



BANCADA DE ENSAIOS DA MÁQUINA SÍNCRONA

Tiago Fernando Pegoraro
Cesar Alberto Penz
João Carlos Martins Lucio
Juliano Bitencourt Padilha
Leandro De Medeiros Sebastião
Sérgio Luciano Ávila



Reitor
Zizimo Moreira Filho

Diretor do Campus Florianópolis
Rogério de Souza Versage

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Adriano de Andrade Bresolin

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA – IFSC – CAMPUS FLORIANÓPOLIS
AV. MAURO RAMOS N. 950, FLORIANÓPOLIS, SC.

TIAGO FERNANDO PEGORARO
CESAR ALBERTO PENZ
JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO
JULIANO BITENCOURT PADILHA
LEANDRO DE MEDEIROS SEBASTIÃO
SÉRGIO LUCIANO ÁVILA

BANCADA DE ENSAIOS DA
MÁQUINA SÍNCRONA

FLORIANÓPOLIS
2026

Catálogo na fonte pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina – IFSC

B213 Bancada de ensaios da máquina síncrona [recurso eletrônico] /
Tiago Fernando Pegoraro [et al.] – Florianópolis : Publicação do
IFSC, 2026.
48 p.: il. color.

Publicação digital no formato PDF.

ISBN: 978-65-83787-20-0

1. Engenharia elétrica – Estudo e ensino. 2. Máquinas elétricas
síncronas. 3. Motores elétricos. I. Pegoraro, Tiago Fernando. II. Penz,
Cesar Alberto. III. Lúcio, João Carlos Martins. IV. Paçilha, Juliano
Bitencourt. V. Sebastião, Leandro de Medeiros. VI. Ávila, Sérgio
Luciano. VII. Título.

CDD 621.313

Elaborada pela bibliotecária Camila Koerich Burin – CRB14/969

CREATIVE COMMONS

VEDADO USO PARA FINS COMERCIAIS

Área de
concentração : Engenharia Elétrica

Público : Professores e alunos dos cursos técnicos de
Eletrotécnica e de bacharelado em Engenharia Elétrica

Palavras-chave : Máquinas Elétricas, Motores Elétricos, Geradores,
Ensaio, Bancada Didática

Tiago Fernando Pegoraro, Eng.
tiagofernandopegoraro@gmail.com
lattes.cnpq.br/1016508979111263

Prof. Cesar Alberto Penz, Dr. Eng.
cesar.penz@ifsc.edu.br
lattes.cnpq.br/7628589142964658

Prof. João Carlos Martins Lúcio, Dr. Eng.
jlucio@ifsc.edu.br
lattes.cnpq.br/3295763152839405

Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Dr. Eng.
juliano.padilha@ifsc.edu.br
lattes.cnpq.br/7628589142964658

Prof. Leandro de Medeiros Sebastião, M. Eng.
leandro.medeiros@ifsc.edu.br
lattes.cnpq.br/7932397023703520

Prof. Sérgio Luciano Avila, Dr. Eng.
sergio.avila@ifsc.edu.br
lattes.cnpq.br/7864845374871073

PREFÁCIO

Este livro é fruto de um trabalho realizado no âmbito do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAE), Campus Florianópolis, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC). O objetivo é validar a utilização de uma bancada didática para a realização de ensaios com máquinas elétricas girantes, em particular as do tipo síncronas.

O referido trabalho foi parcialmente financiado pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) em parceria com a empresa AQTECH Engenharia e Instrumentação S.A., n. 23292.021772/2024-28, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto de pesquisa “Gêmeo Digital de Aerogerador com Realidade Aumentada Gamificada”, n. 404858/2023-6, ambos coordenados pelo Prof. Sérgio Luciano Avila. Esse livro também é fruto do Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica do acadêmico Tiago Fernando Pegoraro.

A obra está organizada em três capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se uma breve fundamentação teórica sobre o uso de bancadas didáticas em atividades de ensino e sobre as máquinas trifásicas de corrente alternada, em especial o Motor de Indução e a Máquina Síncrona, no que diz respeito à construção, operação e controle de velocidade, bem como ao controle de geração de Geradores Síncronos. No segundo capítulo, é apresentado o manual de operação da bancada didática, com o intuito de familiarizar o leitor com os recursos disponíveis. O terceiro capítulo apresenta os roteiros propostos para a realização de alguns ensaios com a Máquina Síncrona, tomando como base a norma vigente. Tais ensaios podem servir como referência para as atividades práticas desenvolvidas nas disciplinas de Máquinas Elétricas, nos cursos técnicos de Eletrotécnica e de bacharelado em Engenharia Elétrica. Por fim, apresentam-se o diagrama unifilar e a tabela que permite a parametrização do inversor de frequência, extraídos do projeto da bancada.

O propósito maior desse livro é servir as atividades práticas em laboratórios de máquinas síncrona. Assim, para obter maior detalhamento técnico sobre os assuntos abordados, sugere-se a busca pelas obras clássicas sobre máquinas elétricas girantes, listadas nas referências bibliográficas.

Os autores.

SUMÁRIO

1.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
1.1.BANCADAS DIDÁTICAS DE ENSAIOS.....	8
1.2.MÁQUINAS TRIFÁSICAS DE CORRENTE ALTERNADA.....	9
1.3.CONTROLE DE VELOCIDADE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	14
2.MANUAL DE OPERAÇÃO DA BANCADA	17
2.1.INSPEÇÃO DA BANCADA	17
2.2.INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA	17
2.3.CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA BANCADA	18
2.4.EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS DA BANCADA	19
2.5.CARACTERÍSTICAS NOMINAIS MÁQUINAS GIRANTES	20
2.6.ENERGIZAÇÃO E OPERAÇÃO DA BANCADA.....	21
2.7.COMUNICAÇÃO MODBUS	27
3.ENSAIOS COM A MÁQUINA SÍNCRONA	28
3.1.MEDIÇÃO RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS DA ARMADURA	29
3.2.ENSAIO A VAZIO	32
3.3.ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.....	33
3.4.DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA E DA REATÂNCIA.....	34
3.5.ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS ROTACIONAIS	37
3.6.ENSAIO DE CARACTERÍSTICA EXTERNA	40
3.7.ENSAIO DE REGULAÇÃO DE TENSÃO	42
3.8.ENSAIO DE CURVA EM V DO MOTOR SÍNCRONO	44
REFERÊNCIAS	46
ANEXO.....	47

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, discute-se inicialmente, a importância da utilização de bancadas didáticas nas atividades de ensino e pesquisa. Na sequência, são apresentados os aspectos construtivos e operacionais das máquinas trifásicas de corrente alternada, em especial do motor de indução e da máquina síncrona. Por fim, são apresentados aspectos relacionados com o controle de velocidade de motores de indução e de motores síncronos, bem como o controle de geração de geradores síncronos.

1.1. BANCADAS DIDÁTICAS DE ENSAIOS

Para Fortier e Michel (2003), as bancadas de ensaios são utilizadas para analisar componentes e suas interações, visando obter um entendimento mais profundo sobre a essência do sistema real. Elas são montadas com protótipos e componentes reais do sistema e têm como objetivo oferecer percepções sobre o funcionamento de um ou mais elementos desse sistema. Oferecem um ambiente realista de *hardware* e *software* para testar componentes sem precisar do sistema final, ajudando a entender os requisitos funcionais e o comportamento operacional do sistema e fornecendo medições quantitativas. Focam apenas em um subconjunto do sistema total, especificamente o aspecto que se quer estudar, refinar ou desenvolver.

Além disso, bancadas didáticas consolidam a teoria ensinada em sala de aula. A sua utilização auxilia no desenvolvimento de discentes, principalmente nos cursos de bacharelado em Engenharia, pois por meio delas há a possibilidade do contato com a prática, simulando processos industriais e sistemas reais (Fabián, 2017).

Trabalhos e estudos ilustram a importância da utilização de bancadas didáticas no ensino. O trabalho de Ely (2018) utiliza uma bancada didática para o estudo da análise do sistema de medição trifásica em ensaios de máquinas elétricas

rotativas. De Azevedo (2012), utilizou uma bancada experimental para ensaios em geradores elétricos utilizados em aerogeradores. Tominaga (2021), graduado em Engenharia Elétrica pelo IFSC, em seu trabalho de conclusão de curso, fez uso de uma bancada experimental para o estudo de severidade do desbalanceamento de rotores de motores elétricos.

1.2. MÁQUINAS TRIFÁSICAS DE CORRENTE ALTERNADA

Segundo Umans (2014), as máquinas de corrente alternada classificam-se em duas categorias: síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, uma corrente contínua circula pelo enrolamento do rotor, por meio de contatos rotativos localizados no próprio rotor, denominados anéis de contato. Em contrapartida, nas máquinas de indução, as correntes rotóricas são induzidas pela combinação da variação temporal do fluxo magnético gerado pelas correntes do estator, com o movimento do rotor em relação ao estator.

Em relação às máquinas de indução, é possível utilizá-las como motor ou como gerador, porém como gerador, apresentam algumas desvantagens, e somente em aplicações especiais são utilizadas. Por essa razão que estas máquinas são usualmente referidas apenas como motores de indução (Chapman, 2013).

1.2.1. Motores de Indução

O elemento estático do motor de indução trifásico, denominado estator, é confeccionado com chapas de material ferromagnético, formando um núcleo com ranhuras internas, dentro das quais são instalados os grupos de bobinas que compõem cada fase (Filippo Filho, 2013). O número de grupos de bobinas por fase define o número de pólos de um campo magnético girante (ver a subseção 3.1.3, sobre o funcionamento do motor de indução), bem como a velocidade de rotação desse campo, estabelecendo um limite para a velocidade de rotação do rotor (parte girante do motor de indução).

Na Figura 1.1 é apresentado o estator de um motor de indução trifásico, devidamente envolvido pela carcaça, confeccionada geralmente com ferro fundido.

Figura 1.1 – Estator do motor de indução trifásico

Fonte: directindustry.com.

Nesta categoria de motores, utilizam-se dois tipos de rotor que se diferenciam na forma construtiva. Um deles é do tipo rotor gaiola de esquilo, e o outro do tipo rotor bobinado ou de anéis. Ambos são assíncronos e denominados motores de indução, visto que seu funcionamento se baseia na indução eletromagnética. O rotor gaiola de esquilo possui uma estrutura semelhante a uma gaiola de esquilo. A corrente elétrica é conduzida no rotor através de barras de cobre ou alumínio, conectadas por anéis de extremidade do mesmo material. Os motores de indução com rotor gaiola de esquilo são amplamente utilizados na indústria devido ao baixo custo e construção robusta. Podendo ser acionados em velocidade constante, ou velocidade variável por meio de controle eletrônico com inversor de frequência (Mohan, 2015). O rotor bobinado possui enrolamentos trifásicos, cujo acesso elétrico é possível por meio de terminais com escovas e anéis deslizantes (Oliveira, 2021). Os enrolamentos presentes no rotor são usualmente ligados em Y (estrela), sendo que as três terminações livres são conectadas a anéis deslizantes fixos ao eixo. Portanto, é possível controlar a corrente, bem como modificar a resistência rotórica, por meio da utilização de um reostato, dispositivo externo

devidamente conectado aos terminais dos enrolamentos do rotor, e com isso, se altera a característica de torque *versus* velocidade do motor.

A Figura 1.2 ilustra a forma construtiva típica dos dois tipos de rotor para o motor de indução.

Figura 1.2 – Rotores para o motor de indução



Fonte: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br>

O motor de indução com rotor bobinado é mais caro do que o motor de gaiola de esquilo e exige mais manutenção devido ao desgaste das escovas e anéis deslizantes, por isso são raramente utilizados (Chapman, 2013).

Funcionamento do Motor de Indução

Segundo Mamede Filho (2023), o princípio de funcionamento dos motores assíncronos trifásicos, que constituem a maioria dos motores em operação nas indústrias, está baseado em três enrolamentos instalados no estator, que estão diretamente ligados à fonte de tensão alternada trifásica, deslocados fisicamente de 120° . Por sua vez, a fonte de alimentação trifásica do sistema elétrico é composta por três tensões, também defasadas no tempo de 120° , formando o campo magnético girante, já mencionado na seção 3.1, na velocidade angular definida pela frequência do sistema de alimentação, e que atravessa o entreferro atingindo a massa rotórica e induzindo, por variação de fluxo, forças eletromotrizes. Como as barras de um rotor de gaiola, ou as bobinas do rotor bobinado estão em curto-circuito nas extremidades, há um fluxo de corrente circulando que, interagindo com o campo girante estatórico, produz um conjugado (torque) eletromecânico que arrasta o rotor no sentido desse campo. A este esforço, dá-se o nome de conjugado do motor. Já a carga

acoplada ao eixo reage a este esforço negativamente, ao que se dá o nome de conjugado de carga ou conjugado resistente (Mamede Filho, 2023).

Durante a partida dos motores de indução, a diferença entre a velocidade do campo girante do estator e a velocidade do rotor é máxima. Neste instante, com máxima variação de fluxo, as correntes no rotor e no estator são máximas. Por isso, a corrente de partida pode atingir entre 5 e 8 vezes a corrente nominal do motor. Quando o motor está operando a vazio, ou seja, sem a presença de carga mecânica no eixo, o rotor desenvolve uma velocidade angular de valor praticamente igual à velocidade do campo girante do estator. Adicionando-se carga mecânica ao eixo, a velocidade do rotor diminui. A diferença existente entre a velocidade síncrona (velocidade do campo girante) e a velocidade do rotor é denominada escorregamento.

Para que haja conjugado, a velocidade do rotor deve ser inferior à velocidade do campo girante. Se por hipótese, a velocidade do rotor for igual à velocidade do campo girante, o conjugado será nulo (Mamede Filho, 2023), isso porque não existirá variação de fluxo, sendo nulas as forças eletromotrizes e as correntes induzidas no rotor. Entende-se, portanto, que quanto maior o percentual de carregamento do motor, menor deverá ser a velocidade do rotor, no sentido de produzir mais variação de fluxo, mais forças eletromotrizes e correntes induzidas e conseqüentemente, mais conjugado.

1.2.2. Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas desempenham um papel fundamental na conversão de energia mecânica em energia elétrica, sendo essenciais para que essa conversão de energia ocorra em nível comercial. Ou seja, segundo Mohan (2015), a principal função dessas máquinas é atuar como gerador de eletricidade em usinas de potência elevada.

O estator da máquina síncrona, da mesma forma que no motor de indução, funciona como a fonte geradora do campo magnético girante. Do ponto de vista construtivo, observa-se uma semelhança na construção do estator dessas duas máquinas. Com relação ao rotor, trata-se da fonte geradora de um campo

magnético indutor (campo magnético produzido pela circulação de corrente contínua pelo enrolamento do rotor), que durante o funcionamento da máquina, interage com o campo magnético girante do estator. O rotor pode ser construído com pólos lisos ou pólos salientes, além de outras duas formas: com magnetos permanentes ou com eletroímãs (Oliveira, 2021).

Na Figura 1.3, são apresentados os rotores de pólos lisos e de pólos salientes. Sob o ponto de vista operativo, a diferença é que o formato cilíndrico do rotor de pólos lisos dá ao mesmo uma maior robustez mecânica, tornando-o capaz de suportar forças centrífugas elevadas, ou seja, o rotor de pólos lisos é ideal para os turbogeradores (alternadores de alta rotação, na faixa de 1.800 rpm e 3.600 rpm, utilizados em usinas termelétricas). Já o rotor de pólos salientes, menos resistente a valores elevados de forças centrífugas, é indicado para os geradores síncronos de baixa rotação, como no caso das usinas hidrelétricas.

Figura 1.3 – Rotor de pólos lisos e rotor de pólos salientes



Fonte:<https://static.weg.net/medias>

Ainda com relação à operação, Umans (2014) afirma que em uma máquina síncrona operando como motor, em condições de regime permanente, o campo magnético criado pela corrente contínua que circula pelo enrolamento do rotor, faz com que o rotor gire na mesma velocidade ou em sincronismo com o campo magnético girante produzido pelas correntes de armadura. No caso da máquina operando como gerador, a frequência da tensão fornecida é determinada pela velocidade do acionador mecânico primário (máquina motriz).

1.3. CONTROLE DE VELOCIDADE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Há anos atrás, aplicações que exigiam velocidade variável e torque controlado eram atendidas por máquinas de corrente contínua, devido ao seu controle de velocidade flexível, mas estas apresentam construção mais complexa, são mais caras e exigem mais manutenção do que as máquinas de corrente alternada. Atualmente, sistemas eletrônicos de potência permitem o controle de velocidade e de torque em máquinas de corrente alternada, permitindo a substituição das máquinas de corrente contínua em muitas aplicações tradicionais e possibilitando novas aplicações (Umans, 2014).

1.3.1. Controle da Velocidade de Motores de Indução e Motores Síncronos

Uma das técnicas para controlar a velocidade de motores de indução e síncronos consiste em variar a velocidade do campo magnético girante do estator (velocidade síncrona), já que o rotor sempre gira com velocidade menor (Chapman, 2013). A velocidade do campo magnético girante, e conseqüentemente a velocidade do rotor, podem ser controladas por meio de um inversor de frequência, cuja função é alterar o valor da frequência das tensões de alimentação dos enrolamentos do estator, conforme a Equação 1.1.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1.1)$$

Onde:

n_s = velocidade síncrona [rpm];

f = frequência de variação das tensões de alimentação [Hz];

p = número de pólos do campo magnético girante.

A variação da velocidade pode ocorrer ainda, por meio de variadores mecânicos, que utilizam polias e correias, e modificam a velocidade da carga sem alterar a do motor (Filippo Filho, 2013). Para o motor de indução com rotor

bobinado, a variação de velocidade pode ocorrer pela alteração da resistência elétrica do rotor, por meio da utilização de reostatos.

Uma vantagem dos motores síncronos sobre os motores de indução, é a possibilidade de controle do fator de potência por meio do ajuste da corrente de excitação. Isso permite mantê-lo unitário, eliminando a necessidade de correção externa, por meio de um banco de capacitores, como é feito nos motores de indução.

No passado, máquinas síncronas de alta potência eram usadas como condensadores síncronos em subestações de transmissão, para suporte de tensão e estabilidade. Atualmente, os controladores estáticos baseados em semicondutores são preferidos por fornecer potência reativa sem a necessidade de manutenção de máquinas rotativas. Assim, as máquinas síncronas passaram a ser utilizadas principalmente para a geração de eletricidade em grandes usinas (Mohan, 2015).

1.3.2. CONTROLE DA GERAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores síncronos operam de modo que a frequência elétrica das tensões produzidas esteja sincronizada ou diretamente vinculada à velocidade mecânica de rotação do gerador (Chapman, 2013). Para obter determinada frequência elétrica no processo de geração de energia, é necessário submeter o gerador a uma velocidade constante em seu rotor, adotando estratégias de controle adequadas para plantas específicas (Oliveira, 2021).

Quando um único gerador está operando isoladamente, a potência ativa e a potência reativa fornecidas terão os valores demandados pela carga. Portanto, para um valor de potência ativa demandada pela carga, o ajuste do regulador de velocidade controla a frequência de operação do gerador, fazendo com que o mesmo forneça essa potência ativa. Para um valor de potência reativa demandada pela carga, o regulador de tensão ajusta a corrente que circula pelo enrolamento do rotor, controlando a intensidade do campo magnético indutor,

já mencionado na seção 3.2, e a tensão nos terminais do gerador, fazendo com que o mesmo forneça essa potência reativa (Chapman, 2013).

As seguintes condições resumem quando um gerador está funcionando isoladamente, alimentando as cargas do sistema:

- a) as potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador serão os valores demandados pelas cargas conectadas;
- b) o ponto de ajuste no regulador de velocidade irá controlar a frequência de operação do sistema.

A situação acima se aplica para locais remotos, nos quais há geradores isolados em funcionamento. Por outro lado, segundo Chapman (2013), quando um gerador está em paralelo com um barramento infinito, ou seja, fornecendo potência ativa e potência reativa para um sistema de potência de porte muito grande, cuja tensão e frequência são consideradas constantes, ocorre que:

- a) a frequência e a tensão de terminal do gerador são controladas pelo sistema ao qual ele está ligado;
- b) o ponto de ajuste no regulador de velocidade do gerador controla a potência ativa fornecida pelo gerador ao sistema;
- c) a corrente que circula pelo enrolamento do rotor controla a potência reativa fornecida pelo gerador ao sistema.

2. MANUAL DE OPERAÇÃO DA BANCADA

Este capítulo apresenta informações relevantes acerca da utilização da bancada didática destinada à realização de ensaios com máquinas elétricas girantes, fabricada pela empresa WEG. O texto que se segue foi elaborado, em sua versão inicial, a partir do Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido pelo acadêmico Tiago Fernando Pegoraro, com o propósito de subsidiar e padronizar as atividades práticas das unidades curriculares cujo conteúdo programático abrange o estudo das Máquinas de Indução e das Máquinas Síncronas.

2.1. INSPEÇÃO DA BANCADA

Assim como em qualquer equipamento elétrico, seja de caráter didático ou de aplicação profissional, é imprescindível a execução dos seguintes procedimentos antes da energização da bancada:

- 1) Efetuar a inspeção visual das estruturas mecânica e elétrica da bancada;
- 2) Efetuar a inspeção visual e o reaperto, quando necessário, de todas as conexões elétricas relacionadas aos circuitos de comando e de potência, incluindo os pontos de conexão que interligam a bancada aos equipamentos periféricos;
- 3) Efetuar a inspeção visual da correta conexão dos cabos externos;
- 4) Efetuar a inspeção visual dos equipamentos periféricos;
- 5) Não permitir a energização da bancada caso esta ou os equipamentos periféricos não se encontrem em perfeitas condições de uso.

2.2. INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA

- 1) A bancada deve ser operada exclusivamente por pessoas que possuam conhecimento e experiência na operação de painéis elétricos e no acionamento de máquinas elétricas rotativas. No contexto das atividades acadêmicas, a responsabilidade pela operação é dos professores das unidades curriculares correspondentes, sendo vedada, em qualquer circunstância, a operação autônoma por alunos.
- 2) A operação da bancada requer o uso obrigatório de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) adequados, como óculos de proteção com Certificado de Aprovação nº 40.903, entre outros que se façam necessários conforme a atividade.
- 3) O usuário deve assegurar-se de que o disjuntor geral (Q1), localizado na lateral esquerda da bancada (quando visualizada de frente), permaneça na posição OFF antes de conectá-la à rede elétrica, bem como antes da execução de qualquer procedimento de manutenção na própria bancada, nos equipamentos periféricos ou nas máquinas elétricas girantes.
- 4) O usuário deve verificar se a tensão da rede elétrica é compatível com a tensão nominal de operação da bancada antes de realizar sua energização.
- 5) A bancada não deve ser energizada e operada com as portas inferiores abertas e, em hipótese alguma, as máquinas elétricas devem ser acionadas sem as proteções adequadas em suas partes girantes.

2.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA BANCADA

A seguir são apresentadas as características técnicas da banca:

- tensão de operação nominal: 380 V
- tensão de isolamento nominal: 690 V
- corrente nominal: 40 A
- corrente de curto-circuito: 50 kA
- frequência nominal: 60 Hz
- índice de proteção: 21
- tensões dos circuitos de comando: 220 V (F–N) ~ 60 Hz; 24 V_{CC}
- dimensões (L x P x A) em mm: 1.200 x 972 x 1.450

- massa estimada: 400 kg
- documento de referência (projeto): 10003152976

2.4. EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA BANCADA

Os seguintes equipamentos e instrumentos de medição compõem a bancada:

- 01 inversor de frequência WEG, modelo CFW11-17A;
- 01 fonte de alimentação CA/CC, modelo PSS24-W/2,5, potência 60 W, tensão de saída 24 V_{CC};
- 01 fonte de alimentação CA/CC, modelo PSS24-W/0,3, potência 10 W, tensão de saída 24 V_{CC};
- 01 amperímetro analógico, escala de medição 0–10 A em corrente contínua, classe de tensão 600 V, modelo BM96;
- 01 voltímetro analógico, escala de medição 0–80 V em tensão contínua, classe de tensão 600 V, modelo BM96;
- 01 multimedidor digital de energia, fabricante Siemens, modelo SENTRON PAC1020, tensão máxima 400/230 V, corrente máxima 5 A, alimentação auxiliar 85–276 V_{CA};
- 01 multimedidor digital de energia, fabricante Janitza, modelo UMG 96S, tensão máxima 300 V, corrente máxima 5 A, sem alimentação auxiliar;
- 01 conversor de interface RS485/RS422 para USB, modelo USB-i485.

Como equipamentos e instrumentos periféricos, incluem-se:

- 01 variador de tensão trifásico, modelo TGSC, potência 15 kVA e saída 20A;
- 01 reostato de partida, potência 5,5 kW, fabricante Denkhtherm, com 9 estágios de resistência e 10 posições de ajuste de velocidade, tensão rotórica 155 V, corrente rotórica 21,6 A;
- 01 resistor de frenagem para inversor de frequência, fabricante ELETELE, série 15W3295A.1, potência 6 kW, resistência 62 Ω , 100 % ED;
- 01 reostato de campo destinado à excitação da máquina síncrona;
- 01 transdutor de torque, fabricante HBM, modelo T22/50NM, torque máximo 50 Nm, sinal de saída ± 5 V / 10 ± 8 mA;

- 01 encoder (conversor rotativo), 1024 pulsos/rotação, fabricante WEG, modelo FAF132+GLA162.

2.5. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DAS MÁQUINAS GIRANTES

Na Tabela 2.1 são apresentadas as características nominais das máquinas elétricas girantes utilizadas na bancada didática.

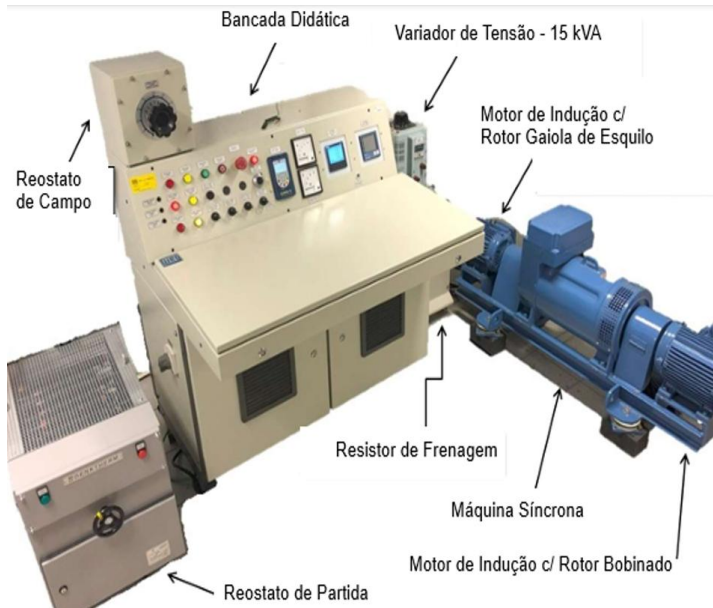
Tabela 2.1 – Características nominais das máquinas elétricas girantes

	MÁQUINA M1 Motor de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo	MÁQUINA M1.1 Motor de Indução para a Ventilação da Máquina M1	MÁQUINA M2 Motor de Indução com Rotor Bobinado	MÁQUINA M3 Máquina Síncrona
Modelo	W22 Premium	-	FAF 132 M	GLA 162 CE VS
Potência (kW)	5,5	0,37	5	5
Tensão (V)	220 / 380	380	220 / 380	220
Corrente (A)	20,4 / 11,8	1,07	18,38 / 10,64	13,12
Rotação (rpm)	1.750	3.360	1.740	1.800
Frequência (Hz)	60	60	60	60
V Secundária (V)	-	-	155	37,2
I Secundária (A)	-	-	21,6	4,02
Fator de Potência	0,78	-	0,86	0,8 a 1,0
Fator de Serviço / Regime	1,25 / S1	1,15	S1	S1
Rendimento (%)	91	-	-	-
Relação I_p/I_N	7,3	-	-	21

Fonte: os autores.

A Figura 2.1 apresenta a bancada didática, as máquinas elétricas girantes e os equipamentos periféricos.

Figura 2.1 – Bancada didática, máquinas elétricas girantes e equipamentos periféricos

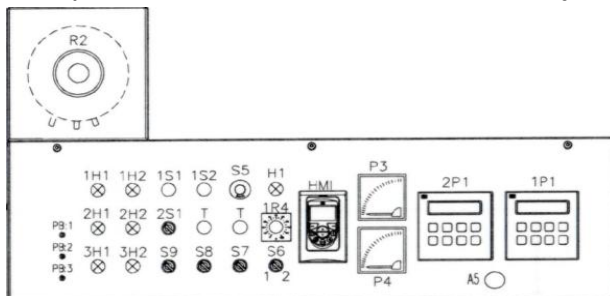


Fonte: os autores.

2.6. ENERGIZAÇÃO E OPERAÇÃO DA BANCADA

Para a execução dos procedimentos de energização e operação da bancada, o usuário deve utilizar a Figura 2.2 como referência, na qual são apresentados os dispositivos de chaveamento, acionamento, sinalização e medição.

Figura 2.2 – Dispositivos de chaveamento, acionamento, sinalização e medição



2.6.A. Energização da Bancada

Após a realização da inspeção da bancada, os procedimentos a seguir deverão ser executados, tomando como referência o diagrama unifilar da bancada, apresentado em anexo.

- 1) Verificar se o botão de emergência S5 está na posição “normalmente fechado”. Se não estiver, girar o botão no sentido horário para destravá-lo;
- 2) Ligar os disjuntores 1Q2 e 5Q2 para habilitar os multimedidores 1P1 e 2P1;
- 3) Ligar o disjuntor Q7 para alimentar a fonte de tensão do transdutor de torque;
- 4) Ligar os disjuntores Q4 e Q5 para energizar os circuitos auxiliares de comando e sinalização;
- 5) Ligar, na sequência, os disjuntores Q3 (para energizar o transformador de alimentação auxiliar — 380 V/220 V), Q2 e Q1 (disjuntor geral da bancada);
- 6) Verificar se o sinalizador H1 está aceso, indicando "MESA ENERGIZADA";
- 7) Após a utilização da bancada, o disjuntor Q1 deve ser desligado (OFF).

Observação: Os disjuntores estão localizados na parte inferior interna da bancada, devidamente identificados.

2.6.B. Acionamento do Motor Indução com Rotor Gaiola (MÁQUINA M1)

O motor M1 (motor de indução com rotor em gaiola) é utilizado como máquina primária nas situações em que a máquina síncrona (M3) opera como gerador. Após a conclusão dos procedimentos de energização da bancada, o motor M1 deve ser acionado por meio do inversor de frequência, conforme os procedimentos descritos a seguir:

- 1) Desligar o disjuntor Q6, como medida de segurança, para evitar o acionamento indevido da máquina síncrona (M3) como motor e do motor de indução com rotor bobinado (M2);
- 2) Ligar o disjuntor 1Q3 para energizar o motor de ventilação forçada (M1.1);
- 3) Ligar o disjuntor 1Q1 para energizar o inversor de frequência;
- 4) Parametrizar o inversor de frequência de acordo com a tabela de parâmetros apresentada em anexo;

- 5) Ajustar o potenciômetro 1R4 (controle de velocidade/torque) para a posição inicial de partida (girar totalmente no sentido anti-horário);
- 6) Pressionar o botão 1S1 para efetuar a partida do motor M1 e aumentar gradualmente a velocidade por meio do potenciômetro 1R4 (girar no sentido horário);
- 7) Monitorar a operação do motor M1 por meio da interface do inversor de frequência, observando os parâmetros indicados na Tabela 2.2;
- 8) O motor M1.1 (ventilação forçada) é acionado automaticamente pela saída digital do inversor de frequência;
- 9) Elevar a velocidade do motor M1 até 1.800 rpm, utilizando o potenciômetro 1R4 (girar no sentido horário). Se necessário, verificar o parâmetro P0134 (velocidade máxima) e ajustar para 1.800 rpm;
- 10) Para desenergizar o motor, ajustar o potenciômetro 1R4 para a posição inicial de partida (girar totalmente no sentido anti-horário) e pressionar o botão 1S2, que desenergiza o circuito alimentador do motor.

Tabela 2.2 – Principais parâmetros de leitura

Parâmetro	Descrição
P0002	velocidade do motor
P0003	corrente do motor
P0005	frequência do motor
P0009	torque no motor (calculado)
P0019	valor da entrada analógica AI2 (leitura pelo transdutor de torque)
	Considerar 1 % = 0,5 N.m (aproximadamente)

Fonte: os autores.

2.6.C. Acionamento do Motor Indução Rotor Bobinado (MÁQUINA M2)

Após a conclusão dos procedimentos de energização da bancada, o motor M2 (motor de indução com rotor bobinado) deve ser acionado por meio do variador de tensão de 15 kVA, conforme os procedimentos descritos a seguir:

- 1) Desligar os disjuntores 1Q1 e 5Q1, como medida de segurança, para evitar o acionamento da máquina síncrona (M3) como motor e do motor de indução com rotor em gaiola (M1);

- 2) Verificar se o cursor do variador de tensão está ajustado para tensão nula (girar totalmente no sentido anti-horário);
- 3) Ajustar o reostato de partida Denktherm para a posição inicial de máxima resistência elétrica (girar totalmente no sentido anti-horário);
- 4) Ligar os disjuntores Q6 e 2Q1;
- 5) Aumentar gradualmente a tensão de saída do variador de tensão até 380V, monitorando a tensão e a corrente do estator pelo multimedidor 1P1.
Observação: caso o motor esteja ligado em estrela (Y), a tensão nominal é 380 V; se estiver em triângulo (Δ), a tensão nominal é 220 V. A corrente rotórica deve ser monitorada com um amperímetro tipo alicate;
- 6) Ajustar a resistência rotórica, por meio do reostato Denktherm, para permitir o controle da velocidade do motor. O equipamento possui dez estágios de resistência, correspondendo a dez valores aproximados de velocidade, conforme indicado na Tabela 2.3;
- 7) Para desenergizar o motor, ajustar o cursor do variador de tensão para a posição de tensão nula (girar totalmente no sentido anti-horário) e retornar o reostato de partida Denktherm para sua posição inicial de máxima resistência elétrica (girar totalmente no sentido anti-horário).

Tabela 2.3 – Velocidade para o motor de indução com rotor bobinado

Estágio	Velocidade Aproximada (rpm)
0	1.410
1	1.480
2	1.510
3	1.580
4	1.630
5	1.670
6	1.700
7	1.715
8	1.730
9	1.740

Fonte: os autores.

Observação: O multimedidor 1P1, do fabricante Janitza, é alimentado diretamente pelo barramento de 380 V proveniente do reostato TGSC. Como

consequência, o *display* do dispositivo somente é ativado quando a tensão no barramento atinge aproximadamente 50 V (F–N).

2.6.D. Acionamento da Máquina Síncrona (MÁQUINA M2)

A máquina síncrona (M3) pode operar tanto como gerador síncrono quanto como motor síncrono, conforme descrito a seguir.

Acionamento como Gerador Síncrono

Nesse modo de operação, o gerador síncrono pode ser acionado por qualquer um dos dois motores de indução, devendo ser seguidos os procedimentos descritos na Seção 7.2 (acionamento do gerador síncrono por meio do motor de indução com rotor gaiola) ou na Seção 7.3 (acionamento do gerador síncrono por meio do motor de indução com rotor bobinado). Além disso, a chave S9 deve estar na posição DESACIONA e o disjuntor 5Q1 deve permanecer desligado.

Acionamento como Motor Síncrono

Nesse modo de operação, o motor síncrono deve ser acionado por meio do variador de tensão de 15 kVA, conforme os procedimentos descritos a seguir:

- 1) Desligar os disjuntores 1Q1 e 2Q1, por segurança, a fim de evitar o acionamento dos dois motores de indução;
- 2) Verificar se o cursor do variador de tensão está na posição de tensão nula (girar totalmente no sentido anti-horário);
- 3) Posicionar as chaves S8 e S9 na posição DESACIONA;
- 4) Ajustar o reostato de campo R2 para a posição zero (girar totalmente no sentido anti-horário). Dessa forma, a corrente de excitação do motor será nula, permitindo sua partida com o auxílio do enrolamento amortecedor;
- 5) Conectar a fonte de alimentação externa (220 V_{CC}) aos bornes 1 e 2 da régua 1X10, conforme a polaridade indicada no diagrama unifilar da bancada, em anexo;

- 6) Selecionar a polaridade desejada do campo magnético de excitação por meio da chave S6 (NORMAL ou INVERTIDO);
- 7) Posicionar a chave S7 na posição DESACIONA (resistência de partida);
- 8) Ligar os disjuntores 5Q1, 1Q1 (para energizar o inversor frequência) e Q6;
- 9) Aumentar gradativamente a tensão de saída do variador de tensão até 220 V (tensão de linha), monitorando a tensão de alimentação e a corrente de armadura por meio do multimetido 2P1;
- 10) As leituras de torque e velocidade do motor síncrono podem ser obtidas no display do inversor de frequência, conforme os parâmetros indicados na Tabela 2.4;
- 11) Posicionar as chaves S8 e S9 na posição ACIONA e ligar a fonte de tensão externa (220 V_{cc}) para permitir a energização do enrolamento de excitação e o alcance do sincronismo (velocidade de 1800 rpm). A partir desse ponto, os ajustes da corrente de excitação devem ser feitos por meio do reostato de campo R2 (girar no sentido horário e monitorar a corrente de excitação pelo amperímetro analógico P3);
- 12) Para desenergizar o motor, ajustar o cursor do variador de tensão para a posição de tensão nula (girar totalmente no sentido anti-horário), ajustar o reostato de campo R2 para a posição zero (girar totalmente no sentido anti-horário), desligar a fonte de tensão externa (220 V_{cc}) e posicionar as chaves S8 e S9 na posição DESACIONA.

Tabela 2.4 – Parâmetros do inversor de frequência.

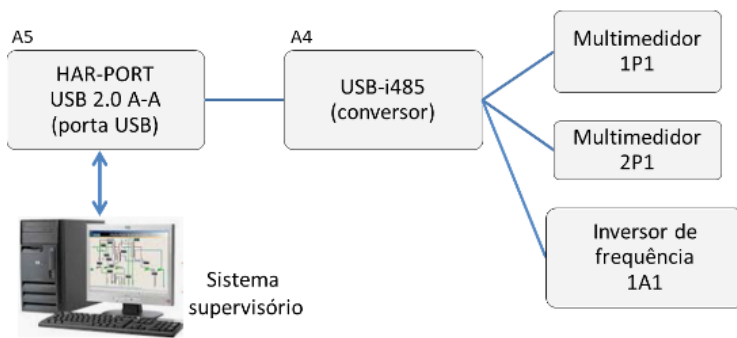
Parâmetro	Descrição
P0038	velocidade do encoder (rpm)
P0019	valor de entrada analógica AI2 (leitura de torque pelo transdutor) – considerar 1% = 0,5 N.m (aproximadamente)

Fonte: os autores.

2.7. COMUNICAÇÃO MODBUS

A bancada está equipada com uma rede de comunicação Modbus, no padrão RS-485, que interliga os multimedidores 1P1 e 2P1, possibilitando também a integração do inversor de frequência à mesma rede. Essa configuração permite a leitura dos dados dos multimedidores por meio de uma porta USB localizada na parte frontal da bancada (A5), utilizando um computador para acesso e monitoramento. Na Figura 2.3, apresenta-se a topologia da rede Modbus.

Figura 2.3 – Topologia da Rede Modbus (RS-485).



Fonte: os autores.

3. ENSAIOS COM A MÁQUINA SÍNCRONA

Antes de iniciar os ensaios, é fundamental seguir todos os procedimentos de energização e operação da bancada didática, garantindo a máxima segurança na sua utilização e respeitando os limites operacionais das máquinas girantes. Tais procedimentos são descritos no capítulo anterior. As características nominais da máquina síncrona foram apresentadas na Tabela 2.1, no Capítulo 2, sendo reproduzidas a seguir:

- número de fases: 3
- potência: 5 kVA (7 cv)
- tensão da armadura (de linha): 220 V
- tipo de ligação dos enrolamentos de armadura: Y (estrela)
- corrente da armadura (de linha): 13,12 A
- tensão de excitação: 37,2 V
- corrente de excitação: 4,02 A
- velocidade: 1.800 rpm
- frequência: 60 Hz
- fator de serviço/regime: S1 (regime contínuo de operação, por tempo indefinido e carga nominal)
- classe de isolamento: H

A seguir, são descritos os procedimentos a serem adotados para a realização de ensaios com a máquina síncrona. Apresentam-se os ensaios comumente realizados nas unidades curriculares de Máquinas Elétricas, do curso técnico de Eletrotécnica e de Conversão Eletromecânica de Energia, do curso de bacharelado em Engenharia Elétrica, oferecidos pelo Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

O principal objetivo de tais ensaios é permitir que se verifique, por meio de atividades práticas, as características operativas da máquina síncrona, inicialmente apresentadas de forma teórica. Para isso, os procedimentos apresentados correspondem à adaptações na NBR 5052/1984.

3.1. ENSAIO DE MEDIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS DA ARMADURA

De acordo com a NBR 5052/1984, esse ensaio apresenta três objetivos:

- obter as perdas por efeito Joule nos enrolamentos;
- obter a componente ativa das quedas de tensão internas nos enrolamentos de armadura;
- obter a temperatura dos enrolamentos.

Sugere-se a medição das resistências elétricas nas três fases, sob temperatura ambiente, tomando o ponto neutro como referência. Os valores medidos devem ser registrados na Tabela 3.1, juntamente com o valor médio calculado conforme a Equação 3.1. Uma vez calculado o valor médio da resistência elétrica da armadura, pode-se determinar o valor correspondente a qualquer outro valor de temperatura, diferente da temperatura ambiente, por meio da Equação 3.2. Esse novo valor poderá ser utilizado para compor o circuito equivalente da máquina síncrona. Esse procedimento tem por objetivo considerar que, durante a operação, a temperatura dos enrolamentos pode atingir valores significativamente superior à temperatura ambiente, o que influencia diretamente o valor da resistência elétrica. A classe de isolamento é o parâmetro que determina a capacidade do isolamento de suportar calor, ou seja, define a temperatura máxima que os enrolamentos podem atingir.

A máquina síncrona da bancada didática possui classe de isolamento H, para a qual os enrolamentos podem atingir uma temperatura máxima de 180 °C, em regime contínuo. Esse valor poderá ser utilizado como referência para o cálculo do novo valor da resistência elétrica.

$$R_{m\u00e9dio} = \frac{R_R + R_S + R_T}{3} \quad (3.1)$$

$$R_{ref} = R_{m\u00e9dio} \cdot \left(\frac{K + T_{ref}}{K + T_{amb}} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

R_R, R_S, R_T = resistências elétricas da armadura, medidas na três fases sob temperatura ambiente (Ω);

R_m = valor médio da resistência da armadura sob temperatura ambiente (Ω);

R_{ref} = valor da resistência da armadura na temperatura de referência (Ω);

T_{ref} = temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$);

T_{amb} = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

$K = 235$ (para condutores de cobre) ou $K = 228$ (para condutores de alumínio).

Observação: Considera-se que um condutor de cobre ao ser submetido a uma temperatura de -235°C , tem sua resistência elétrica diminuída a zero, de forma semelhante, para um condutor de alumínio, isso ocorre para uma temperatura de -228°C . Considera-se ainda que, para ambos os condutores, a resistência elétrica aumenta linearmente com o aumento da temperatura, o que dá origem à Equação 3.2.

Tabela 3.1 – Valores medidos, médio e corrigido da resistência elétrica de armadura

Grandeza	Valor da Resistência Elétrica (Ω)
R_R	
R_S	
R_T	
R_m	
R_{ref}	

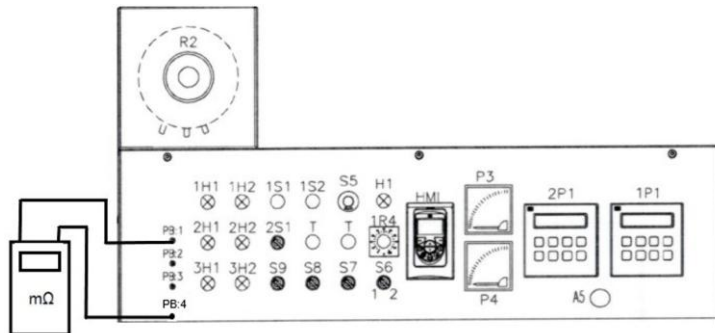
Fonte: os autores.

Para a realização do ensaio, sugere-se os métodos apresentados a seguir. Destaca-se que nas Figuras 3.1 e 3.2, o terminal PB:1 representa a fase R e o terminal PB:4 representa o ponto neutro da ligação estrela da armadura.

a) Medição utilizando um miliohmímetro

Consiste na conexão direta do equipamento de medição junto aos terminais da armadura, conforme ilustra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Esquema de ligação utilizando um miliohmímetro.

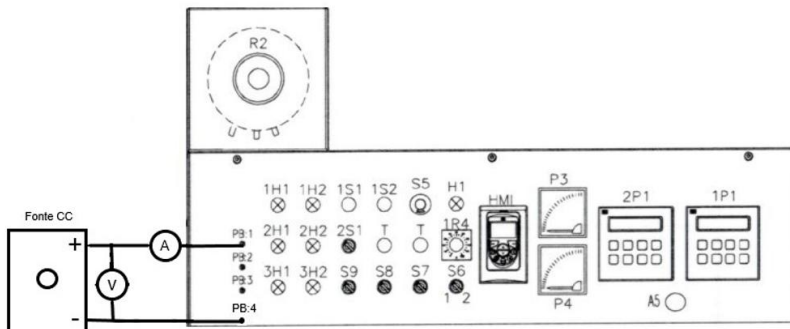


Fonte: os autores.

b) Medição utilizando o método do Volt-Ampère

O método do Volt-Ampère consiste na aplicação de uma tensão contínua conhecida aos terminais de cada enrolamento, e na medição da corrente resultante (ver Figura 3.2). A resistência é então determinada pela relação direta entre a tensão e corrente, conforme a lei de Ohm. Para evitar o aquecimento do enrolamento recomenda-se que a corrente não ultrapasse 10 % da corrente nominal dele.

Figura 3.2 – Esquema de ligação utilizando o método do Volt-Ampère.



Fonte: os autores.

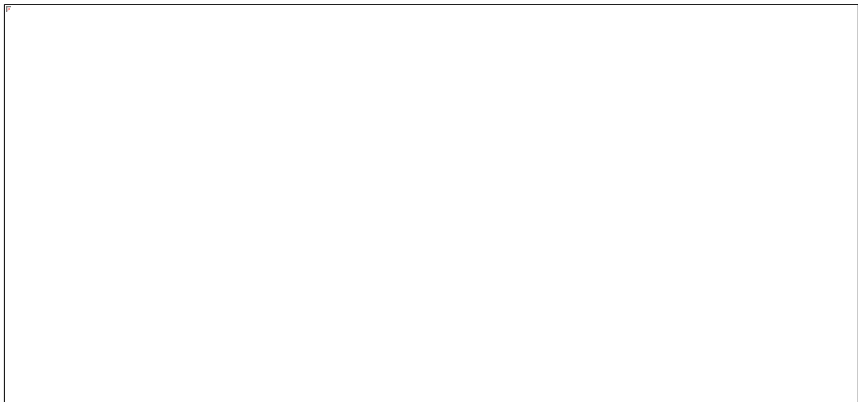
3.2. ENSAIO A VAZIO

De acordo com a NBR 5052/1984, o ensaio a vazio tem como objetivo determinar a característica a vazio do alternador, também conhecida como curva de magnetização, representando os valores eficazes das forças eletromotrizes induzidas nos enrolamentos de armadura (E_f), em função de diferentes valores de corrente de excitação (I_f).

Utilizando um motor de indução com rotor em gaiola como máquina primária (controlado por um inversor de frequência), o alternador deve ser acionado em sua velocidade nominal e operado a vazio, ou seja, com os terminais PB:1, PB:2 e PB:3 abertos, conforme ilustrado na Figura 3.3.

A norma sugere que o ensaio seja realizado iniciando-se com a corrente de excitação correspondente a 1,3 vezes a tensão nominal (286 V), reduzindo-se até um valor equivalente a 0,2 vezes a tensão nominal (44 V), sendo importante observar que a tensão decorrente do magnetismo residual pode ser superior a esse valor mínimo. Para isso, aplica-se uma tensão contínua fixa de 220 V ao circuito de alimentação do enrolamento de excitação, e a corrente de excitação deve ser ajustada por meio do reostato de campo, conforme Figura 3.3.

Figura 3.3 – Reostato de campo e instrumentos de medição para o ensaio a vazio



Fonte: os autores.

Seguindo tal procedimento, é possível preencher a Tabela 3.2 com os valores de corrente de excitação e força eletromotriz induzida, obtidos por meio do amperímetro analógico (leitura da corrente de excitação) e do multimedidor digital (leitura da força eletromotriz), presentes na bancada didática, também mostrados na Figura 3.3. Os valores máximo e mínimo de força eletromotriz induzida, apresentados na Tabela 3.2, servem apenas como referência, com base no que é sugerido pela norma. Com os valores da tabela, pode-se traçar a característica a vazio do alternador ($E_f = f(I_f)$).

Tabela 3.2 – Valores de corrente de excitação e de força eletromotriz induzida

Corrente de Excitação – I_f (A)	Força Eletromotriz Induzida – E_f (V)
	286
	44

Fonte: os autores.

3.3. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

O ensaio de curto-circuito tem por objetivo determinar a característica de curto-circuito do alternador, representando os valores da corrente de armadura (I_a) que circula pelos enrolamentos curto-circuitados, para diferentes valores de corrente de excitação (I_f).

Com o alternador acionado pelo motor de indução com rotor gaiola de esquilo e com os terminais PB:1, PB:2 e PB:3 em curto-circuito, conforme Figura 3.4, deve-se manter a velocidade da máquina primária constante. Nessa condição, mede-se o valor da corrente de armadura (utilizando o multimedidor digital) para cada valor de corrente de excitação (lido no amperímetro analógico), podendo-se utilizar como referência os mesmos valores de corrente de excitação adotados no ensaio a vazio. A corrente de excitação deve ser ajustada por meio do reostato de campo da bancada, conforme indicado na Figura 3.4. Recomenda-se que a corrente de excitação seja aplicada apenas após o fechamento do curto-circuito.

Figura 3.4 – Reostato de campo e instrumentos para o ensaio de curto-circuito

Fonte: os autores.

Com esse procedimento, é possível preencher a Tabela 3.3 com os valores de corrente de excitação e corrente de armadura, obtidos por meio do amperímetro analógico (leitura da corrente de excitação) e do multimedidor digital (leitura da corrente de armadura). Com os valores da tabela, pode-se traçar a característica de curto-circuito do alternador ($I_a = f(I_f)$).

Tabela 3.3 – Valores medidos de corrente de excitação e de corrente de armadura

Corrente de Excitação - I_f (A)	Corrente de Armadura - I_a (A)

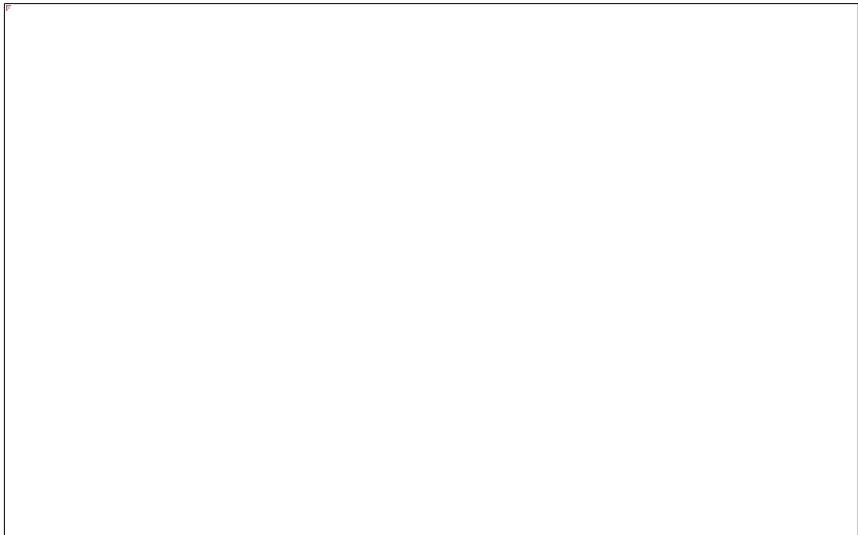
Fonte: os autores.

3.4. DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA E DA REATÂNCIA SÍNCRONAS

Após a realização dos ensaios a vazio e de curto-circuito, é possível obter os valores da impedância síncrona e da reatância síncrona do alternador, que, juntamente com a resistência elétrica de armadura, obtida por meio do ensaio apresentado na seção 2.2, compõem o circuito equivalente do alternador.

Para atingir esse objetivo, a seguir é apresentado um procedimento baseado na NBR 5052/1984. Como exemplo, na Figura 3.5 ilustra-se a obtenção da impedância síncrona e da reatância síncrona para um valor de corrente de excitação correspondente à corrente nominal de armadura. No eixo das abscissas da característica de curto-circuito, deve-se assinalar a corrente de excitação correspondente à corrente nominal de armadura (I_n). Para esse mesmo valor de corrente de excitação, assinala-se, na característica a vazio, o valor correspondente da força eletromotriz induzida (E_{fn}), lembrando que, para a obtenção da impedância síncrona, deve-se utilizar o valor de fase (os enrolamentos de armadura do alternador estão ligados em estrela).

Figura 3.5 – Procedimento para obtenção da impedância síncrona



Fonte: os autores.

O valor do módulo da impedância síncrona é obtido pela relação apresentada na Equação 3.3, quando a resistência elétrica da armadura não é desprezada, e o valor da reatância síncrona, por meio da Equação 3.4.

$$Z_s = \frac{E_{fn}}{I_n} \quad (3.3)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} \quad (3.4)$$

Onde:

Z_s = impedância síncrona do alternador (Ω);

E_{fn} = valor de fase da força eletromotriz induzida (V);

I_n = valor nominal da corrente de armadura (A);

X_s = reatância síncrona do alternador (Ω);

R_a = resistência elétrica de armadura (Ω).

Quando a resistência elétrica de armadura é desprezada, obtém-se diretamente o valor da reatância síncrona por meio da Equação 3.5.

$$X_s = \frac{E_{fn}}{I_n} \quad (3.5)$$

Por fim, é possível preencher a Tabela 3.4 com os valores da resistência elétrica da armadura (quando considerada), da impedância síncrona e da reatância síncrona, correspondentes aos valores de corrente de excitação utilizados nos ensaios a vazio e de curto-circuito, seguindo o procedimento ilustrado na Figura 3.5 e utilizando as Equações 3.3, 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Valores de resistência de armadura, impedância e reatância síncronas

Corrente de Excitação - I_f (A)	Resistência da Armadura - R_a (Ω)	Impedância Síncrona - Z_s (Ω)	Reatância Síncrona - X_s (Ω)

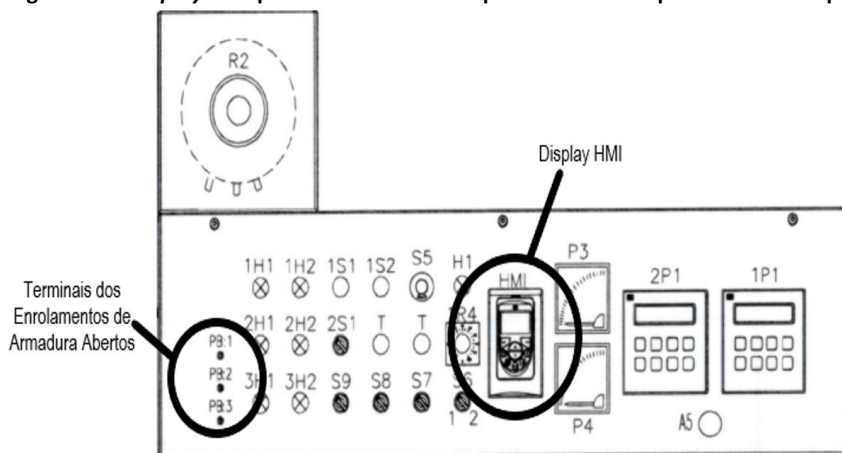
Fonte: os autores.

3.5. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS ROTACIONAIS

Propõe-se um procedimento para estimar as perdas rotacionais do alternador (perdas mecânicas e perdas no ferro), com base no método de "Ensaio com Máquina Calibrada", conforme apresentado na NBR 5052/1984. Para a realização do procedimento, o alternador deve ser acionado em vazio, à velocidade nominal, por meio do motor de indução com rotor gaiola de esquilo. A velocidade de acionamento é controlada por meio do inversor de frequência.

A estimativa das perdas rotacionais do alternador é obtida a partir da medição do torque gerado pelo motor de indução (máquina primária), seguida do cálculo da potência mecânica transmitida ao eixo. Inicialmente, a corrente de excitação do alternador é mantida nula e, posteriormente, ajustada até que a tensão nominal seja obtida nos terminais de saída da máquina. A medição do torque do motor de indução é realizada por meio de um transdutor acoplado ao eixo. O sinal analógico proveniente do transdutor é exibido em percentual diretamente no *display* HMI do inversor de frequência (ver Figura 3.6), por meio do parâmetro P0019, referente à entrada analógica AI2. O valor do torque, em N.m, é obtido consultando-se a Tabela 3.5.

Figura 3.6 – *Display* HMI para a leitura do valor percentual correspondente ao torque



Fonte: os autores.

Tabela 3.5 – Determinação do torque produzido pelo motor com rotor gaiola

Parâmetro P0019 (%)	Torque* (N.m)	Parâmetro P0019 (%)	Torque* (N.m)	Parâmetro P0019 (%)	Torque* (N.m)
0,0	0,0	24,0	12,0	48,0	24,0
2,0	1,0	26,0	13,0	50,0	25,0
4,0	2,0	28,0	14,0	52,0	26,0
6,0	3,0	30,0	15,0	54,0	27,0
8,0	4,0	32,0	16,0	56,0	28,0
10,0	5,0	34,0	17,0	58,0	29,0
12,0	6,0	36,0	18,0	60,0	30,0
14,0	7,0	38,0	19,0	62,0	31,0
16,0	8,0	40,0	20,0	64,0	32,0
18,0	9,0	42,0	21,0	66,0	33,0
20,0	10,0	44,0	22,0	68,0	34,0
22,0	11,0	46,0	23,0	70,0	35,0

*Considerar que 1% = 0,5 N.m (aproximadamente).

Fonte: os autores.

Para a realização desse ensaio, deve-se, inicialmente, energizar o inversor de frequência, mantendo a velocidade e a corrente de excitação do alternador nulas, e realizar a leitura do parâmetro P0019. Consultando a Tabela 3.5, obtém-se o valor do torque residual, em N.m, que não está diretamente relacionado à operação do motor de indução. Em seguida, o alternador deve ser acionado à velocidade nominal, controlada pelo inversor de frequência, com a corrente de excitação ainda nula. Realiza-se nova medição do parâmetro P0019, que, convertido para N.m por meio da Tabela 3.5, corresponde ao torque bruto produzido pelo motor de indução. A partir desse valor, o torque líquido pode ser calculado utilizando a Equação 3.6.

$$T_{liq_0} = T_{bru_0} - T_{res} \quad (3.6)$$

Onde:

T_{liq_0} = torque líquido produzido pelo motor de indução com corrente de excitação nula no alternador (N.m);

T_{bru_0} = torque bruto produzido pelo motor de indução com corrente de excitação nula no alternador (N.m);

T_{res} = torque residual (N.m).

A potência mecânica líquida produzida pelo motor de indução, sob a condição de operação com corrente de excitação nula, deve ser calculada por meio da Equação 3.7. Considera-se que esse valor de potência mecânica corresponde, por aproximação, ao somatório das perdas mecânicas totais, englobando as perdas do motor de indução com rotor gaiola, do alternador e do motor de indução com rotor bobinado (os eixos das três máquinas estão acoplados).

$$P_{m_0} = P_{mec_T} = T_{liq_0} \times \omega_S = T_{liq_0} \times \frac{2\pi \times n_S}{60} \quad (3.7)$$

Onde:

P_{m_0} = potência mecânica líquida produzida pelo motor de indução com corrente de excitação nula (W);

P_{mec_T} = perdas mecânicas totais (W);

ω_S = velocidade de rotação (rad/s);

n_S = velocidade de rotação (rpm).

Dessa forma, pode-se considerar que as perdas mecânicas do alternador correspondem a um terço das perdas mecânicas totais, conforme Equação 3.8.

$$P_{mec_A} = \frac{P_{mec_T}}{3} \quad (3.8)$$

P_{mec_A} = perdas mecânicas do alternador (W).

Deve-se repetir o procedimento anterior, ajustando a corrente de excitação do alternador para um valor correspondente à tensão nominal de armadura (220 V). Dessa forma, obtêm-se os valores de torque e potência mecânica por meio das Equações 3.9 e 3.10. A potência mecânica assim calculada corresponde à soma das perdas mecânicas e ferromagnéticas.

$$T_{liq_1} = T_{bru_1} - T_{res} \quad (3.9)$$

Onde:

T_{liq_1} = torque líquido produzido pelo motor de indução com corrente de excitação correspondente à tensão nominal do alternador (N.m);

T_{bru1} = torque bruto produzido pelo motor de indução com corrente de excitação correspondente à tensão nominal do alternador (N.m).

$$P_{m1} = P_{mecT} + P_{feA} = T_{liq1} \times \omega_s = T_{liq1} \times \frac{2\pi \times n_s}{60} \quad (3.10)$$

Onde:

P_{m1} = potência mecânica líquida produzida pelo motor de indução com corrente de excitação correspondente à tensão nominal do alternador (W);

P_{feA} = perdas ferromagnéticas do alternador (W).

Por fim, as perdas ferromagnéticas do alternador podem ser obtidas pela Equação 3.11.

$$P_{feA} = P_{m1} - P_{m0} \quad (3.11)$$

Para uma melhor orientação, todos os valores medidos e calculados podem ser registrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Grandezas medidas e calculadas no ensaio de perdas rotacionais

T_{res} (N.m)	N_s (rpm)	T_{bru0} (N.m)	T_{liq0} (N.m)	P_{m0} (W)	T_{bru1} (N.m)	T_{liq1} (N.m)	P_{m1} (W)	P_{mecA} (W)	P_{feA} (W)

Fonte: os autores.

3.6. ENSAIO DE CARACTERÍSTICA EXTERNA

Este ensaio tem como objetivo analisar a variação do valor eficaz das tensões nos terminais de saída do alternador em função da carga aplicada. Mais especificamente, busca-se observar a influência da carga sobre o nível de magnetização do alternador, considerando o efeito desmagnetizante das cargas indutivas e o efeito magnetizante das cargas capacitivas, e, conseqüentemente, seu impacto no valor eficaz das tensões nos terminais da máquina.

Para a realização desse ensaio, deve-se implementar o esquema de ligação apresentado na Figura 3.7, acionando inicialmente o alternador em vazio por

Tabela 3.7 – Grandezas medidas no ensaio de característica externa - carga RL

Corrente de Armadura (A)	Tensão de Saída (V)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAr)	Fator de Potência

Fonte: os autores.

Tabela 3.8 – Grandezas medidas no ensaio de característica externa - carga RC

Corrente de Armadura (A)	Tensão de Saída (V)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAr)	Fator de Potência

Fonte: os autores.

É importante observar que a tensão nominal do alternador é de 220 V (tensão de linha) e que essa informação deve ser considerada ao determinar a forma de conexão da carga trifásica (estrela ou triângulo).

3.7. ENSAIO DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

Este ensaio complementa o ensaio de característica externa, tendo como objetivo determinar os valores da corrente de excitação necessários para manter a tensão nominal nos terminais dos enrolamentos de armadura. Ou seja, os efeitos desmagnetizantes das cargas indutivas e magnetizante das cargas capacitivas devem ser compensados por meio de ajustes na corrente de excitação do alternador. Utiliza-se o mesmo esquema de ligação apresentado na Figura 3.7, acionando inicialmente o alternador em vazio e realizando os ajustes iniciais da corrente de excitação (por meio do reostato de campo) e da velocidade de acionamento, de modo a obter os valores nominais de tensão e frequência nos terminais dos enrolamentos de armadura. Após cada acréscimo de carga, procede-se o ajuste da velocidade de acionamento para reestabelecer a frequência nominal, bem como o ajuste da corrente de excitação (via reostato

de campo) e a medição dela (por meio do amperímetro analógico da bancada) para restabelecer a tensão nominal de saída. Os valores medidos e calculados para as cargas RL e RC devem ser registrados nas Tabelas 3.9 e 3.10, destacando-se os registros da corrente de excitação, da força eletromotriz induzida, obtida por meio da Equação 3.12 (equação de malha do circuito equivalente), e da regulação percentual de tensão, calculada pela Equação 3.13.

$$\dot{E}_f = \dot{V}_a + (R_a + jX_s) \dot{I}_a \quad (3.12)$$

$$R_{\%} = \frac{(E_f - V_a)}{V_a} \times 100 \quad (3.13)$$

Onde:

E_f = valor eficaz da força eletromotriz nos enrolamentos de armadura (V);

V_A = valor eficaz (de fase) da tensão nos terminais de saída da armadura (V);

I_A = valor eficaz (de fase) da corrente de armadura (A);

R_A = resistência elétrica dos enrolamentos de armadura (Ω);

X_s = reatância síncrona do alternador (Ω);

$R_{\%}$ = regulação percentual de tensão (%).

Observação: A Equação 3.12 é fasorial, devendo-se adotar a tensão de saída na armadura (V_a) como fasor de referência (ângulo igual a 0°) e o ângulo da corrente de armadura (I_a) corresponde ao ângulo do fator de potência, medido e registrado nas Tabelas 3.9 e 3.10, para cada acréscimo de carga, além disso, o valor eficaz da f.e.m. pode ser obtido também pela característica a vazio.

Tabela 3.9 – Grandezas medidas e calculadas no ensaio de regulação - carga RL

Corrente de Armadura (A)	Corrente de Excitação (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAR)	Fator de Potência	F.E.M. Induzida (V)	Regulação de Tensão (%)

Fonte: os autores.

Tabela 3.10 – Grandezas medidas e calculadas no ensaio de regulação - carga RC

Corrente de Armadura (A)	Corrente de Excitação (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAr)	Fator de Potência	F.E.M. Induzida (V)	Regulação de Tensão (%)

Fonte: os autores.

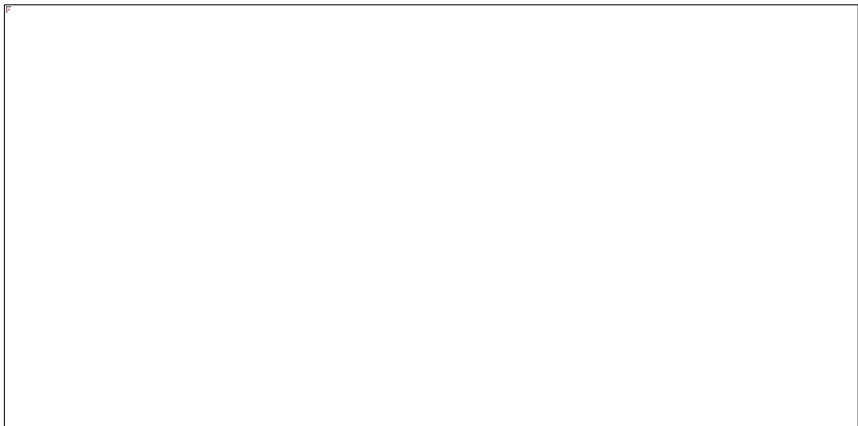
3.8. ENSAIO DE CURVA EM V DO MOTOR SÍNCRONO

Diferentemente dos ensaios anteriores, neste ensaio, a máquina síncrona deve operar como motor elétrico. De acordo com a NBR 5052/1984, este ensaio tem por objetivo observar as variações na corrente de armadura (curva em V) e no fator de potência do motor síncrono em função das variações na corrente de excitação, mantendo-se constante a carga mecânica acoplada ao eixo do motor.

Para a realização do ensaio, o motor síncrono deve ser acionado por meio do variador de tensão de 15 kVA (ver esquema de ligação da Figura 3.8), operando com tensão e frequência nominais. A corrente de excitação deve ser ajustada de modo a obter o valor correspondente à corrente mínima de armadura, o que caracteriza o funcionamento do motor com fator de potência unitário. Caso o ensaio seja realizado com o motor a vazio, esse valor inicial da corrente de excitação corresponde àquele que estabelece a tensão nominal de armadura no ensaio a vazio do alternador. Se, por outro lado, o ensaio for conduzido com carga mecânica acoplada ao eixo (observando-se que a máquina síncrona está conectada aos dois motores de indução), o valor inicial da corrente de excitação deve ser determinado com base no fator de potência do motor síncrono, medido por meio do multimedidor digital. Em seguida, deve-se aumentar gradativamente a corrente de excitação, colocando o motor em condição de sobre-excitação, registrando-se os valores medidos na Tabela 3.11. Devem ser observadas, além da corrente de excitação (lida no amperímetro analógico da bancada) e da corrente de armadura (medida com o multimedidor digital), as medições do fator de potência e da potência ativa absorvida pelo motor, ambas obtidas por meio do multimedidor digital.

Ressalta-se que, na condição de fator de potência unitário, a potência ativa absorvida pelo motor síncrono é mínima (as perdas por efeito joule são mínimas nos enrolamentos de armadura). A norma recomenda o aumento da corrente de excitação até que a corrente de armadura atinja um valor 50% superior à corrente nominal, desde que não seja ultrapassado o limite máximo de excitação permitido. Posteriormente, deve-se reduzir a corrente de excitação, colocando o motor em condição de subexcitação, repetindo-se as mesmas medições, com o objetivo de complementar o preenchimento da Tabela 3.11. Por fim, devem ser construídos os gráficos de variação da corrente de armadura (curva em V) e do fator de potência, em função da corrente de excitação.

Figura 3.8 – Reostato de campo, instrumentos de medição e variador de tensão para o ensaio da curva em V do motor síncrono.



Fonte: os autores.

Tabela 3.11 – Grandezas medidas no ensaio de curva em V

Corrente de Excitação (A)	Corrente de Armadura (A)	Potência Ativa Absorvida (W)	Fator de Potência	
				Subexcitação
			1,0	Excitação Normal
				Sobre-excitação

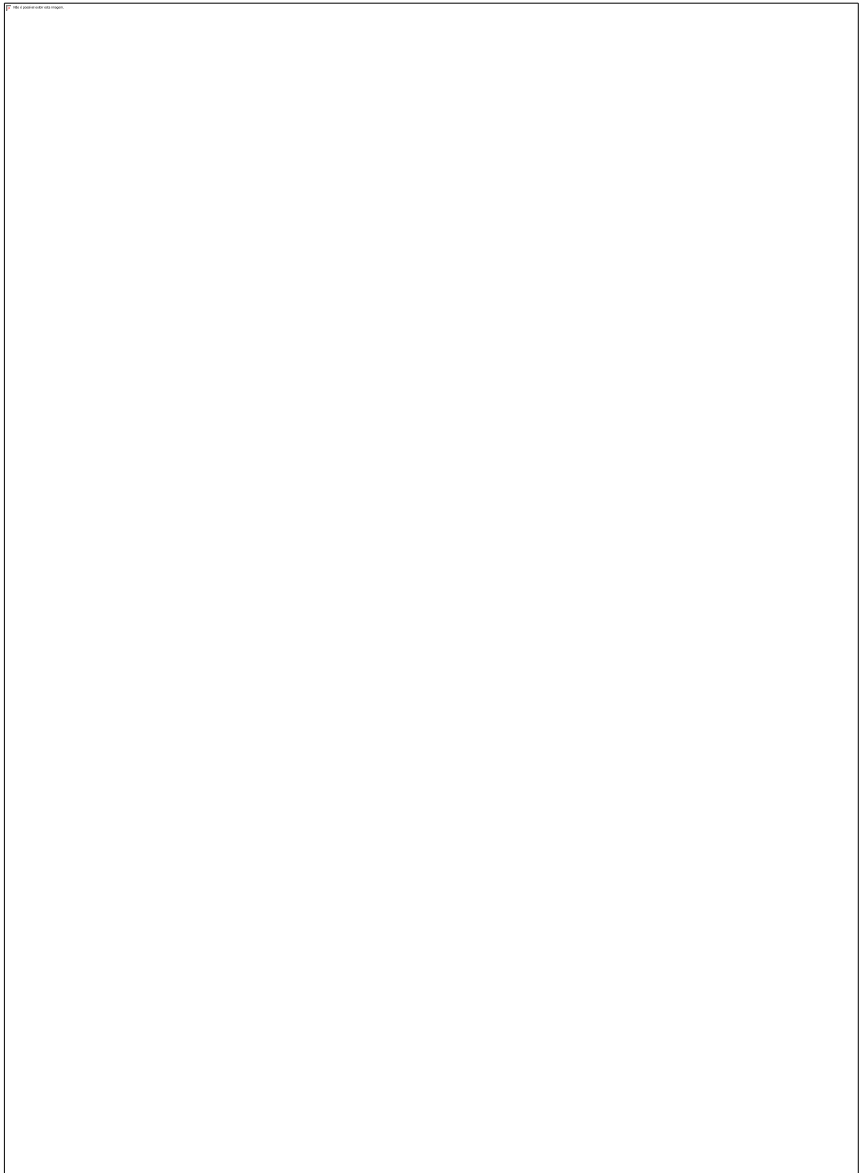
Fonte: os autores.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5052:1984: Máquinas elétricas rotativas - Ensaios elétricos. Jan. 1984. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/458012554/ABNT-NBR-5052-1984-pdf>. Acesso em 20 set. 2025.
- CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas, Porto Alegre: AMGH, 2013.
- DE AZEVEDO, Thiago Paula Silva. Bancada experimental para ensaios em geradores elétricos utilizados em aerogeradores de pequeno porte. 83 f. Dissertação de Pós-Graduação (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2012.
- DEL TORO, V. Fundamentos de Máquinas Elétricas, Rio de Janeiro, Prentice Hall: LTC, 1994.
- ELY, Felipe Nalin. Análise do sistema de medição trifásica dos ensaios de máquinas rotativas elétricas do labmaq tendo como objetivo a quantificação das incertezas de medição. 88f. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) - UFSC, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/187828>. Acesso em: 17 maio 2025.
- FABIÁN, Gabriel Gonçalves. Desenvolvimento de bancada didática voltada ao estudo de sistemas pneumáticos. 77f. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – UFCE, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54974>. Acesso em 15 maio 2025.
- FILIPPO FILHO, Guilherme. Motor de Indução. São Paulo: SRV Editora LTDA, 2013. E-book. ISBN 9788536519999.
- FORTIER, Paul J., MICHEL, Howard E. Computer Systems Performance Evaluation and Prediction. Elsevier, fev. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/testbed>. Acesso em: 16 maio 2024.
- KOSOW, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores, Porto Alegre: Globo, 2000.
- MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023. E-book. p.245. ISBN 9788521638643. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638643/>. Acesso em 03 mar. 2025.
- MOHAN, Ned. Máquinas Elétricas e Acionamentos - Curso Introductório. Barueri: GEN (Grupo Editorial Nacional), 2015. E-book. ISBN 978-85-216-2835-4.
- OLIVEIRA, Iberê Carneiro de; OBADOWSKI, Vinícius N.; JÚNIOR, Ary P. B S.; et al. Geração de Energia Elétrica. Porto Alegre: Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786556902531.
- TOMINAGA, Rafael Noboro. Identificação do tipo e da severidade do desbalanceamento de rotores por meio da análise da assinatura de corrente com algoritmos de aprendizado de máquina multiclases. 109f. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Santa Catarina, 2021.
- UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

ANEXO

Diagrama Unifilar da Bancada
Tabela para Parametrizar o Inversor de Frequência





**INSTITUTO
FEDERAL**

Santa Catarina

Câmpus
Florianópolis