixo principalmente oco e extremamente curto, e nas extremidades do eixo estão situados os flanges. Assim, é possível integrar o transdutor a uma estrutura ou bancada de teste por meio de uma conexão com rosca. Os flanges de medição também consistem em um rotor e estator. Porém, diferentemente dos eixos de medição, o rotor não está totalmente fechado na carcaça, e assim nenhum conjunto de rolamentos é necessário, visto que o rotor está instalado com segurança na seção de medição (HBM AN HBK COMPANY, 2022).

Figura 25 – Flange de medição de forma simplificada.



Fonte: Hbm An Hbk Company (2022)

2.4.4 Transmissão dos dados do transdutor – sem contato

No caso de transdutores rotativos, os cabos que fornecem a energia e fazem o transporte dos dados, não podem ser utilizados, pois desta maneira os cabos ficariam emaranhados à medida que o rotor gira. Por esta razão, a energia é transferida do estator para o rotor usando conexão sem contato, que também fornece a ponte de medição SG montada. Os dados medidos do rotor são transferidos para o estator via telemetria.

A parte eletrônica do transdutor é alojada no corpo de medição, o sinal da ponte de medição SG é amplificado, filtrado e digitalizado para depois ser transferido sem fio para o estator. O envio dos dados pode ser por meio de um sinal de frequência, ou tensão, ou digitalmente (HBM AN HBK COMPANY, 2022).

2.4.5 Medição de torque rotativo ou não rotativo

De acordo com Hbm An Hbk Company (2022), ao medir o torque, o transdutor nem sempre gira, há algumas configurações não rotativas onde o transdutor é suportado pela carcaça do motor elétrico e o eixo de acionamento passa por um orifício central no sensor.

Em grande parte das aplicações do transdutor, o sensor faz parte do trem de força rotativo entre a amostra de teste e o dinamômetro. Exemplos desse tipo de amostra são motor de combustão interna, caixa de câmbio ou motor elétrico.

2.4.6 Medição de torque estático ou dinâmico

O torque pode ser medido de duas formas – estático ou dinamicamente. O torque pulsante gerado quando os elementos rotativos são continuamente acelerados e depois desacelerados é um exemplo de medição dinâmica. Este tipo de torque dinâmico pode também ocorrer sem rotação, contudo, em aplicações como bancadas de teste de motor, o torque dinâmico ocorre em conexão com a rotação.

2.4.7 Aplicações típicas para transdutores de torque

Conforme Hbm An Hbk Company (2022), os transdutores de torque são ideais para todos os tipos de testes de motor e acionamento no campo da pesquisa e desenvolvimento. A

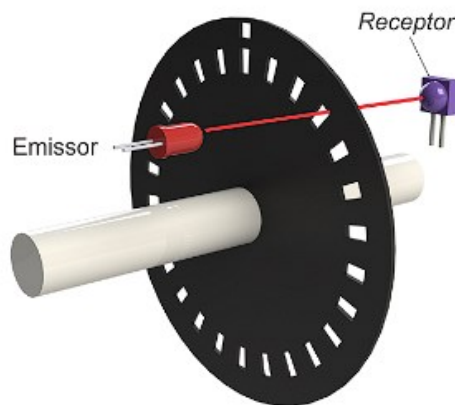
precisão na mediação de torque é indispensável para melhorar a eficiência de novos acionamentos, visto que permite determinar e minimizar as perdas por atrito. Em motores elétricos e híbridos, prioriza-se o alcance e melhoria da eficiência.

2.5 ENCODER

Um *encoder* é um dispositivo que fornece uma saída digital como resultado de um deslocamento linear ou angular. Os *encoders* podem ser agrupados em duas categorias: incrementais e absolutos (BOLTON *et al.*, 2010). Através do uso de *encoders*, pode-se quantizar distâncias, controlar velocidades, medir ângulos, números de rotações, e realizar posicionamentos (ALMEIDA, 2016).

O *encoder* é formado por um disco com marcações, um componente emissor e um receptor. Nos *encoders* ópticos é utilizado um led, como o componente emissor, e um sensor fotodetector como o receptor. Na figura 26, um esquema simplificado do sistema do *encoder* é mostrado.

Figura 26 – Emissor, receptor e disco com marcações.

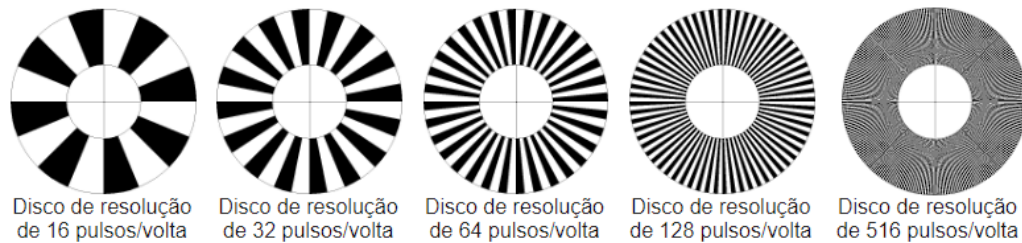


Fonte: Almeida (2016)

A função das marcações no disco é a de bloquear e desbloquear o feixe de luz emitido pelo led para o fotodetector, assim, à medida que o disco gira, o fotodetector, juntamente com um circuito eletrônico, repassa para as saídas do *encoder* um sinal em forma de onda quadrada. Este sinal é proporcional ao número de marcações do *encoder*. A resolução do *encoder* é definida como o número de marcações presentes no disco do dispositivo, ou que respectivamente equivale a quantidade de ondas quadradas, ou clock, gerado em cada volta do

encoder (ALMEIDA, 2016). Alguns exemplos de resolução de *encoders* são mostrados na figura 27.

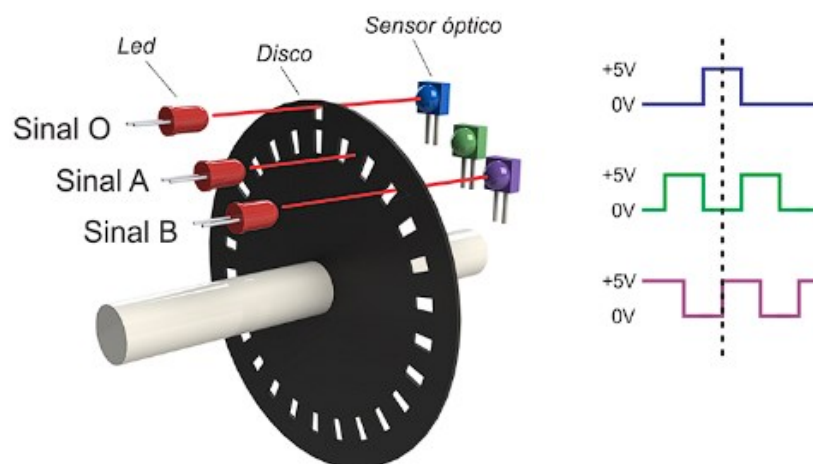
Figura 27 – Disco de resolução de *encoder*.



Fonte: Almeida (2016)

O *encoder*, do tipo *óptico incremental*, possui 3 sinais de saída: “A”, “B” e “O”, pelos quais é possível adquirir o ângulo de rotação, o sentido da rotação e o início/fim de uma volta. O sinal principal é o “A”, pois fornece os pulsos à medida que o *encoder* gira. A função do sinal “B” é equivalente ao sinal “A”, porém com defasagem em $+90^\circ$ ou -90° , o objetivo é sinalizar o sentido de rotação. O sinal “O” indica o início de uma revolução. A figura 28 exhibe a formação do *encoder* com os 3 sinais descritos.

Figura 28 – *Encoder* óptico incremental com sinais “A”, “B” e “O”.

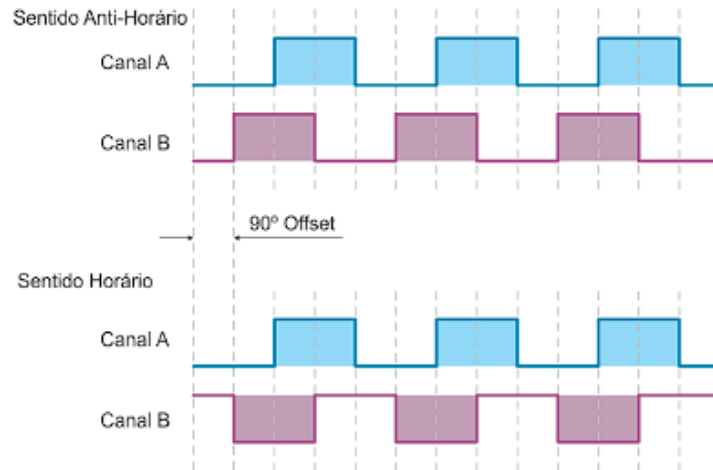


Fonte: Fonte: Almeida (2016)

Analisando o funcionamento do *encoder*, se o sinal “B” estiver adiantado em 90° do sinal “A”, quer dizer que o *encoder* estará girando no sentido anti-horário, neste caso a borda de subida do sinal “A” se encontra com o sinal B no estado 1, da mesma forma, quando o sinal

“B” estiver em “zero”, durante a borda de subida do sinal “A”, o movimento do *encoder* estará girando no sentido horário. Esta abordagem pode ser vista na figura 29.

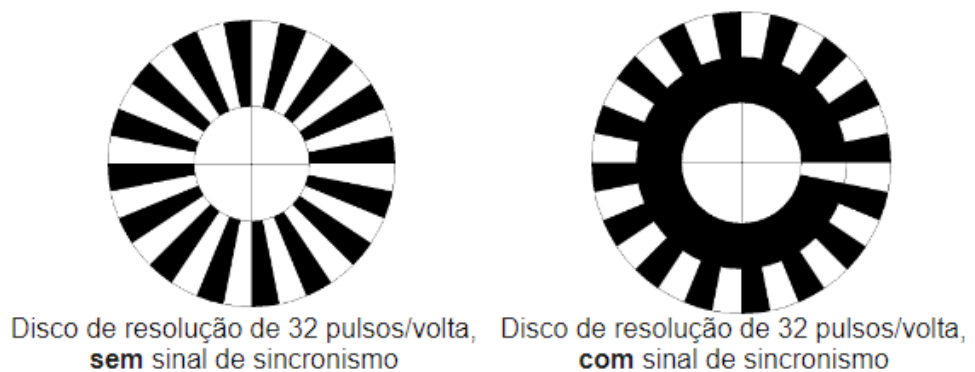
Figura 29 – Posição dos sinais “A” e “B” conforme o sentido de giro do *encoder*.



Fonte: Fonte: Almeida (2016)

O objetivo do terceiro sinal do *encoder*, sinal “O”, é indicar a posição “0” (zero) do *encoder*, dessa forma detecta-se o número de voltas completas geradas pelo dispositivo acoplado ao *encoder*. A diferença entre um disco com e sem sinal de sincronismo (sinal “O”) é vista na figura 30.

Figura 30 – Disco com e sem sinal de sincronismo.



Fonte: Fonte: Almeida (2016)

2.5.1 Sinais de saídas do encoder

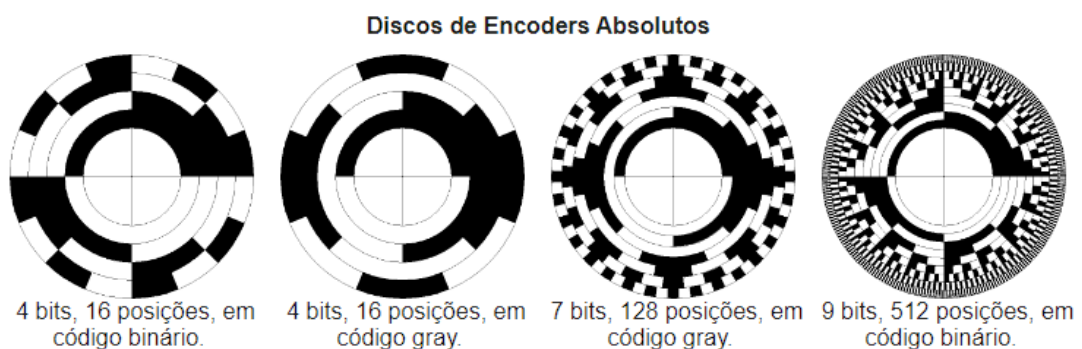
Considerando-se os tipos de sinais de saídas dos *encoders*, tem-se o *encoder* incremental e o absoluto.

Encoder incremental: neste tipo de *encoder* é indicada a posição relativa ao ponto onde o *encoder* foi ativado. Pode possuir as 3 saídas A, B e O ou pode ser do tipo diferencial com os sinais A, /A, B, /B, Z e /Z.

Encoder absoluto: São dispositivos de construção mais complexa, portanto mais caros. A posição absoluta é indicada através de saídas digitais codificadas em um valor binário ou via comunicação.

Nos *encoders* absolutos, segundo Almeida (2016), a resolução é representada em bits que correspondem ao número de faixas disponíveis no sensor, se o *encoder* for de 4 bits, irá gerar uma representação de posição absoluta de 16 valores. Se comparado ao *encoder* incremental, o absoluto tem a vantagem de que, em qualquer momento, mesmo como uma possível queda de energia, é possível saber a posição do dispositivo sem ser necessário ressincronizar a posição. Discos de diferentes resoluções de *encoders* absolutos são apresentados na figura 31.

Figura 31 – Discos de *encoders* absolutos.



Fonte: Fonte: Almeida (2016)

2.6 ANALISADOR DE ENERGIA

O analisador de energia é um equipamento essencial para análise de energia minuciosa e eficiente, em grandes empresas, em indústrias e também em comércios (INSP THERM TRAFOSERVICE, 2021). Conforme Hbm An Hbk Company (2022), o analisador de energia

é utilizado para medir o fluxo de potência em um sistema elétrico. Isto se refere à taxa de transferência elétrica entre uma fonte de energia e um dissipador.

A medição de energia, mesmo que seja possível de ser realizada com facilidade usando um analisador de potência convencional, por se tratar de um processo crítico no desenvolvimento de um projeto, demanda de sistemas mais avançados que adquirem sinais elétricos e realizam cálculos integrados para análises adicionais e complexas (HBM AN HBK COMPANY, 2022).

2.6.1 Princípio de funcionamento.

Os analisadores de energia são utilizados para medir o fluxo de energia, tanto em sistemas de corrente alternada (CA) quanto de corrente contínua (CC), com considerações distintas para medir circuitos CA.

De acordo com Hbm An Hbk Company (2022), a determinação do período de tempo de um sinal elétrico é a base de cada um dos cálculos subsequentes realizados pelo instrumento de medição. Por este processo ser complicado em medições CA, em que o quadrado médio da raiz é normalmente expresso como um valor CC equivalente, para se determinar com precisão o valor eficaz de uma forma de onda CA, deve-se calcular uma média ao longo do ciclo da frequência CA. Este desenvolvimento é definido como a frequência fundamental do circuito. De forma digital, os analisadores de energia podem detectar os ciclos de frequência para fornecer períodos RMS confiáveis durante a conversão de energia.

O analisador de energia detecta também outras grandezas elétricas como a tensão e corrente do sistema. Os sistemas típicos fazem a aquisição diretamente de tensões individuais usando divisores de tensão, e a medição da corrente é normalmente feita utilizando-se um transformador, onde uma bobina mede o campo elétrico de um fio que transporta uma corrente ou um transdutor de corrente do tipo fluxgate (HBM AN HBK COMPANY, 2022).

Com cada um desses valores tendo sido determinado, o analisador de energia pode calcular outros parâmetros matematicamente.

Alguns dos parâmetros elétricos mais comuns que os analisadores de energia detectam são:

- Valores máximos e mínimos das tensões de fase e das tensões de linha;
- Distorção harmônica de tensão (THD v);
- Distorção harmônica de corrente (THD i);

- Desbalanceamento de tensão e corrente;
- Nível do carregamento de circuitos;
- Potência ativa por fase e total;
- Potência aparente por fase;
- Fator de potência trifásico e por fase;
- Frequência em Hz;

2.6.2 Análise avançada de energia

Conforme Hbm An Hbk Company (2022), analisadores de energia além de medições de energia, são frequentemente necessários para medir vários valores de energia mecânica, como torque e velocidade, que são fatores críticos para bancada de testes e aplicações de fabricação. Estes equipamentos fornecem dados confiáveis para uma ampla averiguação sobre o desempenho e a eficiência de sistemas eletromecânicos. Dentre os cálculos adicionais e métodos analíticos realizados por analisadores avançados de energia, estão:

- Mapeamento de eficiência;
- Transformada rápida de Fourier (FFT) e análise harmônica;
- Valores de potência fundamental e raiz quadrada média (RMS);
- Diagramas polares e componentes simétricos;
- Vetores espaciais e correntes DQ.

2.6.3 A importância do analisador de qualidade de energia

O analisador é uma importante ferramenta para identificar anormalidades no fornecimento de energia, identificar e avaliar problemas na rede. No meio industrial, pode detectar problemas elétricos como sobrecargas, distorção harmônica que podem gerar prejuízos e também diminuir a vida útil de equipamentos e componentes elétricos/eletrônicos (INSP THERM TRAFOS SERVICE, 2021).

A constatação destes problemas por meio do analisador de energia, pode evitar que graves acidentes de trabalho aconteçam, além de que irregularidades na distribuição de energia pode danificar computadores e outros eletrônicos mais sensíveis. Ainda, com a eficiência de energia prejudicada pelas falhas, pode-se ter um aumento nas tarifas de energia.

2.7 INTERFACE HOMEM MÁQUINA

O equipamento conhecido como interface homem máquina (IHM), trata-se de uma aplicação em uma tela, que visa facilitar e tornar mais eficiente a comunicação entre pessoas e máquinas (ENGPROCESS AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2022). Segundo Altus (2022), é um recurso que atua como mediador da interação entre um operador e um sistema de automação.

Em casos onde a IHM é utilizada em máquinas de propósitos variados, elas são equipadas com receitas, registros de eventos, sistemas de vídeo, alarmes, entre outras informações que demandam acesso imediato pelo operador. Um modelo de IHM, é mostrada na figura 32.

Figura 32 – Modelo de IHM



Fonte: Altus (2022).

2.7.1 Função da IHM

Em sistemas de controle típico, a função da IHM é acessar o CLP, ler os dados coletados e projetá-los de forma visual, assim o operador do sistema pode tomar decisões com base na situação real da máquina ou processo. Com a tomada de decisão, o operador pode enviar comandos na IHM para que ela faça o caminho contrário, transmitindo as informações ao CLP para que ele altere algum aspecto do sistema de controle (ALTUS, 2022).

Os principais motivos para o uso de uma IHM em um sistema são:

- Acompanhar em tempo real o processo de produção ou sistema;
- Monitorar e revisar processos;

- Visualizar tendências, tags e dados;
- Monitorar entradas e saídas;
- Traduzir dados;
- Receber diagnósticos de problemas e alarmes;
- Armazenar dados históricos de processos;

2.7.2 Vantagens de se utilizar uma IHM

O uso de uma IHM em um equipamento proporciona muitas vantagens, que variam de acordo com o objetivo de cada aplicação. Uma vantagem é o elevado grau de conectividade que esse equipamento possui. Muitas IHMs contam com diversas interfaces de comunicação (USB, RS-23, RS-485, Wifi, 3G/4G, Ethernet) e suporte aos mais variados protocolos (MODBUS, PROFIBUS, PROFINET, OPC UA, EtherNet/IP, MQTT, entre outros). Através desses recursos, pode-se se comunicar com praticamente todos os dispositivos inteligentes atuantes em uma rede de automação.

A facilidade de configuração e a alta capacidade de personalização das telas das IHMs é outro diferencial a favor do seu uso. Elas permitem criar telas específicas, com diferentes rotinas de monitoramento, e controle para cada aspecto da aplicação a qual está conectada.

Pelo fato de estarem sempre acessíveis, se houver uma variação no processo ou sistema, o operador é prontamente comunicado através de alarmes ou avisos configurados na tela da IHM. Com isso, a uma redução de perdas e, conseqüentemente, redução de custos gerais no processo e projetos.

Por último, vale destacar que também é possível agregar o controle de níveis de acesso por usuário e senha, a fim de definir o alcance de cada usuário à aplicação.

2.8 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL

No momento de desenvolver e implementar um projeto de automação industrial, além de escolher os melhores equipamentos, é fundamental pensar em todos os processos necessários para que as máquinas e dispositivos atuem conforme o desejado (KALATEC AUTOMAÇÃO,

2022). Pensando nessa necessidade de projeto é que surgem os protocolos de comunicação, ou também, chamados de protocolos de redes industriais.

Conforme PAHC Soluções em Automação Industrial (2021), os protocolos de redes industriais são códigos criados para que os computadores possam “conversar” e realizar uma série de processos, sendo assim, são conjuntos de regras que orientam como será a comunicação entre eles. O objetivo dos protocolos é garantir que tudo funcione dentro do estipulado, atendendo a várias necessidades, como cada projeto é único, há muitas opções diferentes para estabelecer essa troca de informações (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

Devido a importância dos protocolos de redes industriais, em um projeto onde haja a comunicação entre dispositivos, conhecê-los e entender quais são as suas aplicações é essencial para escolher a melhor tecnologia a fim de alcançar os resultados almejados (PAHC SOLUÇÕES EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2021).

A seguir são abordados os principais protocolos de comunicação utilizados em projetos de automação na indústria.

2.8.1 Modbus

Apesar de ser um dos protocolos de comunicação mais antigos, costuma se adequar com facilidade as mais diversas aplicações. Apresenta como vantagem um ótimo custo-benefício, pois não precisa da aquisição de softwares ou chips (PAHC SOLUÇÕES EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2021).

O Modbus é utilizado para transferência de dados entre dispositivos e ajuda a estabelecer uma hierarquia, o que é prático no controle de servo motores. Além disso, é ideal para o uso da comunicação sem fio e é considerado um protocolo padrão.

2.8.2 CANopen

O CANopen ou rede CAN, não necessita de um computador host para operar, sendo considerado uma rede multimestre. É indicado para projetos que exigem comunicação mais complexa e possui ótimo custo-benefício.

Com estrutura em barramento, O CANopen é uma opção moderna, funcional e segura. Possui grande robustez e parametrização simples, além de alta compatibilidade. É mais veloz que o protocolo Modbus (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

2.8.3 DeviceNet

É um protocolo de rede aberto, onde seu principal foco é ter uma alta velocidade de transmissão de dados, fazendo troca rápida de dados entre os pontos. Assim, opera com diversos dispositivos, tanto digitais como analógicos.

Utiliza a estrutura CAN, todavia, consegue interligar controladores industriais, em sistemas de automação. É ideal para servo motores e outros equipamentos com relação de “escravidão robótica” (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

2.8.4 Hart

De acordo com Kalatec Automação (2022), este tipo de protocolo faz comunicação digital bidirecional, usando loops de corrente analógica. Auxilia na calibração e no ajuste de *damping* e *range* de diversos dispositivos industriais, como sensores e atuadores.

O Hart é interoperável e usa o formato mestre-escravo, alguns aspectos que tornam seu uso atrativo são a sua simplicidade e o seu baixo custo de instalação.

2.8.5 EtherCAT

Entre os benefícios do uso do EtherCAT, está o fato de que ele apresenta uma ótima velocidade de comunicação e um excelente empacotamento de dados.

Por ter um tempo de ciclo médio muito baixo na comunicação, por exemplo de servo motores, garante alta desempenho de sincronismo. Possui também, baixo custo de hardware e índices reduzidos de *jitter* para sincronização precisa (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

É um protocolo utilizado em aplicações que requerem tempo real hard e soft, faz testes e medições, auxiliando os processos de produção.

2.8.6 AS-Interface

O AS-Interface é prático e barato, ideal para maquinário de pequeno porte, onde realiza a conectividade digital de atuadores e sensores com seus respectivos controladores.

Sua instalação é simples e faz a comunicação rápida por meio de módulos de rede, através do uso de cabos regenerativos de duas vias.

Uma vantagem deste protocolo de rede, é que é adaptável a qualquer topologia de cabeamento, como barramento, anelar, árvore ou estrela (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

2.8.7 EtherNet/IP

Segundo PAHC Soluções em Automação Industrial (2021), o EtherNet/IP é um dos protocolos de redes industriais mais novos no mercado, apresenta confiabilidade e rapidez na transmissão de dados, com boa conectividade.

Uma das características que o tornam atrativo, é o fato de permitir a escolha da velocidade da interface de rede, além disso, apresenta arquitetura flexível (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

2.8.8 Profinet

Protocolo baseado no padrão de Ethernet Industrial e considerado uma evolução da rede Profibus, suporta grande volume de informações e corresponde bem às exigências da manufatura avançada. É utilizado na conexão entre sistemas de controle e dispositivos industriais como sensores e atuadores.

Por seguir o padrão Ethernet Industrial, em conformidade com o IEEE 802, oferece funcionalidade como o TCP/IP, usando a mesma estrutura de cabeamento e suportando redes de fibra óptica, wifi e até Bluetooth (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

2.8.9 Profibus

O Profibus é um dos protocolos mais difundidos, tem diversas ramificações, e é indicado para maquinário e equipamentos de médio à grande porte. Ele é independente de fornecedores, o que permite a integração de equipamentos de diversos fabricantes na mesma rede (PAHC SOLUÇÕES EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2021).

Assim como o Modbus, o CANopen e o Ethernet IP, o Profibus é um exemplo de protocolo de comunicação que usa os padrões RS422, RS485 e RS232 – que especificam detalhes físicos, número de dispositivos, nível de tensão, etc (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

Pelo fato de o Profibus ser imune a ruídos na rede, tais padrões são aplicados em CLPs, inversores de frequência, switches, servo motores, entre outros equipamentos.

2.8.10 Escolha do protocolo

A escolha do protocolo de comunicação é essencial para o bom funcionamento do sistema a ser implementado, e irá depender das características do sistema, como recursos e as marcas utilizadas.

Outros critérios a se levantar na escolha, são elementos como a facilidade de uso ou a velocidade. Por exemplo, em aplicações simples, o Modbus atende bem, enquanto o CANopen é indispensável para entradas rápidas. Já o Devicenet é mais utilizado de forma complementar ou opcional (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

O uso de protocolos de comunicação é fundamental para interligar placas, motores e sensores, além de permitirem a aplicação de parâmetros, por isso devem ser escolhidos de acordo com cada necessidade.

2.9 RESISTOR DE FRENAGEM

Quando se utiliza inversores de frequência no controle da velocidade de motores, algumas ações comuns como: desacelerar, parar e mudar de rotação, requer um mecanismo de frenagem eficiente (WEB AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2016). Na desaceleração de um motor elétrico, a energia cinética é transformada novamente em energia elétrica e essa energia é dissipada usando um resistor de potência (ST DRIVER, 2022). Esse processo é chamado de frenagem dinâmica e esse resistor é chamado de resistor de frenagem. Um modelo de resistor de frenagem é exibido na figura 33.

Figura 33 – Exemplo de modelo de resistor de frenagem



Fonte: Web Automação Industrial (2016)

Uma vez que um motor é acionado por meio de um inversor, para ele retornar ao repouso é preciso frear o eixo, neste momento, parte da energia entregue é convertida em calor, ou se transforma novamente em eletricidade e é devolvida para o inversor.

Se o rotor de um motor de indução girar com velocidade menor que a frequência aplicada, ele transforma energia elétrica em energia mecânica, de modo oposto, quando o rotor gira mais rápido que a velocidade de sincronismo, definida pelo inversor, ele passa então a transformar a energia mecânica absorvida em energia elétrica (WEB AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2016).

Devido a este tipo de comportamento, necessita-se de um dispositivo ou técnica que seja capaz de desviar a energia excedente e assim, impedir a sobretensão no barramento CC do inversor. Esta energia pode ser desviada de maneira mecânica ou elétrica, podendo ser diretamente convertida em calor ou reaproveitada para regeneração de energia em equipamentos específicos.

Desvio mecânico: Feito por meio de um dispositivo mecânico, composto por um atuador e pastilhas de freio, quando for necessário frear o eixo do motor, as pastilhas são acionadas e toda a energia mecânica do eixo se converte em calor nas pastilhas.

Desvio elétrico: A energia mecânica contida no motor é convertida em energia elétrica, desta maneira é dissipada em forma de calor sobre resistores especiais e também no motor, ou é regenerada e devolvida para a rede de alimentação.

2.9.1 Frenagem elétrica – Dissipativa (Dinâmica)

Quando o inversor começa a diminuir a velocidade do motor, por inércia imposta pela carga, o eixo tende a continuar na mesma rotação. Assim, o motor acaba se comportando como um pequeno gerador e tende a devolver energia elétrica ao inversor.

Esta ação faz com que a tensão do barramento CC do inversor suba, e possa causar danos ao inversor se assumir valores acima do limite de segurança suportado por ele. Por esta razão, o inversor monitora o valor da tensão do barramento CC e sempre que este ultrapassar os valores pré-definidos, ele gera um comando para um módulo extra, chamado comumente de “*Breaking Unit*” (WEB AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2016). A função deste módulo é comutar em paralelo com os capacitores do barramento CC, um resistor especial, de forma que toda a energia “extra” seja desviada por ele e dissipada por efeito Joule.

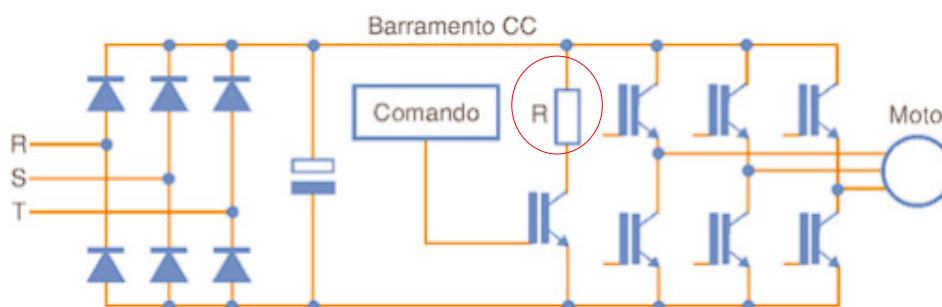
Conforme Web Automação Industrial (2016), esta técnica é muito eficiente, pois consegue atingir elevados torques de frenagem, e além de ser simples, sua resposta dinâmica é muito satisfatória.

2.9.2 Solução por frenagem dissipativa

Após se determinar a inércia total do sistema, chega-se ao valor de pico máximo de potência devolvida ao inversor no momento da frenagem. Com este valor, determina-se o valor do resistor de frenagem, bem como a capacidade de comutação do módulo de chaveamento (*breaking unit*).

No inversor, é ajustado o parâmetro que define o máximo valor percentual de sobre passagem do valor nominal de tensão do barramento CC, feito isto, sempre a tensão no barramento exceder o limite ajustado – em função de uma frenagem – um comando é gerado, e o módulo de frenagem comutará o resistor calculado, em paralelo com os capacitores do barramento CC. Portanto, toda a energia “extra” será dissipada em forma de calor, evitando assim danos ao inversor. Na figura 34, é exemplificado o circuito de desvio da energia para o resistor de freio (em destaque).

Figura 34 – Circuito simplificado do inversor com o resistor de frenagem instalado.



Fonte: Web Automação Industrial (2016)

2.10 ACOPLAMENTO MECÂNICO PARA EIXOS

Acoplamento é um componente mecânico, classificado como elemento de máquina, utilizado na transmissão de rotação e torque para absorver pequenos desalinhamentos e suavizar a partida de acionamento (ABECOM, 2022). Esses dispositivos absorvem choques,

compensam desalinhamentos, transmitem torque e reduzem sobrecargas, vibrações e pancadas, diminuindo assim o desgaste dos equipamentos e elevando sua vida útil, KALATEC AUTOMAÇÃO (Brasil).

A aplicação de acoplamentos é vista em equipamentos rotativos como elementos de ligação entre o eixo motriz e o eixo acionado. Dentre os mais comuns, está o acoplamento mecânico.

2.10.1 Função do acoplamento

Uma das principais funções do acoplamento industrial é transmitir rotação e torque em sistemas rotativos, unindo um eixo-motriz e um eixo-acionado. Um benefício do uso deste dispositivo é a absorção de pequenos choques e desalinhamentos durante a operação. Tanto desvios angulares, quanto axiais e radiais (ABECOM, 2022). Então, as principais funções dos acoplamentos são, em resumo:

- Transmitir torque e rotação;
- Absorver pequenos choques e pancadas;
- Acomodar desalinhamentos;

2.10.2 Classificação e tipos

Os acoplamentos mecânicos são classificados entre acoplamentos rígidos e flexíveis.

Acoplamento rígido ou fixo: é utilizado quando a montagem não permite movimentação entre os eixos, sendo os principais modelos: com flange e flanges aparafusadas.

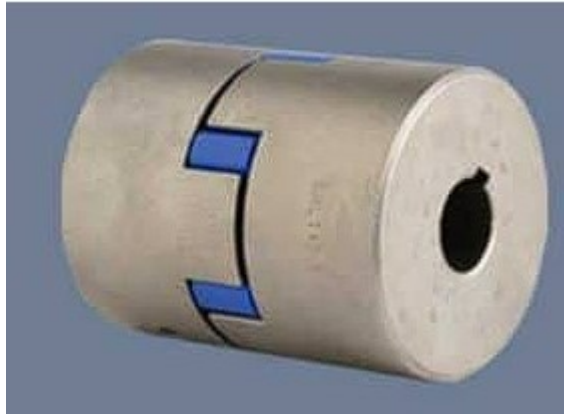
Acoplamento flexível ou elástico: empregado quando se quer evitar movimentos bruscos, o que permite maior suavidade na transmissão de torque. Portanto, absorve desalinhamento axial, radial e angular dos eixos e pequenas vibrações.

Dentre os vários tipos de acoplamentos disponíveis, o acoplamento com características e especificações mais condizentes para o trabalho proposto é o acoplamento elástico.

Neste tipo de acoplamento utiliza-se um elemento elástico entre os cubos, este elemento pode ser de borracha ou poliuretano. Os modelos mais comuns são do tipo garra, estrela, acoplamento cruzeta e acoplamento de correia. Uma vantagem do acoplamento elástico é a de possuir maior capacidade de amortecimento, proteção contra choques mecânicos e

vibrações, podendo os mesmos trabalhar com aplicações que variam de 0,5 a 200CV de potência de motor. Na figura 35, é exposto um acoplamento do tipo elástico-estrela.

Figura 35 – Acoplamento elástico – tipo estrela.



Fonte: Abecom (2022)

2.11 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Segundo informa a Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (2021), as fontes eletrônicas de alimentação em corrente alternada já estão presentes no dia-a-dia das indústrias, Universidades e Centros de Pesquisa e Desenvolvimento. Este tipo de fonte permite a realização de ensaios em condições de operação que não podem ser alcançadas com a rede de alimentação disponível, possibilitando a variação de amplitude e principalmente variação de frequência, a qual é mais trabalhosa de variar sem o auxílio da eletrônica de potência.

As fontes C.A permitem a aplicação de uma onda senoidal pura, sem harmônicas, com amplitude e frequência ajustáveis, sem depender da qualidade da rede de alimentação. Diante disto, é possível a realização de ensaios com boa confiabilidade, vista que o equipamento sob teste está submetido a uma condição padrão de operação. Esta condição de ensaio controlada e padronizada faz com que ensaios de diferentes equipamentos possam ser comparados, ou até mesmo, ensaios do mesmo equipamento possam ser realizados com um intervalo de dias, semanas ou meses, SOCIEDADE BRASILEIRA DE ELETRÔNICA DE POTENCIA (Brasil).

Com a alimentação proveniente de uma fonte eletrônica, há a possibilidade de ensaios com amplitude e frequência diferentes da alimentação disponibilizada pela concessionária local. Outra característica a se levantar é a de que uma fonte eletrônica provê uma alimentação com impedância muito menor do que a disponibilizada pela concessionária de energia. Esta é

uma característica que altera o comportamento das correntes transitórias, podendo serem substancialmente mais elevadas, com uma impedância série tendendo a zero. Como não há maneira de prever a impedância que o equipamento será submetido durante seu uso nos diversos locais, ensaios em uma condição mais severa é sempre mais seguro e conservador.

2.12 MESA PARA ALINHAMENTO – X, Y, Z

A mesa de coordenadas tem liberdade de movimentos nos três eixos: x, y, e z, proporcionando assim, boa mobilidade e precisão na posição ideal à qual será aplicada.

Segundo Kalatec Automação (2022), esse tipo de mesa é bastante utilizado em tarefas de posicionamento de peças a serem usinadas, medidas, ou no posicionamento de ferramentas para tarefas de usinagem, pintura, soldagem, etc.

A depender da aplicação, as mesas de coordenadas podem ser acionadas por motor de passo, motor de corrente contínua ou de indução, ou mesmo de forma manual. Para garantir bons resultados, a execução de uma operação de medição, posicionamento, ou de usinagem com mesas de coordenadas exige que o erro de posicionamento seja o mínimo possível, de preferência nulo (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

A mesa de coordenadas é composta de uma base superior e outra inferior, e que trabalham de forma desacopladas, garantindo assim que se possa fazer o deslocamento das bases no eixo “x” e “y”, e a regulagem de altura no eixo “z” se dá pelo deslocamento da base ao qual a mesa está fixada. Um exemplo de mesa coordenada com eixos x, y e z, é apresentado na figura 36.

Figura 36 – Exemplo de mesa coordenada.



Fonte: Worldtools (2022)

Na configuração da bancada do dinamômetro, essa mesa tem como função ser a base de fixação do motor a ser testado, permitindo assim o correto alinhamento do mesmo para o perfeito acoplamento com o motor de carga.

3 RESULTADOS

Nessa seção são apresentadas propostas de equipamentos para a configuração da bancada de dinamômetro. São denotadas as funcionalidades de cada equipamento no sistema, bem como a justificativa do porquê da escolha de determinado modelo em detrimento de outro. Este capítulo aborda também, quais dados são medidos em cada dispositivo.

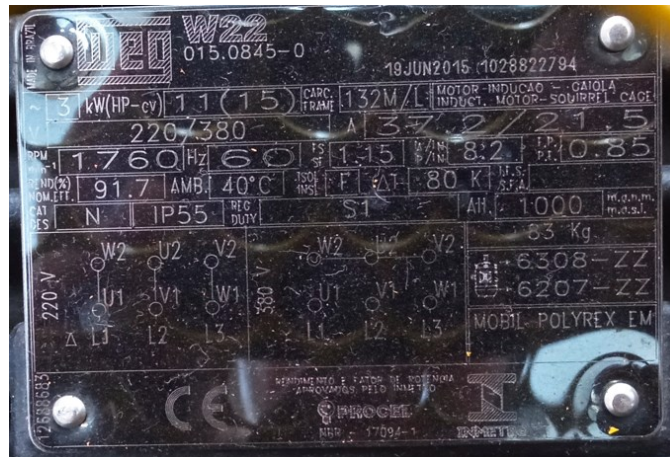
3.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO – WEG – W22 - 15CV

A escolha pelo motor de indução se dá pelo fato de que, dentre todos os motores, este é um dos tipos de motores mais utilizados na indústria, combinando as vantagens de ter baixo custo e facilidade de comando.

Este motor funciona como a carga dinâmica do dinamômetro contra o motor a ser testado. Através do controle da velocidade deste motor, é possível simular diferentes valores de carga no eixo do motor testado e obter seu comportamento em diferentes situações. Quando o motor em carga estiver girando na mesma velocidade e sentido do motor em teste, não há carga exercida. No momento em que se diminui a velocidade do motor em carga e mantém-se a velocidade do motor em teste, o motor em carga proporciona uma resistência ao giro do motor testado. Fazendo uma varredura em diferentes pontos de velocidade, é possível obter uma curva mostrando a atuação do motor em teste.

O motor proposto para este projeto é o motor da marca WEG, modelo W22 - Trifásico de 15CV. Todas as especificações técnicas deste motor são mostradas na figura 37.

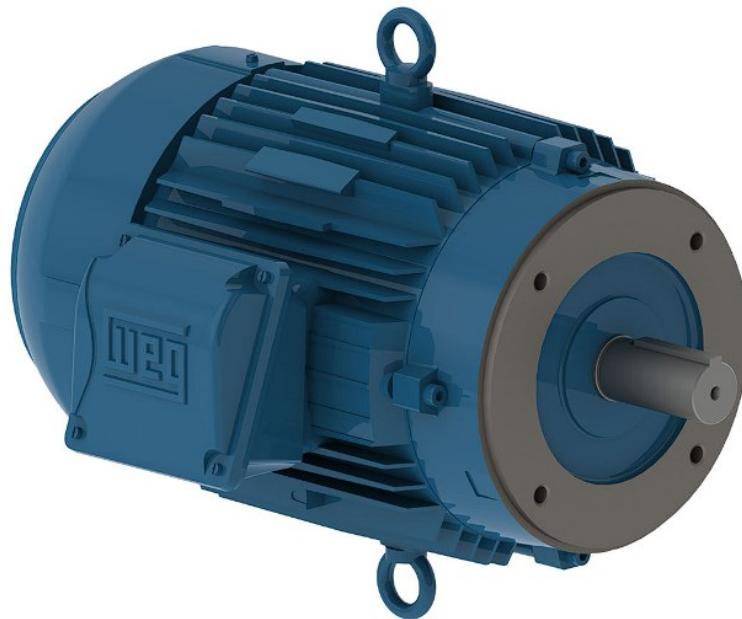
Figura 37 – Especificações técnicas do motor WEG – W22 – 15CV.



Fonte: Autor (2022).

A potência escolhida faz jus a faixa de teste determinada para a bancada de dinamômetro, onde pode-se testar motores de indução de até 10CV. A figura 38, mostra o motor escolhido para a composição da bancada do dinamômetro.

Figura 38 – Motor que funciona como carga dinâmica no dinamômetro, modelo W22.



Fonte: WEG (2022).

De acordo com WEG (2022), a linha W22 atende aos níveis de rendimento especificados na Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017, assim, promove redução

do consumo de energia, possui ótima relação-custo benefício e maior produtividade e gastos reduzidos.

Para fazer o controle deste motor, e assim alcançar os pontos de velocidade desejada, faz-se a utilização do inversor de frequência.

3.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA DANFOSS – FC 301

O inversor de frequência é o responsável por fazer o acionamento e o controle da velocidade do motor de indução, que gera a carga dinâmica na bancada do dinamômetro.

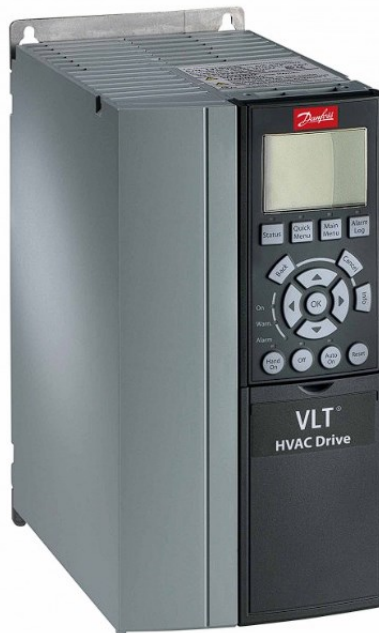
O modelo de inversor da marca DANFOSS, modelo FC 301, é apresentado como o inversor do sistema proposto. O FC 301 é robusto, opera de forma eficaz e é confiável, mesmo nas aplicações mais exigentes (DANFOSS, 2022).

Além de diversos parâmetros que podem ser configurados pelo operador, de acordo com os requisitos de projeto do sistema, uma das características para a escolha do FC 301, é que há modelos com as seguintes faixas de tensões de alimentação e potência disponíveis:

- 3 x 200-240V...0,25 - 37 kW
- 3 x 380-500V...0,37 kW – 1,1 MW
- 3 x 525-600V...0,75-75 kW
- 3 x 525-690V...1,1 kW – 1,4 MW

No caso em questão, como o motor escolhido pode trabalhar na tensão-linha de 220V e sua potência é de 11kW, logo o modelo de inversor FC 301 que opera na faixa de tensão 3 x 200-240V e potência 0,25 - 37 kW, atende ao estabelecido pelo projeto. Na figura 39, é mostrado o inversor Danfoss – FC 301.

Figura 39 – Inversor de frequência Danfoss – FC 301.



Fonte: Danfoss (2022)

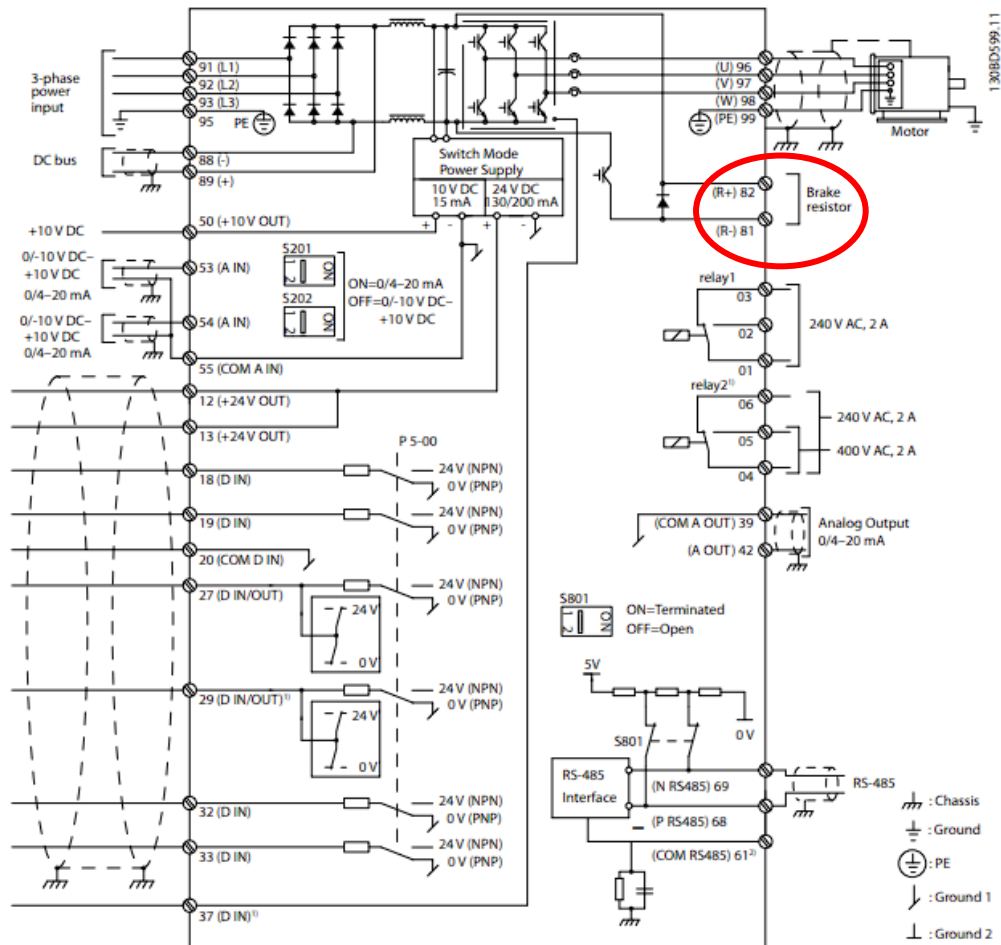
Outros pontos fundamentais para a escolha do modelo FC 301, é que diferentemente de outros inversores mais simples, este modelo possui:

- **Entrada de pulso/encoder:** por meio desta entrada, o inversor recebe um retorno da rotação do motor controlado, podendo assim executar as configurações de controle determinadas pelo usuário;
- **Entrada para o sinal do transdutor de torque:** saídas analógicas de $\pm 5V$ e $10 \pm 8mA$;
- **Saída para o resistor de frenagem:** possui conexão para instalação do resistor de frenagem, para dissipação da energia na frenagem do motor em teste;

O fato do inversor FC 301 ter essas conexões específicas, torna a estruturação da bancada de dinamômetro mais simples, sem a necessidade de se utilizar um Controlador Lógico Programável (CLP) para o tratamento dos sinais e dados dos sensores de rotação e torque.

O esquemático básico do FC 301 é apresentado na figura 40, com destaque para o ponto de conexão do resistor de frenagem (*Break Resistor*).

Figura 40 – Esquemático de fiação básica do inversor FC 301.



Fonte: Danfoss (2022).

Os valores desejados de rotação do motor são configurados pelo operador na tela da IHM, então o comando é enviado para o inversor que interpreta o sinal e faz o controle, o retorno da rotação que o motor se encontra é dado pelo encoder.

3.3 ENCODER INCREMENTAL – DYNAPAR - B58N

Um dos pontos considerados para a escolha do encoder, foi a característica da velocidade máxima de leitura e o tempo de vida útil do rolamento. O encoder incremental B58N, da marca Dynapar, foi escolhido por ter uma instalação simples e possuir velocidade máxima de leitura de rotação de até 6000 RPM, com vida do rolamento de até 20.000 horas.

Os motores de indução comumente utilizados na indústria, são de 2 e 4 pólos, logo a velocidade máxima para estes motores, considerando a frequência da rede de 60Hz, são respectivamente 3600 e 1800 RPM, ou seja, dentro da faixa especificada para o encoder.

Segundo Dynapar (2022), o B58N apresenta várias opções de construção mecânica, tendo versões com eixo vazado, eixo sólido, eixo passante ou expansivo, além de diversos flanges e suportes para uma melhor fixação.

As características básicas de encoders da série B58N são:

- Resolução de 1 a 5000 Pulsos por rotação (PPR);
- Proteção contra sobretensão, inversão de polaridade e curto-circuito entre saídas;
- 58mm de diâmetro externo;
- Temperatura de operação de 0°C a 100°C;
- Compacto com aprox. 400g;

Alguns modelos de diferentes construções mecânicas são apresentados na figura 41, a diferença entre as versões está no tipo de acoplamento no eixo do motor.

Figura 41 – Diferentes versões de acoplamento do encoder B58N.



Fonte: DYNAPAR (2022).

A instalação do encoder é realizada na ponta oposta ao eixo livre para acoplamento dos motores em teste, por este motivo o eixo na parte da frente do motor deve ser sobressalente, ou seja, com tampa vazada. A função do encoder será a de ler a rotação instantânea do motor-carga e enviar o sinal ao inversor, para este ter um retorno para um melhor controle do motor.

As características elétricas para a instalação e formato do sinal de saída do B58N são expostas na tabela 3.

Tabela 3 – Características elétricas do encoder B58N.

Características elétricas

Alimentação	5 a 26 Vcc
Saídas	HTL (5-26 VCC) ou TTL (5 VCC) máximo 40mA -Line-Driver
Consumo	< 60 mA + cargas na saída
Frequência máx.	125 kHz
Resolução	1 a 3600 PPR
Proteção elétrica	Inversão de polaridade, curto-circuito entre saídas e sobretensão
Formato do sinal	Dois sinais (A e B - quadratura), sinal de referência (Z) e sinais complementares.
Defasagem	Até 625 PPR: $90^\circ \pm 15^\circ$ acima de 625 PPR: $90^\circ \pm 30^\circ$
Simetria	Até 1024 PPR: $180^\circ \pm 18^\circ$ acima de 1024 PPR: $180^\circ \pm 25^\circ$
Sinal de referência (Z, Marker, Index)	Formato 1 - Referência não sincronizada – "Ungated" (padrão) Formato 2 - Referência sincronizada com a borda de subida do canal B "Gated" (somente para 1024 e 2048 PPR)

Fonte: DYNAPAR (2022).

Como em testes de motores na bancada do dinamômetro, pode se desejar inverter o sentido de rotação, ou mesmo dependendo do projeto, ele poderá ter sentido horário ou anti-horário, o encoder deve ser capaz de interpretar o sentido da rotação escolhida. O B58N, a depender do modelo, possui os 3 canais necessários para esta aplicação, sendo canal A e B para o sentido de rotação e Z para sincronismo. O formato dos sinais de saída do encoder B58N são exibidos na figura 42.

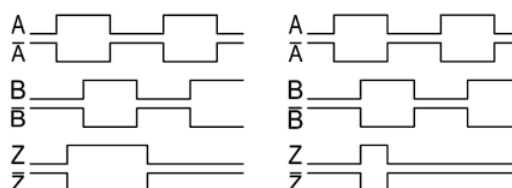
Figura 42 – Formato do sinal – encoder B58N.

Formato do Sinal

Sentido de Giro Horário
Defasagem Positiva (borda de subida do canal A antes do B)



Formato 1 (Z "Ungated") **Formato 2 (Z "Gated")**



Fonte: DYNAPAR (2022).

Na ponta do eixo do motor em carga, no lado oposto à instalação do encoder, é instalado o transdutor de torque para leitura do torque gerado.

3.4 TRANSDUTOR DE TORQUE – HBM T22

Os transdutores de torque da marca HBM, modelo T22, possuem medição de torque de até 1kNm, a faixa de torque do transdutor deverá ser escolhida conforme a potência do motor a ser testado. O T22 possui modelos de diferentes valores de torque, 5Nm, 20Nm, 50Nm, etc., por esta razão o transdutor deve ser instalado em uma base de fácil acesso para possibilitar a troca do transdutor, em caso de mudança da faixa de torque.

A vantagem de se ter mais de um transdutor com diferentes valores de torque, está na melhor sensibilidade da leitura. Motores de indução pequenos, por exemplo, com torque de partida de aproximadamente 3Nm poderiam ser testados por um transdutor de 50Nm, mas como o fundo de escala é muito alto em relação à medição, o sensor não irá responder da melhor forma. Neste caso, seria interessante o uso do transdutor de 5Nm. A mesma lógica é aplicada para o caso contrário, porém se o motor a ser testado tiver um torque muito mais elevado do que o transdutor instalado, há o risco de se danificar o equipamento.

O perfil de um transdutor T22 é mostrado na figura 43, que opera até 200Nm. Na figura é possível ver o eixo passante do transdutor, onde de um lado é conectado o motor em carga e do outro o motor em teste, com o auxílio do acoplamento mecânico.

Figura 43 – Transdutor de torque T22 – 200Nm



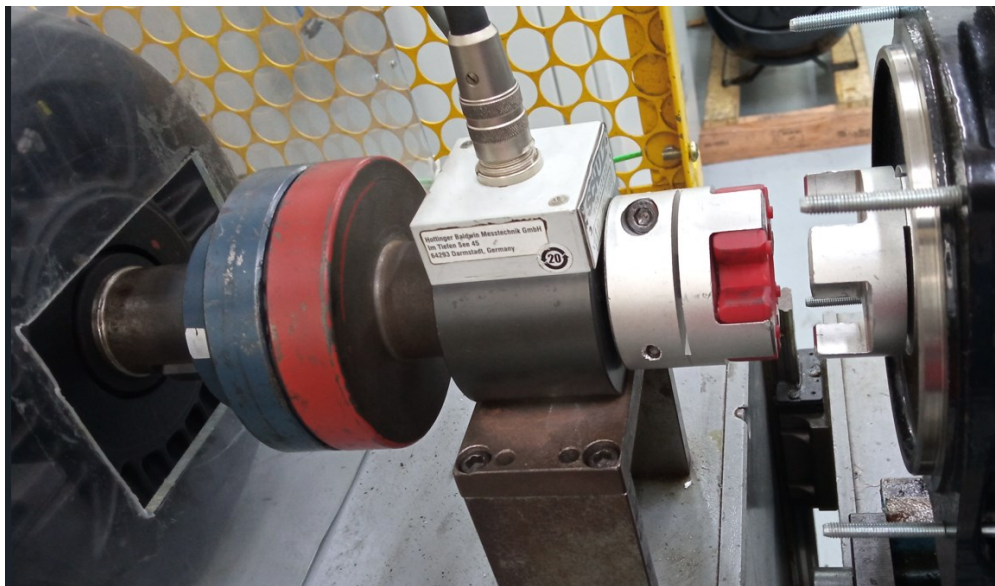
Fonte: Hbm An Hbk Company (2022).

Quando o dinamômetro está em funcionamento, e o motor em carga simula uma carga dinâmica contra o eixo do motor testado, este torque gerado entre os eixos é interpretado pelo transdutor, que envia os dados ao inversor para que este possa repassá-los à IHM.

O T22 usa tecnologia de transmissão sem contato para medir torque, por ser compacto é ideal para medição dinâmica e estática em componentes rotativos e não rotativos (HBM AN HBK COMPANY, 2022). Por possuir duas saídas analógicas (corrente e tensão), o T22 pode ser conectado a CLPs ou diretamente ao inversor FC301, pois este possui este tipo de entrada. A conexão do T22 e o inversor, é feita através de um cabo especial próprio para o transdutor.

Na figura 44, é mostrado como fica a instalação do transdutor com o auxílio dos acoplamentos e fixação do motor em carga e motor em teste.

Figura 44- Exemplo de instalação do transdutor para teste.



Fonte: Autor (2022).

3.5 RESISTOR DE FRENAGEM – DANFOSS MCE 101

Quando a velocidade de referência do inversor de frequência é reduzida e o motor começa a atuar como gerador, a energia gerada será coletada no barramento CC do inversor. Neste momento, para não causar danos ao equipamento, o resistor de frenagem é aplicado. A vantagem do uso do resistor de frenagem é a possibilidade de frear altas cargas rapidamente.

Segundo Danfoos (2022), o resistor de frenagem MCE 101, além de ser compatível com o inversor escolhido, por ser de mesma marca, ele é versátil, podendo trabalhar em 2 grupos:

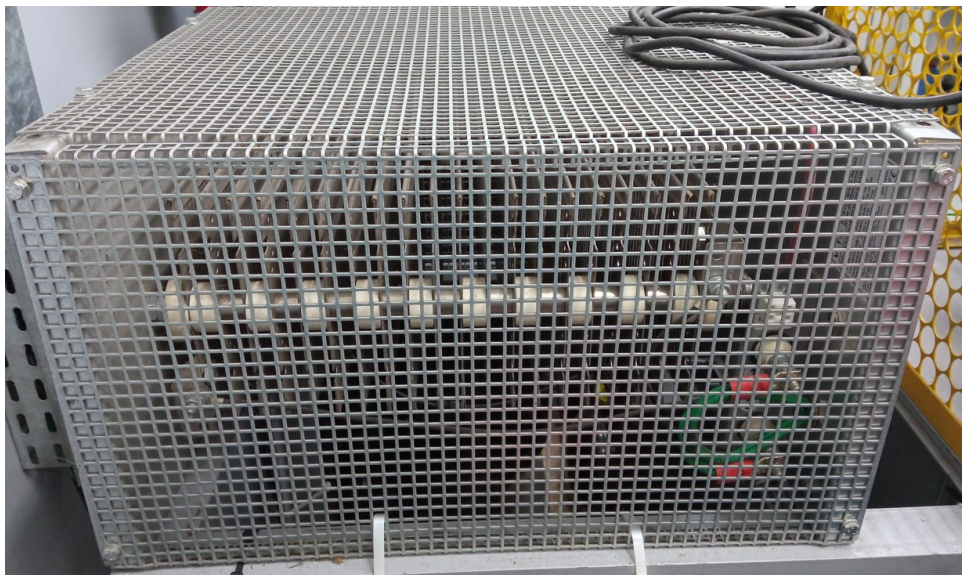
- Para cargas horizontais (transportadores, carrinhos, guindastes de pórtico, etc);
- Para cargas verticais (guindastes, talhas, elevadores);

No caso em questão por se tratar de um projeto específico, para o dinamômetro foi escolhido um tipo que atendesse os dois grupos, os resistores de frenagem de grade de aço.

Resistor de grade de aço: consiste de vários elementos alojados em uma grade de aço. Este tipo de resistor é adequado para cargas de pulso entre 10 e 20 vezes a carga nominal, adequado para aplicações de frenagem frequentes. Seu invólucro tem proteção IP20 com prensa cabos e um interruptor de temperatura embutidos.

O modelo de resistor de frenagem utilizado pode ser observado na figura 45.

Figura 45 – Resistor de frenagem Danfoss – MCE 101.



Fonte: Autor (2022).

O modelo apresentado, é utilizado em aplicações de até 10kW, como pode ser visto na especificação técnica na figura 46.

Figura 46 – Dados técnicos do resistor de frenagem proposto – MCE 101.



Fonte: Autor (2022).

Para garantir a seleção ideal do resistor de frenagem para uma dada aplicação, toda a formulação e cálculos utilizados para a escolha correta do resistor de frenagem, é mostrado e detalhado nas páginas 16, 17 e 18 em Danfoss (2022).

3.6 ANALISADOR DE ENERGIA – YOKOGAWA - CW500

Os dados elétricos do motor em teste, apresentados como resultado quando é gerada a curva de torque, são verificados e podem ser registrados no analisador de energia. Um equipamento que traz uma análise confiável e clara das grandezas elétricas, é o analisador de energia da marca Yokogawa, modelo CW500.

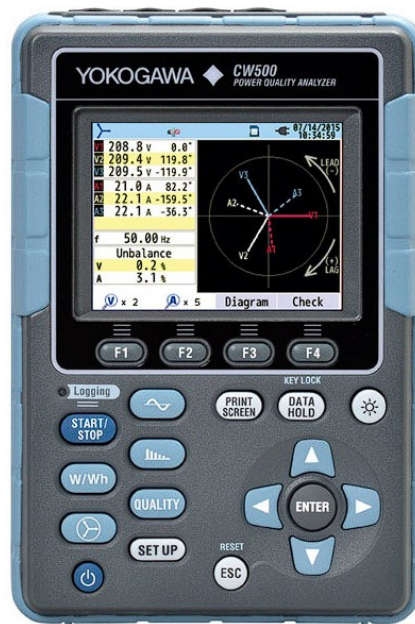
O Yokogawa CW500 é um medidor de potência portátil que utiliza sondas de corrente, telas de navegação e guias de início rápido (YOKOGAWA, 2022). Através desses recursos, é possível realizar as medições de consumo e de qualidade de energia de forma fácil, e em conformidade com a norma IEC61000-4-30 Classe S.

As principais características que o CW500 possui são:

- Medição de potência e registro;
- Medição da qualidade de energia;
- Suporte ao operador;
- Análise de dados e geração de relatórios.

O modelo do equipamento é mostrado na figura 47, onde é possível ver na tela dados dos vetores de corrente e tensão e seus respectivos valores.

Figura 47 – Exemplo de interface da tela do CW500.



Fonte: Yokogawa (2022).

Medição de potência e registro: Mede simultaneamente entrada de tensão em até 3 canais e entrada de corrente em 4 canais. Fornece os valores instantâneo, médio, máximo e mínimo ou a tela de gráfico de tendência da tensão, corrente, potência, fator de potência, ângulo de fase e cálculo de capacitância de fase avançada. Além disso, mostra valores de integração de energia ativa, reativa e aparente tanto no consumo como na geração. Outra interface simplificada com alguns desses dados é exibida na figura 48.

Figura 48 – Exemplo de modo de exibição das grandezas no CW500.



Fonte: Autor (2022).

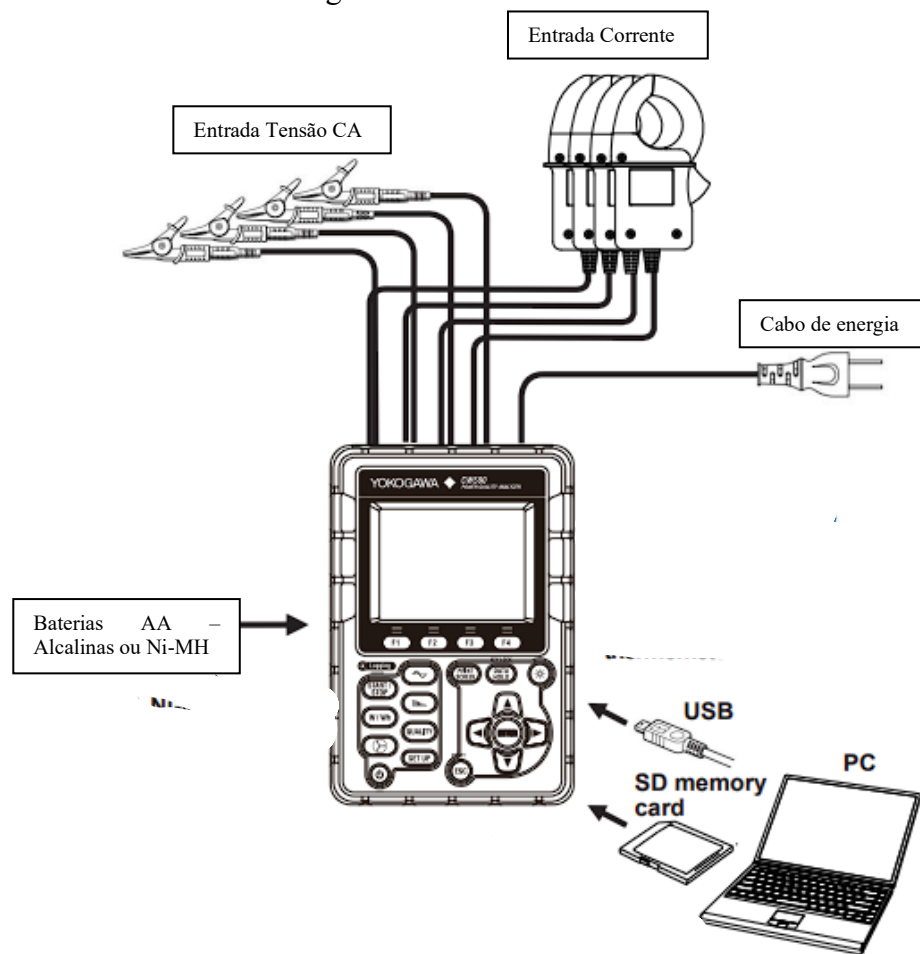
Suporte ao operador: Possui funções de guia de início rápido para facilitar a checagem do cabeamento e configuração antes do início da medição. E com a exibição de vetores indica a diferença de fase de tensão e corrente e os valores entre os canais de tensão e corrente.

Medição da qualidade de energia: Segundo Yokogawa (2022), o CW500 captura fenômenos de falha temporária na linha de energia que pode causar mal funcionamento ou destruição de dispositivos. Falhas como ondulação de tensão, queda de tensão, interrupção, sobretensão transitória, e picos de corrente são detectados usando uma alta taxa de amostragem de 24 μ s e cálculo RUS. Também mede e exibe gráficos harmônicos, *flicker* e taxa de desequilíbrio.

Análise de dados e geração de relatórios: Por meio do software CW500 Viewer instalado a um PC e conexão através de cabo USB ou cartão de memória, pode-se fazer a exibição de gráficos e dados de relatório e gerenciar várias configurações da unidade. Por meio do cabo USB mede em tempo real os dados fornecidos.

Uma ilustração mostrando algumas das conexões possíveis ao CW500 é mostrada na figura 49.

Figura 49 – Conexões CW500.



Fonte: Yokogawa (2022).

O analisador CW500 pode realizar tanto testes em motores trifásicos quanto monofásicos, bastando apenas ter os acessórios necessários e realizar a configuração correta dos parâmetros nele.

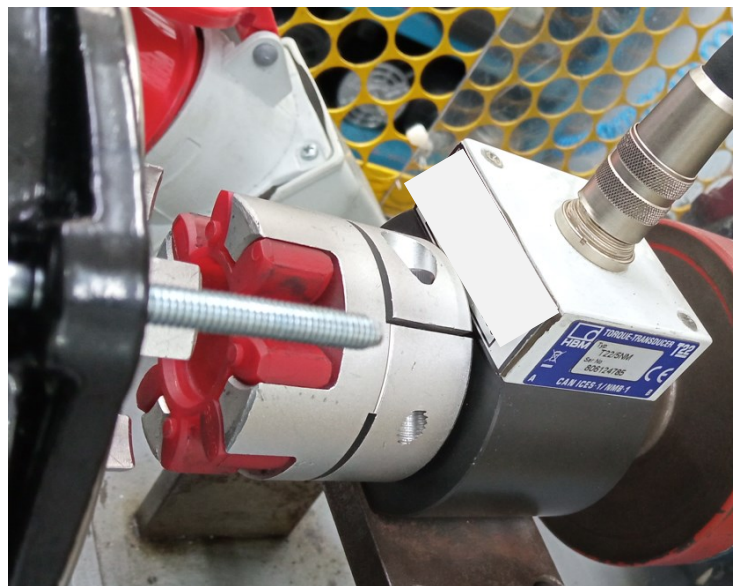
3.7 ACOPLAMENTOS ROTEX GS - SEM FOLGA

O acoplamento serve para união dos eixos dos motores em teste e o transdutor de torque, transmitindo assim o movimento de rotação. Os acoplamentos Rotex GS são do tipo elástico, com encaixe axial de três partes e sem folga. Possuem diferentes tipos de cubos, dependendo do diâmetro do eixo do motor, e vários tipos de dureza de elastômeros, de forma que podem ser utilizados para diferentes aplicações (MADE FOR MOTION KTR, 2022).

Um benefício da utilização de acoplamento é a garantia de precisão no posicionamento, apesar de possuir propriedades de amortecimento de vibração, ele é torcionalmente rígido, com isso não há redução na precisão. Além disso, os acoplamentos Rotex GS permitem a compensação simultânea de deslocamentos radiais, axiais e angulares (MADE FOR MOTION KTR, 2022).

A instalação e fixação do acoplamento nos eixos é rápida e fácil, como pode ser observado na figura 50.

Figura 50 – Acoplamento instalado no eixo do motor em teste e transdutor de torque.



Fonte: Autor (2022).

Quando os acoplamentos são instalados, para realizar o alinhamento correto de ambos os eixos e proporcionar o encaixe perfeito entre as partes, é utilizada a mesa coordenada para nivelamento e posicionamento.

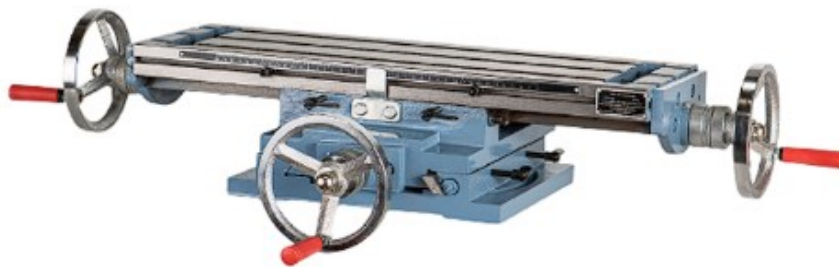
3.8 MESA COORDENADA – MANROD-MR-28

A mesa coordenada serve como base de fixação do motor em teste, é por meio dela que se faz o alinhamento correto entre o eixo do motor e o transdutor de torque. A mesa tem deslocamento no eixo “x” e “y”, o deslocamento na altura “z” deve ser feito na base onde ela é instalada.

Como há modelos com diferentes dimensões de deslocamento, a escolha é feita pelo tamanho dos motores que serão fixados. A mesa MANROD MR 28 tem deslocamento longitudinal de 370mm e transversal de 150mm, o que deve ser suficiente para a maioria dos motores a serem fixados.

A mesa MR 28 é mostrada na figura 51.

Figura 51 – Mesa coordenada MANROD M28.



Fonte: Manrod Quality Machines (2022).

3.9 FONTE DE ALIMENTAÇÃO TRIFÁSICA – SUPPLIER - FCAT 10000-60-25

Durante o teste de um motor no dinamômetro é fundamental que sua alimentação seja estável e de confiança, devido a energia elétrica da rede ter muita oscilação, é imprescindível a utilização de uma fonte de alimentação de boa qualidade.

No projeto e testes de motores elétricos de indução, muitas vezes é necessário testar o motor em diferentes situações como: sobretensão, subtensão, mínima tensão de partida e mínima tensão de funcionamento. A fonte FCAT 10000-60-25 da Supplier atende a esses requisitos, pois além de ampla faixa de saída de tensão, pode variar a tensão e a frequência de saída durante os testes.

Segundo Supplier (2022), a é uma fonte de alimentação CA trifásica senoidal desenvolvida para suprir a maior parte das necessidades de geração de redes de alimentação para testes de equipamentos alimentados via rede trifásica. Por meio da interface remota o usuário pode comandar mais de uma unidade sem precisar se deslocar até a fonte. Também é possível obter os valores das tensões e correntes eficazes de saída, via comunicação

serial/ethernet. Outro dado importante que a fonte fornece é a potência ativa de cada uma das três fases. O modelo da fonte é apresentado na figura 52.

Figura 52 – Fonte de alimentação CA trifásica - FCAT 10000-60-25.



Fonte: Supplier (2022).

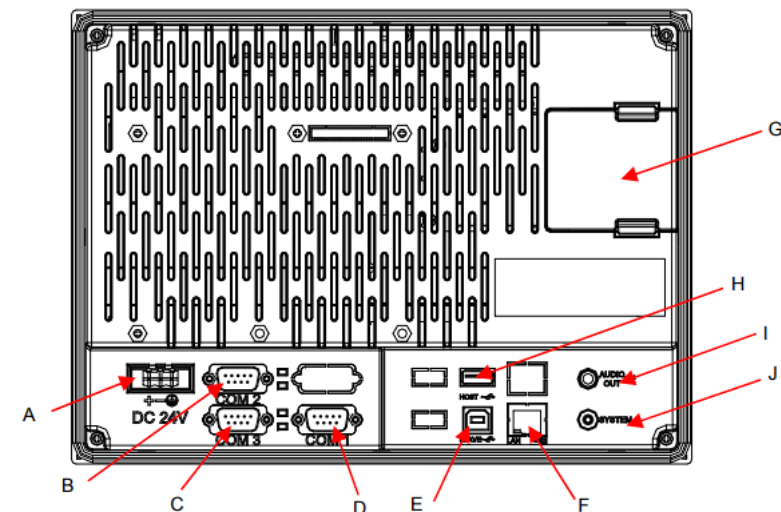
3.10 IHM – DELTA – B10S615

A IHM tem o papel de facilitar a interação do operador com o sistema, seja recebendo os dados do inversor e outros sensores e exibindo-os na tela, ou enviando os dados e parâmetros desejados pelo operador para os componentes endereçados.

Um equipamento versátil e que se adequa ao projeto do dinamômetro é a IHM da Delta, da série B-10, o modelo B10S615. Ela recebe os dados do inversor, do sensor de rotação e transdutor de torque, e do analisador de energia e dependendo da implementação realizada no dispositivo, exibe os cálculos ordenados em sua programação.

A B10S615 possui as portas de comunicação COM1, COM2, COM3 e Ethernet Interface. Por meio delas, através de um protocolo de comunicação serial RS-232, RS-422 e RS-485 para as portas COM e Ethernet para a respectiva porta, é possível fazer a comunicação com os dispositivos do sistema. Na figura 53 são mostradas as opções de conexão da B10S615.

Figura 53 – Conexões da IHM – B10S615.



Fonte: Delta (2022).

Onde:

- | | |
|------------------------------|---|
| A – Terminal de alimentação; | F – Ethernet Interface; |
| B – COM2; | G – Slot de cartão de memória/tampa da bateria; |
| C – COM3; | H – USB Host; |
| D – COM1; | I – Interface de saída de áudio; |
| E – USB Slave; | J – Chave do sistema; |

Para facilitar a configuração dos layouts das telas e a programação para o tratamento dos dados, a Delta disponibiliza softwares próprios e gratuitos, onde o programador consegue manipular os dados e fazer o processamento da forma como desejar. Os programas disponibilizados são:

DOPSoft: software para a criação dos layouts das telas e lógica de programação e processamento dos dados, através dele se faz toda a configuração do endereçamento e comunicação dos dispositivos escravos.

eServer: programa que permite a transferência de informações de teste e dados históricos diretamente do local de teste para um PC via Ethernet. Por meio dele, a coleta dos dados pode ser salva em arquivos de Excel definidos pelo usuário, e cria de forma fácil relatórios de teste.

eRemoto: software para controle remoto da IHM, que permite visualizar e monitorar a mesma tela apresentada na IHM em um site de acesso próprio, e controla todo o processo via Ethernet.

Como exemplo, alguns dos dados que podem ser apresentados em uma tela de IHM, durante o teste são a potência, o conjugado do motor em teste e a rotação. Quanto aos parâmetros que podem ser pré-configurados para o teste são parâmetros da curva de teste e de controle do motor em carga e em teste. É possível configurar uma curva de pontos de rotação com intervalos específicos para a coleta dos dados de torque e demais informações.

A curva de torque *versus* velocidade e potência *versus* velocidade gerada durante o teste, e demais parâmetros calculados podem ser extraídos para um cartão de memória inserido na IHM, ou repassados diretamente para um PC.

Se enviado ao computador, os dados podem ser manipulados de acordo com a necessidade do usuário através de tabelas no Excel, e extraídas as informações e cálculos necessários. A figura 54-a) e 54-b) mostram um exemplo de como os dados coletados podem ser disponibilizados em tabelas do Excel, e a figura 54-c) exibe uma curva de torque *versus* velocidade gerada durante um teste de motor.

Figura 54 – a) Exemplo de dados mecânicos coletados - dinamômetro e inversor; b) Exemplo de dados elétricos coletados; c) curva de torque vs velocidade.

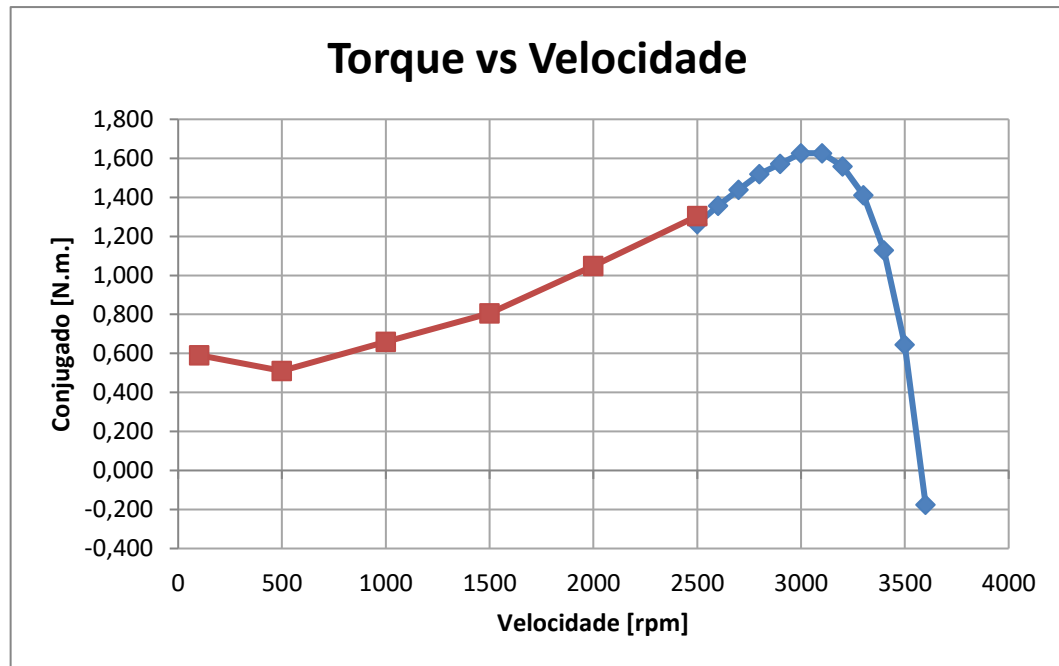
a)

Dinamômetro						Inversor					
Velocidade [rpm]	Conjugado [N.m]	Offset [N.m]	Potência [cv]	Potência [W]	Pot. Nominal [cv]	Ta [s]	Tr [s]	Td [s]	Tj [s]	Tensão de Saída [V]	Corrente de Saída [A]
3600	-0,175	-0,2323	-0,083	-60,8	0,3	5	5	36	5	405,7	4,67
3499	0,645	-0,2323	0,321	236,4	0,3	5	5	36	5	407,5	4,69
3400	1,129	-0,2323	0,540	397,2	0,3	5	5	36	5	408,6	4,79

b)

Velocidade	Tensão	Corrente	cos(fi)	Pot. Aparente	Pot. Ativa	Escorregamento	Rendimento
n [rpm]	Vin [V]	Iin [A]	fp	Sin [VA]	Pin [W]	s [%]	η [%]
3600	255,6	0,82	0,976	210	205	0,0%	-29,7%
3499	255,4	1,70	0,977	434	424	2,8%	55,7%
3400	255,3	2,36	0,990	603	596	5,6%	66,6%

c)



Fonte: Autor (2022).

Na figura 54-a) o campo de potência nominal é configurado de acordo com o motor em teste, antes do início do teste. Dependendo do modo programado na IHM, é possível estabelecer tempos para se iniciar uma curva automática de teste, esses tempos são T_a – Tempo de aceleração, T_r – Tempo em determinada rotação, T_d – Tempo de divisão da curva e T_j – Tempo de jog do inversor. Esses parâmetros estão na tabela exemplificada na figura 54-a).

3.11 CUSTO DOS COMPONENTES E ORÇAMENTO TOTAL

Diante dos componentes propostos, foi realizado um levantamento do valor médio de cada dispositivo, e o custo total para a configuração apresentada.

Na tabela 4 é mostrado o componente e seu respectivo valor médio. Para a loja escolhida foi levado em consideração a disponibilidade do produto. No caso de o dispositivo não ser vendido no Brasil, o mesmo consta como importado na tabela, e seu valor em dólar foi convertido para real considerado o valor de R\$ 5.31, que é a cotação para o dólar na data de atual, 15 de dezembro de 2022. O valor médio constado na tabela é baseado no valor do pagamento à vista.

Para o valor total é feito a soma de todos os valores dos dispositivos, no levantamento em questão o valor total final foi de aproximadamente R\$ 507.283,87.

Tabela 4 – Custo dos componentes e orçamento total

Componente	Valor Médio (R\$)	Loja pesquisada
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO – WEG – W22 - 15CV	6.769,90	Loja do mecânico
INVERSOR DE FREQUÊNCIA DANFOSS – FC 301	8.866,40	Mercado Livre
ENCODER INCREMENTAL – DYNAPAR - B58N	1.520,00	Mercado Livre
RESISTOR DE FRENAGEM – DANFOSS MCE 101	7.760,00	Mercado Livre
ANALISADOR DE ENERGIA – YOKOGAWA - CW500	16.695,00	Importado - Tequipment
ACOPLAMENTOS ROTEX GS - SEM FOLGA	400,00	Mercado Livre
MESA COORDENADA – MANROD-MR-28	3.746,90	Anhanguera Ferramentas
FONTE TRIFÁSICA – SUPPLIER - FCAT 10000-60-25	442.800,00	SUPPLIER
IHM – DELTA – B10S615	2.295,67	Importado - AliExpress
TRANSDUTOR DE TORQUE – HBM T22	16.430,00	Importado - Alibaba
Valor Total (R\$)	507.283,87	

Fonte: Autor (2022).

4 CONCLUSÃO

O motor de indução, por ser o principal tipo de motor utilizado na indústria, precisa ter um projeto que além de atender os requisitos ao qual se propõe, deve ser eficiente a ponto de evitar o desperdício de material e energia. O dinamômetro é uma ferramenta que vem como uma forma de auxiliar a mensurar as grandezas resultantes do projeto do motor elétrico de indução.

O presente trabalho foi elaborado a fim de auxiliar na configuração e no entendimento de como é o funcionamento de uma bancada de dinamômetro, e sua finalidade na aplicação de testes de motores elétricos de indução. Os testes realizados neste tipo de bancada, visam a avaliação de desempenho e eficiência dos motores elétricos de indução projetados, por meio dos parâmetros elétricos e mecânicos obtidos.

A análise dos principais componentes que constituem o sistema do dinamômetro, foi elaborada de modo a se entender como o mesmo funciona e qual papel de sua aplicação dentro deste processo.

Os tipos de protocolos de comunicação, pelos quais os dispositivos se comunicam e trocam informações de forma ordenada, teve uma breve abordagem, mostrando-se os principais pontos e conceitos de cada protocolo, e o porquê de ser utilizado dentro de um determinado sistema. O avanço de maneira mais aprofundada neste tópico não caberia ao escopo deste trabalho, visto que o assunto é amplo e deixaria o trabalho muito extenso.

Como resultado, mostrou-se propostas de modelos e marcas dos componentes apresentados para a configuração de uma bancada de dinamômetro, argumentando-se o motivo pela escolha dos dispositivos e suas especificações técnicas mais relevantes.

Por fim, foi realizado um levantamento dos custos individuais de cada componente proposto e o orçamento total que seria necessário para a compra de todos os dispositivos. O valor final foi normalizado para o dólar corrente na data de pesquisa.

Diante do que se propôs este trabalho, pode-se propor futuros projetos para o avanço na construção de uma bancada funcional de dinamômetro.

Um dos projetos seria a elaboração de toda a parte estrutural, a qual seria feita a instalação e disposição dos componentes que são abordados neste trabalho, visando uma construção robusta e que dispusesse de meios de segurança para evitar acidentes e situações perigosas durante a realização de um teste de motor.

A outra proposta de projeto, seria a realização da comunicação e programação de todos os dispositivos, de forma a garantir a troca eficiente e eficaz de dados e configurações entre eles. Esta abordagem exigiria o estudo mais avançado dos protocolos de comunicação, a fim de garantir o meio mais adequado e ordenada de programação.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernanda. **O que é Encoder?** 2016. Disponível em: <<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>>. Acesso em: 01 out. 2022.

ALTUS (Rio Grande do Sul). **O que é e porque você deve utilizar uma IHM na sua aplicação.** 2022. Disponível em: <https://www.altus.com.br/post/360/o-que-e-e-porque-voce-deve-utilizar-uma-ihm-na-sua-aplicacao>. Acesso em: 05 out. 2022.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA - SOBRAEP (Brasil). **Fontes de alimentação de corrente alternada.** 2021. Disponível em: <https://sobraep.org.br/2021/08/24/fontes-de-alimentacao-de-corrente-alternada/>. Acesso em: 05 out. 2022.

BOLTON, William *et al.* **Mecatrônica - Uma abordagem multidisciplinar.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 664 p.

CHAPMAN, Stephen J.. **FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS.** 5. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013. 684 p.

DANFOSS (Brasil). **VLT® AutomationDrive FC 301 / FC 302.** 2022. Disponível em: <https://www.danfoss.com/pt-br/products/dds/ac-drives/vlt-automationdrive-fc-301-fc-302/#tab-related-applications>. Acesso em: 10 out. 2022.

DANFOSS (Brasil). **VLT® Brake Resistor MCE 101.** 2022. Disponível em: <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG06H102.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

DELTA (Taiwan). **DOP-B10: b10s615 / b10e615 instruction sheet. B10S615 / B10E615 Instrunction Sheet.** 2022. Disponível em: https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060302/Manual/DELTA_IA-HMI_DOP-B10S615-E615_Q_TC-EN-SC-TUR_20160714.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

DYNAPAR (Brasil). **Encoder Incremental B58N.** 2022. Disponível em: <https://dynaparencoders.com.br/wp-content/uploads/2016/10/Encoder-Dynapar-B58N-com-desenho-rev2021.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

ELVIS BERTOTI (Usa). **Modelo esquemático do Freio de Prony.** 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Modelo-esquematico-do-Freio-de-Prony-1_fig1_325114501. Acesso em: 11 dez. 2022.

ENGPROCESS AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL (São Paulo). **O que é IHM?** 2022. Disponível em: <https://engprocess.com.br/o-que-e-ihm/>. Acesso em: 05 out. 2022.

FARLEY, Aaron. **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SMALL ELECTRIC MOTOR DYNAMOMETER FOR MECHANICAL ENGINEERING**

UNDERGRADUATE LABORATORY. 2012. 72 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mechanical Engineering, University Of Arkansas, Fayetteville, 2012.

LHF INSTRUMENTAÇÃO (Brasil). **DINAMÔMETRO LHF INSTRUMENTAÇÃO.** 2022. Disponível em:

<http://www.surgetestbrasil.com.br/home1/dinamometro-para-motores-eletricos>. Acesso em: 05 out. 2022.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de indução.** 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

FITZGERALD, Arthur E. *et al.* **Máquinas Elétricas - Com introdução à eletrônica de potência.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

HART, Daniel W.. **Eletrônica de Potência - Análise e projetos de circuitos.** Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2012. 480 p.

HBM AN HBK COMPANY (Brasil). **Conhecimento básico dos sensores de torque.** 2022. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/10716/como-um-transdutor-de-torque-realmente-funciona/?utm_term=&utm_campaign=Leads_Performance_Max_HBM_BR&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7789390417&hsa_cam=17789202913&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQjwqoibBhDUARIsAH2OpWjDXxYsMfesabRSd3eDYiWPoVMAasp0dc7LPoZzd7sPA91ooZ4OqG0aAiNEALw_wcB>. Acesso em: 01 out. 2022.

HBM AN HBK COMPANY (Brasil). **Definição de um analisador de energia - O que é um analisador de energia?** 2022. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/8099/analizador-de-energia-principio-de-operaco/?utm_term=&utm_campaign=Leads_Performance_Max_HBM_BR&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7789390417&hsa_cam=17789202913&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQjwqoibBhDUARIsAH2OpWhdPTGxZgvHTczJmJi-jg0r_E31bUZdbTevU8hrYKZ5N5XUvN-e_DiAaGdPEALw_wcB. Acesso em: 01 out. 2022.

HBM AN HBK COMPANY (Brasil). **Sensor de Torque T22: Medição de Torque de até 1kNm.** 2022. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/2384/t22-sensor-de-torque-para-aplicacoes-simples/?product_type_no=Sensor%20de%20Torque%20T22:%20A%20Alternativa%20de%20Baixo%20Custo&utm_term=&utm_campaign=Leads_Performance_Max_HBM_BR&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7789390417&hsa_cam=17789202913&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQjwqoibBhDUARIsAH2OpWhdPTGxZgvHTczJmJi-jg0r_E31bUZdbTevU8hrYKZ5N5XUvN-e_DiAaGdPEALw_wcB. Acesso em: 10 out. 2022.

INSP THERM - TRAFOS SERVICE - ENGENHARIA ELÉTRICA (São Paulo). **O que é o analisador de energia e para que serve?** 2022. Disponível em: <https://www.insp-therm.com.br/blog/o-que-e-o-analisador-de-energia-e-para-que-serve/>. Acesso em: 01 out. 2022.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Brasil). **10 protocolos de comunicação mais usados na automação industrial.** 2022. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/protocolos-de-comunicacao/>. Acesso em: 06 out. 2022.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Brasil). **Acoplamentos mecânicos: qual a função e quais os tipos?** 2022. Edilson Cravo. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/acoplamentos-mecanicos-qual-funcao/>. Acesso em: 01 out. 2022.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Brasil). **Mesa de Coordenadas.** 2022. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/lp/mesa-de-coordenadas#:~:text=As%20mesas%20de%20coordenadas%20XY,se%20dividem%20em%20duas%20classes..> Acesso em: 01 out. 2022.

MADE FOR MOTION KTR (Brasil). **ROTEX® GS acoplamentos sem folga: acoplamentos de baixo custo e sem folga - montagem fácil e rápida.** Acoplamentos de baixo custo e sem folga - montagem fácil e rápida. 2022. Disponível em: <https://www.ktr.com/br/products/rotex-gs/>. Acesso em: 18 out. 2022.

MAGTROL - MOTOR TESTING & SENSORS (Usa). **HD Series – Hysteresis Dynamometers.** 2022. Disponível em: <https://www.magtrol.com/product/hysteresis-dynamometers-hd-series/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

MANROD QUALITY MACHINES (Brasil). **MESA COORDENADA MR-28.** 2022. Disponível em: <https://manrod.com.br/product/mesa-coordenada/>. Acesso em: 10 out. 2022.

MARTYR, A. J. et al. Engine Testing: the design, building, modification and use of powertrain test facilities. 4. ed. Usa: Elsevier, 2012.

PAHC SOLUÇÕES EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL (Brasil). **Protocolos de redes industriais: quais são os principais?** 2021. Disponível em: <https://www.pahcautomacao.com.br/protocolos-de-redes-industriais-quais-sao-os-principais/>. Acesso em: 06 out. 2022.

POTENCIA PORTAL (Brasil). **Motores elétricos e eficiência energética.** 2021. Disponível em: <https://revistapotencia.com.br/portal-potencia/energia/motores-eletricos-e-eficiencia-energetica/#:~:text=Uso%20de%20motores%20de%20alto,de%20competitividade%20de%20qualquer%20empresa..> Acesso em: 16 out. 2022.

ST DRIVER (Brasil). **O que é um Resistor de Frenagem?** Disponível em: <https://stdriver.com.br/artigos/post/O%20que%20e%20um%20Resistor%20de%20Frenagem>. Acesso em: 01 out. 2022.

ABECOM (São Paulo). **Acoplamentos industriais: para que servem? quais os tipos? - Guia Completo.** 2022. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/acoplamentos-industriais/#:~:text=Acoplamento%20%C3%A9%20um%20componente%20mec%C3%A2nico,motriz%20e%20o%20eixo%20acionado..> Acesso em: 01 out. 2022.

SUPPLIER (Santa Catarina). **FONTE DE ALIMENTAÇÃO CA TRIFÁSICA.** 2022. Disponível em: <http://www.supplier.ind.br/produto/fontes-ca-trifasicas/8/fonte-de-alimentacao-ca-trifasica/346>. Acesso em: 12 out. 2022.

WEB AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL (Brasil). **Veja aqui o que é e como funciona a Frenagem em Inversores**. 2016. Disponível em: <https://webautomacaoindustrial.blogspot.com/2016/06/veja-aqui-o-que-e-e-como-funciona.html>. Acesso em: 01 out. 2022.

WEG (Brasil). **Motores eficientes geram economia de energia na indústria. 2022**. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghtml>. Acesso em: 15 out. 2022.

WEG (Santa Catarina). **W22 IR3 Premium 15 cv 4P 132M/L 3F 220/380/440 V 60 Hz IC411 - TFVE - B14D**. 2022. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/W22-/W22-IR3-Premium-15-cv-4P-132M-L-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B14D/p/12219737>. Acesso em: 10 out. 2022.

WORLDTOOLS (Santa Catarina). **MESA DE COORDENADA DE PRECISAO**. 2022. Disponível em: <https://www.worldtools.com.br/produto/mesa-de-coordenada-de-precisao-350-x-150-x-130mm-curso-em-x-175mm-em-y-150mm-vct-514-vertex-93372>. Acesso em: 05 out. 2022.

YOKOGAWA (Brasil). **Analizador de Energia - CW500**. 2022. Disponível em: <http://www.yokogawa.com.br/tm/produtos/analizadores-de-qualidade-de-energia/cw500.html>. Acesso em: 15 out. 2022.

ZHU, Cheng-Li; WANG, Yan-Zhong; HOU, Liang-Wei. Design and simulation of electrical dynamometer using improved DTC induction motor driver. **Journal Of Central South University**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 1360-1368, jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11771-017-3540-7>.

