

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
COORDENAÇÃO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ENSAIO DE MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA UTILIZANDO O
EQUIPAMENTO**

Baker AWA-IV(Megger)

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DIONE NEVES DE SOUZA
WIDMARK PEREIRA DE MORAIS**

Prof.^a Dra. ALANA DA SILVA MAGALHÃES - Orientadora

GOIÂNIA

2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: DIONE NEVES DE SOUZA

Matrícula: 20161011060465

Título do Trabalho: ENSAIO DE MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA UTILIZANDO O EQUIPAMENTO Baker AWA-IV(Megger)

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
 (X) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 (X) Outra justificativa: Pode vir a ser uma Publicação de artigo científico.

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 30/12/2022.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☒ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, _30_/_12_/2022_.

Widmark Pereira de morais

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

DIONE NEVES DE SOUZA
WIDMARK PEREIRA DE MORAIS

ENSAIO DE MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA UTILIZANDO O
EQUIPAMENTO
Baker AWA-IV(Megger)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, da Coordenação de Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia.

Orientadora: Prof.^a Dra. Alana da Silva Magalhães

GOIÂNIA
2022

So895e Souza, Dione Neves de.
Ensaio de máquina de indução trifásica utilizando o equipamento *Baker AWA-IV(Megger)* /
Dione Neves de Souza, Widmark Pereira de Moraes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.
107 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Alana da Silva Magalhães.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica,
Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Máquinas elétricas. 2. Motores elétricos. 3. Motores de indução. I. Moraes, Widmark
Pereira de. II. Magalhães, Alana da Silva (orientadora). III. Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 621.31042



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

DIONE NEVES DE SOUZA
WIDMARK PEREIRA DE MORAIS

ENSAIO DE MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS UTILIZANDO O EQUIPAMENTO

BAKER AWA-IV (Megger)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 20 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Drª. Alana da Silva Magalhães
Orientador - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Dr. Arquimedes Lopes da Silva
Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Dr. Renato Jayme Dias
Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- Renato Jayme Dias, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/02/2023 14:21:28.
- Arquimedes Lopes da Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/02/2023 11:01:58.
- Alana da Silva Magalhaes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/02/2023 10:10:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/01/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 362178
Código de Autenticação: dbcc7243ec



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, Dione N.; MORAIS, Widmark P. Ensaio de Máquina de Indução Trifásica Utilizando o Equipamento *Baker AWA-IV (Megger)*. 2022. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Goiânia. Goiás. 2022.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES:

Dione Neves de Souza
Widmark Pereira de Moraes

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO: Ensaio de Máquina de Indução Trifásica Utilizando o Equipamento *Baker AWA-IV (Megger)*.

GRAU / ANO: Bacharelado em Engenharia Elétrica / 2023

É concedida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Dione Neves de Souza

Widmark Pereira de Moraes

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho de conclusão de curso a todos os nossos familiares, professores e amigos por todo o incentivo e força para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, por ter-nos dado força durante essa trajetória.

Aos nossos familiares pelo apoio e paciência.

À nossa orientadora Prof. Dr. Alana da Silva Magalhães por todo o carinho, dedicação e pela excepcional atenção nos dada durante a elaboração deste trabalho.

A todos os professores, pela dedicação em ensinar.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a escrita do trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás pela oportunidade de realização deste curso.

RESUMO

Este trabalho levanta discussões relacionadas ao equipamento *Baker AWA-IV (Megger)*, para a detecção preditiva de falhas em máquinas elétricas rotativas de indução trifásicas (Motores Elétricos). Tendo como principal objetivo antecipar o diagnóstico de ocorrência de falhas, de forma a prevenir assim falhas por meio do monitoramento dos parâmetros de grandezas elétricas. Com o uso do *Baker AWA-IV* são realizados dois ensaios seguindo as seguintes etapas: i) definir e preparar o MIT para os ensaios, ii) preparar o *Baker AWA-IV*, iii) conectar o *Baker AWA-IV* no MIT, iv) realizar os ensaios e testes e, por fim, v) verificar se o MIT está aprovado ou reprovado. Como resultado se observa que em um dos ensaios o motor, soprador de ar comprimido, foi aprovado e, com isso, possibilitou a indicação de possíveis manutenções preditivas. Já um segundo ensaio, que teve seu resultado reprovado, foi detectado a falha e encaminhado para a manutenção. E, com os dados obtidos e com a realização das comparações dos ensaios realizados, em dois períodos distintos, se obteve conhecimento importante para interpretar os dados e diagnosticar de forma preditiva as condições do MIT.

Palavras-chave: Motores Elétricos; Motores de Indução Trifásicos; *Baker AWA-IV*; Ensaio; Prevenção de Falhas.

ABSTRACT

This work raises discussions related to the Baker AWA-IV equipment (Megger), for the predictive detection of faults in three-phase induction rotating electrical machines (Electric Motors). With the main objective of anticipating the diagnosis of the occurrence of failures, in order to prevent failures by monitoring the parameters of electrical quantities. Using the Baker AWA-IV, two tests are carried out following the steps below: i) define and prepare the MIT for the tests, ii) prepare the Baker AWA-IV, iii) connect the Baker AWA-IV to the MIT, iv) carry out the trials and tests and, finally, v) verify whether the MIT is approved or failed. As a result, it is observed that in one of the tests the engine, compressed air blower, was approved and, therefore, allowed the indication of possible predictive maintenance. On the other hand, a second test, which had its result disapproved, the failure was detected and sent for maintenance. And, with the data obtained and with the comparison of the tests carried out, in two different periods, important knowledge was obtained to interpret the data and predictively diagnose the conditions of the MIT.

Keywords: Electric Motors; Three Phase Induction Motors; Baker AWA-IV; Essay; Failure Prevention.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Vista detalhada de um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo (EASA, 2002).....	08
Figura 2.2 – a) Estator de uma máquina assíncrona b) Estator colocado dentro de uma carcaça de uma máquina assíncrona (FRANCISCO, 2006).....	09
Figura 2.3 – a) Motor com rotor tipo gaiola de esquilo b) Motor com rotor do tipo bobinado (CHAPMAN, 2013).....	10
Figura 2.4 – a) Corrente defasadas de 120° em um enrolamento de armadura trifásico, b) relação entre as correntes defasadas de 120° no tempo, c) Relação entre enrolamentos defasados de 120° no espaço (KOSOW, 1982).....	11
Figura 2.5 – Detalhes de um Rotor com o campo magnético se opondo ao campo girante do Estator (FRANCISCO, 2006).....	11
Figura 2.6 – Produção de um campo magnético girante (CHAPMAN, 2013).....	13
Figura 3.1 – Identificação dos intervalos (em horas de operação), modelo de rolamento utilizado e a quantidade de graxa são expressos na placa de identificação do motor (WEG, 2022).....	18
Figura 3.2 – a) Rolamento com falha por estresse mecânico e b) Rolamento com falha por estresse ambiental (EASA, 2002).....	19
Figura 3.3 – Temperatura versus curvas de vida para sistema de isolamento (EASA, 2010)	20
Figura 3.4 – Temperatura versus curvas de vida para sistema de isolamento (EASA, 2010)	21
Figura 4.1 – Vista do megômetro analógico (YOKOGAWA, s.d.)	24
Figura 4.2 – Esquema interna do megômetro (YOKOGAWA, s.d.).....	25
Figura 4.3 – Megômetro digital FLUKE (FLUKE, 2010)	26
Figura 4.4 – AllTest-Pro Deenergized Motor Circuit Analysis (MCA) Testing Instrument (ALLTES, 2019).....	27
Figura 4.5 – Baker AWA-IV (MEGGER, 2021)	27
Figura 4.6 – Tipos de correntes para um isolamento epóxi-mica com uma corrente relativamente baixa (IEEE STD, 2000).....	32
Figura 4.7 – Teste de isolamento de tensão de passo (ZAMBRANO, 2015)	34

Figura 4.8 – Gráfico curva de Paschen (WILSON, 2003).....	38
Figura 4.9 – Diagrama de blocos típico da instrumentação atual (WILSON, 2003)	39
Figura 4.10 – Bobina interpolar para representar a medição surge test (MEGGER, 2013) 40	
Figura 4.11 – Curto ente espiras (PEÑA, 2012).....	40
Figura 4.12 – Forma de onda de um bom enrolamento (ZAMBRANO, 2015)	41
Figura 5.1 – Fluxograma das etapas dos ensaios	43
Figura 5.2 – Ícone representa ponto de alimentação localizada na parte de trás do equipamento Baker AWA-IV (MEGGER, 2010)	45
Figura 5.3 – Baker AWA-IV – Item 6 Led de segurança (MEGGER, 2010)	46
Figura 5.4 – Ícone de abertura no Software(MEGGER, 2010).....	46
Figura 5.5 – Tela de definição da base de dados (MEGGER, 2010)	47
Figura 5.6 – Tela de inserção de dados do MIT (MEGGER, 2019).....	48
Figura 5.7 – Tela de definição se o MIT está com ou sem rotor (MEGGER, 2019)	48
Figura 5.8 – Tela de definição quando se utiliza um base de dados existente (MEGGER, 2019).....	49
Figura 5.9 – Baker AWA-IV – Conexão Ponte Kelvin (MEGGER, 2019)	49
Figura 5.10 – Baker AWA-IV – Item 11 Conexão Ponte Kelvin (MEGGER, 2019).....	50
Figura 5.11 –Conexão para teste de Hipot (MEGGER, 2019).....	50
Figura 5.12 – Configuração de parâmetros para ensaio temperatura e resistência (MEGGER, 2019).....	52
Figura 5.13 – Configuração de parâmetros temperatura (MEGGER, 2020).....	52
Figura 5.14 – Configuração de parâmetros porcentagem de falha (Delta R) (MEGGER,2019).....	53
Figura 5.15 – Esta parte da tela representa o teste instantâneo e resultados do teste (MEGGER,2020).....	54
Figura 5.16 Teste de (DC) Corrente Continua, (DC TESTS) (MEGGER, 2020).....	55
Figura 5.17 – Representa o teste de megohm marcado em vermelho (MEGGER, 2020)...	56
Figura 5.18 Teste de DA/PI marcado em vermelho (MEGGER, 2020).....	57
Figura 5.19 – Representa o teste de Hipot marcado em vermelho (MEGGER, 2020)	58
Figura 5.20 – Indicando em tempo real os níveis de tensão, corrente e resistência de isolamento (MEGGER, 2020)	58
Figura 5.21 – Tela do surge test (MEGGER, 2020).....	59
Figura 5.22 – Motor aprovado (MEGGER, 2020)	61
Figura 5.23 – Motor reprovado- FAIL (MEGGER, 2020).....	61

Figura 5.24 – Salvar resultado (MEGGER, 2020)	62
Figura 6.1 – Lagoa 01 Cargill agrícola (CARGILL, 2022).....	64
Figura 6.2 – Soprador de ar 04 SB8623 Cargill agrícola (CARGILL, 2022).	64
Figura 6.3 – Soprador de ar 04 SB8623 Cargill agrícola (CARGILL, 2022).).....	65
Figura 6.4 – Placa MIT do soprador de ar 04 SB8623 Cargill agrícola (CARGILL, 2022)66	
Figura 6.5 – Soprador de ar 04 SB8623 (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2022).....	67
Figura 6.6 – Classe de tensão e potência MIT SB8623 (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2022).....	68
Figura 6.7 – Caixa de ligação MIT SB8623 (CARGILL, 2022).....	69
Figura 6.8 – Pontas balanço de resistência (BAKER AWA IV, 2022).....	69
Figura 6.9 – Pontas de alto potencial (BAKER AWA IV, 2022).....	70
Figura 6.10 – Teste de temperatura e resistência (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)71	
Figura 6.11 – Teste de temperatura e resistência (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)71	
Figura 6.12 – Megohm, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019).....	72
Figura 6.13 – Megohm, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021).....	72
Figura 6.14 – Índice de polarização, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	72
Figura 6.15 – Índice de polarização, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)	73
Figura 6.16 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	73
Figura 6.17 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)	73
Figura 6.18 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	74
Figura 6.19 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)	74
Figura 6.20 – Degrau de tensão, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019) ...	75
Figura 6.21 – Degrau de tensão, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021) ...	75
Figura 6.22 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	76
Figura 6.23 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2022)	76
Figura 6.24 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	77
Figura 6.25 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)	77
Figura 6.26 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	78

Figura 6.27 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)	78
Figura 6.28 – Teste surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)	78
Figura 6.29 – Teste surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)	79
Figura 6.30 – Teste de surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019).....	79
Figura 6.31 – Teste de surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021).....	80
Figura 6.32 – Motor retirado para análise interna (CARGILL, 2021)	81
Figura 6.33 – Bobina interna do motor para análise (CARGILL, 2021).....	82

LISTA DE TABELAS**Pág.**

Tabela 4.1 – Diretrizes para tensão direta (IEEE STD 43, 2013)	31
Tabela 4.2 – Classe de isolamento (IEC 60085-01, 1984)	31

LISTA DE SÍMBOLOS

B_s	– campo magnético girante.
Checkup	– checar
n_{sinc}	– velocidade de rotação do campo magnético.
f_{se}	– frequência do sistema aplicada ao estator em hertz.
P	– o número de polos da máquina.
e_{ind}	– tensão induzida nas barras do rotor.
v	– velocidade da barra em relação ao campo magnético.
B	– vetor densidade de fluxo magnético.
B_R	– fluxo de corrente do rotor produz um campo magnético.
τ_{ind}	– conjugado induzido da máquina de indução.
k	– constante.
$B_{líq}$	– campo magnético líquido.
L	– vida útil do isolamento em horas.
T	– é a temperatura em <i>Kelvin</i> .
A e B	– são constantes.
c e n	– constantes da Lei de Potência.
LV	– conjunto de testes de (LV) baixa tensão.
I/F	– resposta de frequência atual.
ϕ	– ângulo de fase.
R_{max}	– resistência máxima.
R_{min}	– resistência mínima.
$R_{average}$	– resistência média.
IR_{t1}	– resistência de isolamento tempo 1.
IR_{t2}	– resistência de isolamento tempo 2.
K	– constante.
$M\Omega$	– mega ohm.
i_c	– corrente capacitiva geométrica,
μA	– microampere.
μm	– micrómetro.

LISTA DE SIGLAS

NU	–componente da especificação de rolamentos de motores.
MIT	–Motor de Indução Trifásicos.
CC	–Corrente Contínua.
CA	–Corrente Alternada.
cv	– Cavalo-Vapor
DC	– <i>Direct Current</i> (Corrente Direta).
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Eletronic Engineers</i> .
ANSI	– <i>American National Standards Institute</i> .
EASA	– <i>European Union Aviation Safety Agency</i> .
PI	– Índice de polarização.
IA	– Corrente de Absorção.
DA	– Absorção Dielétrica.
IL	– soma da fuga corrente ao longo dos braços terminais.
IG	– corrente de condutância.
min	– minutos.
Hz	– Hertz.
V	– Volt.
I	– Corrente.
A	– Ampère.
H	– Henry.
W	– Watt.
C	–Capacitância.
R	– Resistência.
ρ	–resistividade do condutor.
$\frac{dv}{dt}$	–taxa de variação aplicada durante um período.
L	–comprimento do condutor
A	–representa a seção transversal do condutor
VCA	– tensão em corrente alternada.
SN	–número de série.
HP/KW	– unidade de potência do motor/quilowatts.
Isol	–classe de isolamento.

SF	–fator de serviço.
RPM	–rotações por minuto.
ID	– <i>identity</i> (identidade).
HP	– <i>horsepower</i> (é o valor medido no eixo motor).
StepV	–Passo de tensão.
R, S, T	– Rede do Sistema Elétrico, indicado para representar as cores das fases.
ppm	– partes por milhão

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS

1	INTRODUÇÃO	1
2	MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	7
2.1.	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO	7
2.1.1.	ESTATOR	8
2.1.2.	ROTOR.....	9
2.2.	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO	10
2.3.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	13
3	FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	14
3.1.	CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	14
3.1.1.	ESTRESSE TÉRMICO	14
3.1.2.	ESTRESSE ELÉTRICO.....	15
3.1.3.	ESTRESSE AMBIENTAL.....	15
3.1.4.	ESTRESSE MECÂNICO	16
3.2.	VIDA ÚTIL	17
3.2.1	VIDA ÚTIL DO ROLAMENTO	18
3.2.2	VIDA ÚTIL DO ESTATOR	19
3.3.	TIPOS DE MANUTENÇÃO	21
3.3.1.	MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	21
3.3.2.	MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	22
3.3.3.	MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	23

3.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
4	ENSAIOS.....	24
4.1.	EQUIPAMENTOS DE MEDIDA	24
4.1.1	MEGÔMETRO ANALÓGICO.....	24
4.1.2	MEGÔMETRO DIGITAL	25
4.2.	TESTES DE MCA.....	26
4.2.2	TESTE DE MCA EM MIT COM ALLTEST-PRO	26
4.2.3	TESTE DE MCA COM BAKER AWA-IV	27
4.3.	MÉTODOS DE ENSAIOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS - MIT	28
4.3.1	TESTE DE BALANÇO DE RESISTÊNCIA (MÉTODO KELVIN)	28
4.3.2	TESTE DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO	30
4.3.3	ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO E ABSORÇÃO DIELÉTRICA	31
4.3.4	PROVAS DE TENSÃO POR ESCALA (STEPVOLTAGE) HIPOT	33
4.3.5	SURGE TEST (PROVA DE IMPULSO).....	36
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
5	METODOLOGIA.....	43
5.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO .	43
5.2.	DEFINIR E PREPARAR O MIT PARA ENSAIOS.....	44
5.3.	PREPARAR BAKER AWA-IV	44
5.4.	CONECTAR BAKER AWA-IV NO MIT	49
5.5.	REALIZAR ENSAIO	51
5.5.1	TESTE DE TEMPERATURA/RESISTÊNCIA.....	51
5.5.2	TESTE DE (DC) CORRENTE CONTINUA, (DC TESTS).....	54
5.5.2.1	MEGOHM TENSÃO DE 500 VOLTS	55
5.5.2.2	TESTE DE DA/PI 500 VOLTS.....	56
5.5.2.3	DEGRAU DE TENSÃO 2000 VOLTS (HIPOT)	57
5.5.3	TESTE DE SURTO 2000 VOLTS (SURG TEST)	59
5.6.	MIT APROVADO/REPROVADO	60
5.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63

6.1.	CENÁRIO	63
6.2.	ESCOLHA DO MIT ATRAVES DE SUA CRITICIDADE.....	65
6.3.	INSERÇÃO DE DADOS NO BAKER AWA -IV.....	67
6.4.	CUIDADOS COM AS CONEXÕES	68
6.5.	COLETA DE SINAIS ELÉTRICOS DO MIT	70
6.6.	ANÁLISE DO TESTE BALANÇO DE RESISTÊNCIA (KELVIN)	70
6.6.1	ANÁLISE DO TESTE DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO	71
6.6.2	ANÁLISE DO TESTE (PI) E (DA)	72
6.6.3	ANÁLISE DO TESTE DE TENSÃO POR ESCALA (HIPOT).....	74
6.6.4	ANÁLISE DO SURGE TEST (PROVA DE IMPULSO).....	78
6.7.	TOMADA DE DECISÃO COM OS RESULTADOS	81
6.8.	DISCUSSÕES	82
7	CONCLUSÕES.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As diversas descobertas e aperfeiçoamentos realizados por pesquisadores de máquinas elétricas ao longo do tempo, faz perceber o protagonismo destas máquinas no processo produtivo. No quesito de força motriz e fonte de energia as máquinas elétricas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de diferentes setores da vida humana (KUCHENBECKER, 2020).

Segundo Nascimento et al. (2020) dentre as máquinas elétricas o motor de indução trifásico (MIT), representa um percentual de 90% dos motores existentes na indústria. Ainda Nascimento et al. (2020), diz que os motores de uma forma geral, motores de indução e outros motores (Corrente Contínua (CC) e Síncronos), representam uma estimativa de 75% do consumo de energia no parque industrial e consumindo cerca de 40% a 50% da capacidade de geração de energia de um país.

Sahrin e Purnomo (2019) citam que há três tipos de máquinas elétricas mais comuns na indústria, os chamados motores CC, motores síncronos e motores de indução. Sendo que o mais popular e conhecido entre estes é a máquina de indução trifásica ou também chamado de motor de indução trifásico (MIT). Melo (2015) menciona que os motores de indução trifásicos, em particular a variante gaiola de esquilo, dentro do universo de motores existente na indústria, este representa 90% de utilização no setor industrial.

Postól Sobrinho et al. (2008) apresentam vantagens dos motores de indução trifásicos (MIT): i) trabalha com altas velocidades de rotação, ou seja, em altas rotações que ocorrem acima de 5400 rpm: ii) possuem peso/potência menores que os motores de baixa rotação (motores compactos), iii) grande eficiência global de aproximadamente 98% do conjunto do equipamento, iv) menor necessidade de manutenção, pois possuem menos componentes que outros motores, como mancais magnéticos e sistemas de lubrificação, v) melhor sistema de vida útil e vi) mais fáceis de serem instalados.

Postól Sobrinho et al. (2008), com análise construtiva de um MIT chega à conclusão que há ainda, desafios maiores na área mecânica do processo construtivo dos motores de indução trifásicos. Isto porque um equipamento com alta rotação impõe desafios quanto as forças centrífugas, quanto a resistência do material e ao balanceamento

do corpo girante. Desta forma, quando há altas rotações, os elementos dos motores sofrem efeito de grande degradação que está relacionado a rotação do corpo girante.

Lima (2016), baseado em um estudo de diagnóstico de motores de indução trifásicos, afirma que motores de indução trifásicos, como exemplo do tipo rotor gaiola, constitui a carga mais relevante nos sistemas industriais. O autor diz, que o motor trifásico de indução como força motriz de operação tem um grande impacto energético no Brasil. Destaca alguns fatores da importância dos motores de indução como: i) robustez estrutural, ii) simplicidade de operacionalização e iii) valor de aquisição relativamente baixo.

Lima (2016), utilizando o método da teoria das componentes simétricas e a série de *Fourier*¹, faz uma análise de tensões em circuitos com sinais desequilibrados e distorcidos. O autor conclui que é possível analisar o desempenho térmico do MIT quando alimentado por redes desequilibradas e distorcidas, através do circuito equivalente do motor.

Estudos estimam que há em torno de 34 a 45% de falhas em máquinas elétricas rotativas referentes a problemas no estator ou rotor. Quando há um alto percentual de falhas em motores de indução trifásicos, isto traz um alto grau de incerteza na sua operacionalidade. E, conseqüentemente, essas falhas no estator e rotor, por uma parada não-programada pode levar a grandes perdas produtivas na indústria (BARBOSA et al., 2020).

Silva (2015), em seu estudo de modelagem e tratamento dos sinais de assinatura elétrica de máquinas para melhoria do diagnóstico em falhas, apresenta uma estatística mais detalhada baseada em estudos de Dalva e Thorsen (1994), de falhas em motores de indução: i) 51% defeitos em enrolamentos, ii) 16% defeitos no circuito do estator, iii) 16% defeitos externos (ambiente, tensão e carga), iv) 5% defeitos rotor, v) 2% defeitos eixo e acoplamento e vi) 10% defeitos desconhecidos. O autor menciona que é um desafio identificar falhas nos motores para as equipes de manutenção, dentro de uma planta de produção onde o cenário é de mínima intervenção possível.

Estas falhas estão frequentemente relacionadas a processos operacionais agressivos para o MIT que acaba por contribuir para a sua degradação. Dentre as falhas nos motores tem-se: i) os estresses térmicos, elétricos, mecânicos, ii) excentricidade do motor, iii) sobreaquecimento, iv) vibrações mecânicas, v) desalinhamento no acoplamento mecânico e vi) dentre outros (NASCIMENTO et al., 2020).

¹ Série de *Fourier*: foi criada por em 1807 por Jean Baptiste Joseph Fourier e tem a finalidade determinar em processos físicos, usando uma série trigonométrica de senos e cossenos, a representação de funções infinitas e periódicas complexas (SODRÉ, 2003).

Silva (2015), destaca alguns métodos de falhas em motores de indução na indústria: i) Análise de Vibração, ii) Análise de Assinatura Elétrica (ESA), iii) Análise Acústica (sônica e ultrassônica), iii) Análise de Infravermelho e iv) Análise termográfica. O autor usa-o como ferramenta de análise e diagnóstico através do circuito rotórico para análise de defeitos nos rolamentos, e o procedimento de rolamentos através de sinais dos rolamentos na assinatura elétrica aplicando técnicas de separação e extração de componentes para o diagnóstico, dentre outros procedimentos. Silva, conclui através de resultados de ensaios em laboratório e em motores na indústria, a viabilidade da abordagem utilizando os métodos propostos de análise de sinais de assinatura elétrica.

De acordo com Oliveira (2018) o MIT, tem em média 17 anos de vida útil de funcionamento. Baseado na análise de um motor convencional reconcondicionado e de um motor elétrico *Premium*, chega à conclusão de que o motor *Premium* trará um maior rendimento, em torno de 8,7%. E como consequência trará uma maior economia no consumo de energia elétrica da rede.

Segundo Kuchenbecker (2020) um dos grandes problemas para um motor quando continuamente submetidos a estresses elétricos, mecânicos e ambientais, é a degradação de partes do MIT e logo a perda de vida útil. O que mais se degrada em um motor de indução, nessas condições de estresses é o sistema de isolamento dos enrolamentos.

Kuchenbecker (2020) traz um percentual de como esses fatores de degradação podem afetar o isolamento e ocasionar falhas prematura e inesperadas em um MIT: i) 56% de falhas de isolamento, ii) 24% de falhas mecânicas, iii) 17% de falhas térmicas e iv) 3% de falhas nos mancais.

Kuchenbecker (2020), destaca que a interrupção do funcionamento de tais máquinas acontece por fatores relacionados a paradas indesejáveis, ocasionadas como falhas prematuras e inesperadas no motor de indução. Fatores tais como a falta de energia, defeitos elétricos ou mecânicos, acabam dificultando todo o processo e afetando também os potenciais ganhos financeiros de diversos setores da indústria.

Baccarini (2005), faz um estudo de detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução. Segundo o autor, os custos com a manutenção de equipamentos somam a maior parte do custo de fabricação na indústria. Custos estes que podem variar entre 15% e 40% do produto industrializado. Segundo Baccarini, no setor de alimentos o custo médio com a manutenção pode chegar a 15% do custo total do produto. Nas indústrias siderúrgicas, de papel, celulose e em outras indústrias de grande porte, o custo pode chegar a 40% do custo total do produto.

Baccarini (2005), usando um sistema de detecção de falhas em motores de indução, com dados de coletas a partir de sensores em uma planta, com dados de diagnóstico elétrico e mecânico do motor desenvolve modelos matemáticos assimétricos. Em seu modelo o autor considera que as assimétricas no motor são causadas por curto-circuito entre espiras, barras quebradas e falhas mecânicas. Com isso, o autor conclui que os modelos possibilitaram a obtenção de dados preliminares para o desenvolvimento de um projeto de sistema de diagnóstico.

Com o propósito de se evitar a parada dos motores de indução trifásicos (MIT), algumas etapas devem ser realizadas nos ensaios dos motores: i) verificar o funcionamento, ii) encontrar anomalias, iii) verificar se foi feita a correção dos problemas, iv) verificar se o equipamento está aprovado ou v) será feita a programação da manutenção do equipamento. Estes ensaios têm como objetivo análise de falhas da causa raiz, ou seja, um exame da causa de falhas no motor e seus componentes (EASA, 2002).

Segundo Kuchenbecker (2020) os ensaios nos motores de indução trifásico são os mais comuns para avaliações. Dentre os ensaios tem-se: i) a medição de resistência do isolamento e do índice de absorção e polarização, ii) *surge test*: teste de surto de tensão feito para identificar curto entre espiras, iii) Hipots: teste de aplicação de tensão: realizado para encontrar fuga de corrente através do efeito corona e para teste de isolação e iv) perdas dielétricas (o tangente delta): teste usado para analisar perdas na capacitância pertinente à isolação.

Melo (2015) destaca que há um grande avanço tecnológico em mecanismos de diagnósticos e detecção de avarias para uma manutenção preditiva. Para um MIT faz-se necessário monitorar seu estado contínuo durante sua vida útil. Com um monitoramento através de aparelhos desenvolvidos tecnologicamente é possível, através de um método não invasivo, identificar falhas iniciais ou mesmo prever o seu aparecimento.

Baccarini (2005), em seu estudo de detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução, cita que alguns métodos manutenção de análise vem evoluindo no Brasil, em várias empresas, como a Usiminas, Petrobrás, Vale e outras. Estas empresas estão investindo fortemente em sistemas de diagnósticos em motores elétricos. Tendo como objetivo uma melhor eficiência no diagnóstico e detecção de falhas em motores elétricos de indução trifásicos.

Como forma de analisar as falhas em motores, existe no mercado o equipamento *Baker AWA-IV(Megger)*. Este equipamento é capaz de analisar as condições de isolamento e do circuito elétrico de um MIT, por meio de testes programáveis pelo usuário

(MEGGER, 2021). O equipamento funciona como um sistema de diagnóstico, de forma a detectar avarias por meio de ensaios preditivos (MELO, 2015).

Barbosa et al. (2020) relatam que há aproximadamente 40 tipos de procedimentos de testes e monitoramento, que podem ser executados *on-line* ou *off-line* de forma a supervisionar as condições dos motores.

Dekhandji et al. (2019) destacam que há alguns métodos de manutenção conhecidos para detecção de falhas em motores de indução trifásicos e empregados na planta industrial: manutenção corretiva (também chamada de manutenção reativa), manutenção preventiva (ou programada) e manutenção preditiva (previsão da falha do equipamento).

De acordo com Dos Santos (2013), a manutenção preditiva se baseia no princípio de que tendo degradação do motor antes de uma falha é possível seu monitoramento através do comportamento antes do defeito ou do seu desligamento. Já a manutenção preventiva ocorre de forma a antecipar a ocorrência de falhas baseado em um plano de intervenções previamente elaborados. E a corretiva é realizada a partir da falha do motor ou constatação do rendimento menor que o esperado.

Baseado no estudo de comparativo de tipos de manutenção, Dos Santos (2013), cita que há custos diferentes para os tipos de manutenção (US\$ por HP): i) manutenção preditiva US\$ 9 por HP, ii) manutenção preventiva US\$ 24 por HP, iii) manutenção corretiva US\$ 17 por HP. O autor conclui que a manutenção preditiva é a que apresenta maior vantagem econômica.

Onídio et al. (2021), demonstram a evolução da forma de manutenção preventiva dos motores. Baseado na tecnologia *IoT* (Tecnologia da Internet das Coisas), o autor desenvolve um protótipo para aquisição de dados de forma a monitorar e detectar falhas em tempo real. Os autores utilizam uma plataforma Ubidots da WEG na qual gerencia os dados colhidos em tempo real com uso de microcontrolador, com uso de alarmes de anomalias e envio de e-mails para os operadores. Os resultados mostram que foi possível o monitoramento aplicando a tecnologia *IoT* quanto aos dados da corrente elétrica, vibração e temperatura do MIT.

A partir dos estudos realizados, pode-se propor como hipótese: Se motores de indução trifásicos são largamente utilizados no setor industrial. Se é possível realizar manutenção preditiva para redução de falhas em motores. Então, é possível realizar ensaios para monitoramento e detecção de falhas em motores a fim de evitar a parada não programada do mesmo.

Lima (2016) destaca a importância dos motores de indução trifásicos no Brasil. Silva (2015) utiliza um método de análise e diagnóstico para análise de defeitos. Baccarini (2005) destaca a importância da manutenção de equipamentos para evitar parada não planejada. Melo (2015) destaca avanços tecnológicos para detecção de avarias.

A motivação para a realização do trabalho se baseia no fato de, até o desenvolvimento desta pesquisa, não existir trabalhos científicos que abordam de forma mais específica o uso do instrumento analisador de testes, *Baker AWA-IV (Megger)*. E, ainda, por almejar desenvolver uma pesquisa que sirva de orientação tanto na operacionalização do instrumento *Baker AWA-IV* como, também, de referencial para futuros treinamentos de equipes técnicas.

O trabalho em questão tem o objetivo de demonstrar a importância dos ensaios elétricos em máquinas de indução trifásicas, com o uso de um instrumento analisador de testes, *Baker AWA-IV (Megger)*, para detecção preditiva de falhas ocultas, prevenindo assim possíveis paradas do MIT por meio do monitoramento dos parâmetros de grandezas elétricas.

Para tanto, também se objetiva realizar um estudo teórico e de caso através de pesquisas sobre a tecnologia e a prática executada em ensaios com o *Baker AWA-IV* e, realizar comparações entre duas coletas de dados de testes, em tempos diferentes, a fim de demonstrar a importância do instrumento nas manutenções preditivas.

No Capítulo 2 será abordado a teoria de máquinas de indução, onde será apresentado: i) aspectos construtivos e ii) o princípio de funcionamento. No Capítulo 3 será abordado: i) as principais falhas em máquinas elétricas, ii) vida útil e iii) tipos de manutenções.

No Capítulo 4 será abordado os conceitos relacionados a importância de equipamentos para a detecção de falhas em MIT, o uso de equipamentos e suas particularidades para análise. No Capítulo 5 apresenta-se a metodologia aplicada durante o desenvolvimento dos testes e ensaios realizados pelo equipamento *Baker AWA-IV*. No Capítulo 6, será apresentado os resultados obtidos, as coletas de dados e análises dos ensaios realizados. E no Capítulo 7, discorre-se sobre as principais conclusões que se chegou pelo desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso.

CAPÍTULO 2

MÁQUINAS ELÉTRICAS

Neste capítulo serão descritos como são construídas as Máquinas de Indução Trifásica (MIT). Serão evidenciados os principais aspectos construtivos e de funcionamento dos motores de indução trifásicos.

2.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO

As máquinas elétricas são consideradas dispositivos que fazem a conversão de energia eletromecânica em energia elétrica ou elétrica para a forma mecânica. E, máquinas rotativas, são aquelas que convertem a energia elétrica em energia mecânica ou a energia mecânica em elétrica, como motores elétricos e geradores elétricos (UMANS, 2014).

Segundo Chapman (2013), dentre os motores elétricos, tem-se o motor de indução trifásico (MIT), também conhecida como máquina assíncrona. Um MIT é uma máquina que possui um conjunto contínuo de enrolamentos. São chamadas assim, máquinas de indução, porque a tensão que chega do rotor, que gera corrente do rotor e o campo magnético do rotor, é induzida diretamente no enrolamento do rotor. A alimentação elétrica do rotor tem a característica então de ser induzida, porque não é alimentada por fios condutores da rede elétrica.

Sahrin e Purnomo (2019) dizem que o funcionamento do MIT, ocorre através de uma fonte de tensão CA trifásica aplicada ao enrolamento do estator. A tensão aplicada no estator produz um fluxo magnético e este fluxo gira em volta do estator em velocidade síncrona. Que, por sua vez, gera-se o torque, este causado pelo fluxo magnético produzido pela indução da corrente elétrica no enrolamento do rotor e estator.

O MIT em seu aspecto físico, possui os seguintes componentes: i) estator, ii) rotor, iii) rolamentos, iv) ventilador, v) carcaça e vi) caixa de ligação (CHAPMAN, 2013).

Segundo Chapman (2013), pode se definir as funções das partes físicas do motor da seguinte forma: i) estator: parte fixa do motor, sendo este com enrolamentos bobinados, neste meio é induzido uma tensão pelo movimento de rotação, ii) rotor: este é o corpo girante do motor, que fica no interior do estator, iii) rolamentos: fica entre os eixos do motor, que possibilita o rotor girar/rotacionar, iv) ventilador: responsável por refrigerar o motor devido as perdas naturais de funcionamento, v) carcaça: envolve todos estes

componentes do motor e são construídos de acordo com a sua aplicação, e vi) caixa de ligação: onde estão os terminais dos enrolamentos do estator. A Figura 2.1 apresenta vista detalhada de uma máquina assíncrona.

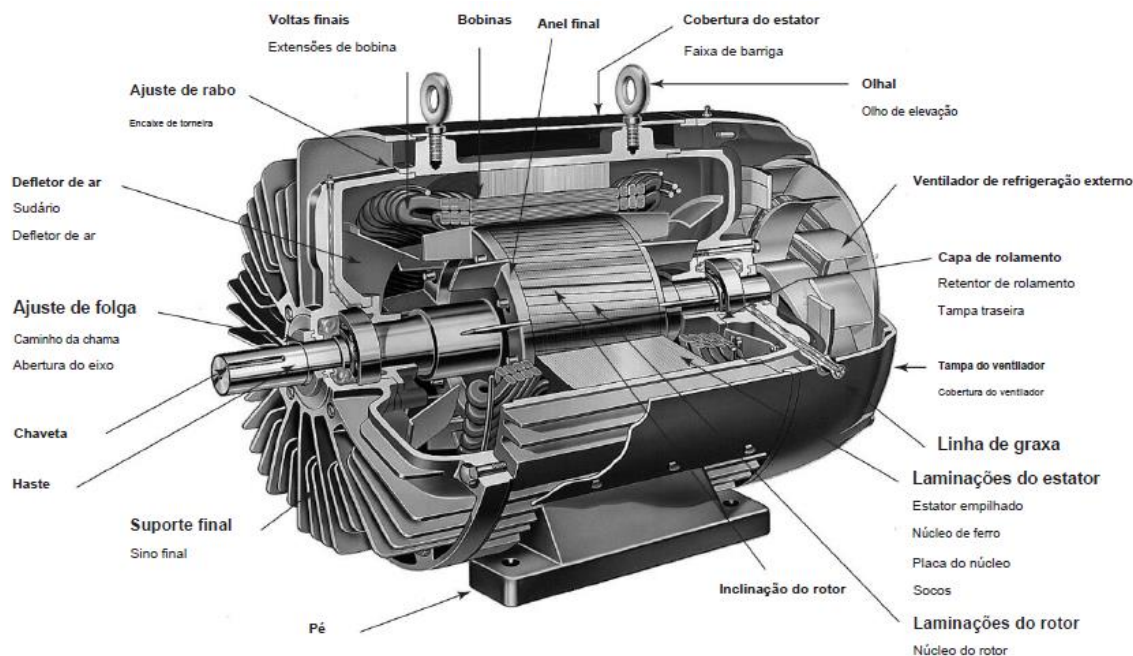


Figura 2.1 – Vista detalhada de um motor de indução trifásico (MIT) do tipo gaiola de esquilo (EASA, 2002).

2.1.1. ESTATOR

O estator é a parte fixa na carcaça do motor e tem como função conduzir a energia elétrica para rotacionar os motores, isto através da indução gerada pelo rotor. Suas chapas são magnéticas de baixas perdas específicas (W/kg) em aço-silício. O estator é composto pelos componentes: i) condutores de cobre: é o condutor onde circula a corrente elétrica, ii) núcleo do estator: tem em sua composição um empilhamento de chapas de aço de silício ou em folhas de aço magnético, isoladas entre elas e prensadas de maneira uniforme para formar um conjunto sólido. A Figura 2.2 (STONE et al., 2004), apresenta um estator.

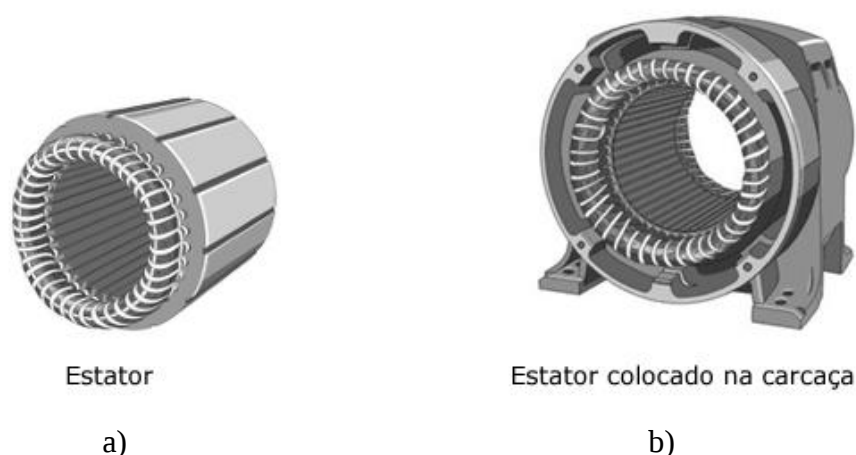


Figura 2.2 – a) Estator de uma máquina assíncrona b) Estator colocado dentro de uma carcaça de uma máquina assíncrona (FRANCISCO, 2006).

2.1.2. ROTOR

O rotor é a parte móvel e girante da máquina elétrica. Conforme ilustrado na Figura 2.3, os rotores mais conhecidos do MIT são o do tipo gaiola de esquilo e rotor bobinado. No tipo gaiola de esquilo os condutores retilíneos são interligados em suas extremidades por anéis de curto-circuito. Já o tipo rotor bobinado tem os terminais de fases do enrolamento de armadura interligados a anéis deslizantes (CHAPMAN, 2013).

O rotor de indução do tipo gaiola de esquilo tem como característica construtiva um rotor com uma série de barras condutoras de eletricidade. Estas barras estão conectadas através de ranhuras na superfície do rotor e com as extremidades em curto-circuito por anéis. Tem esse nome pois são semelhantes as rodas nas quais os esquilos e hamsters correm quando fazem exercícios (CHAPMAN, 2013).

Já o rotor bobinado se caracteriza por ter seus enrolamentos trifásicos semelhantes aos enrolamentos do estator de um motor de indução. O rotor bobinado constitui de três fases de enrolamento do rotor ligadas em Y e suas três fases ligadas aos anéis deslizantes no eixo do rotor. Estes enrolamentos são colocados em curto-circuito utilizando escovas que se sustentam através de anéis deslizantes. Por isso que as correntes no rotor são acessadas por meio dessas escovas, cujas correntes podem ser analisadas e também podem ser inseridas resistências adicionais no circuito do rotor (CHAPMAN, 2013).

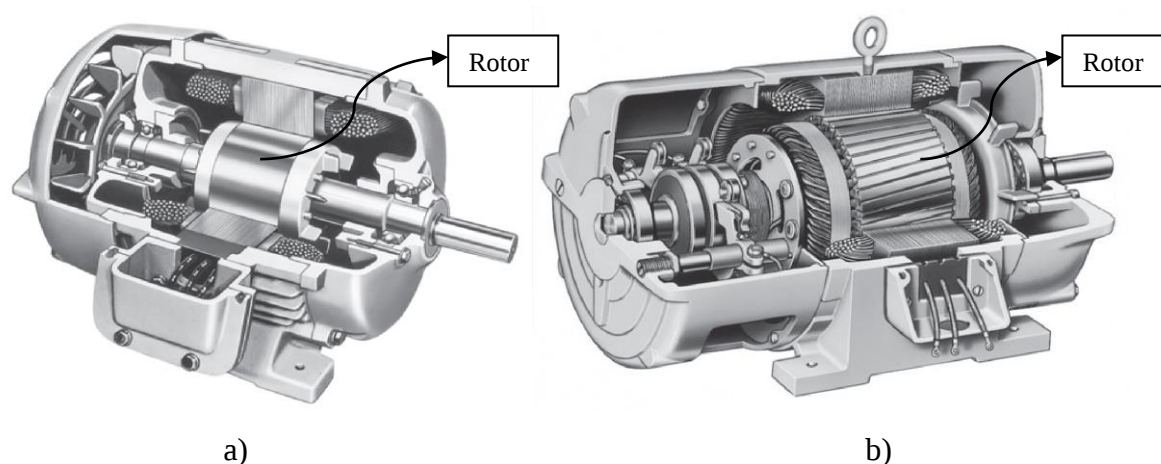


Figura 2.3 – a) Motor com rotor tipo gaiola de esquilo b) Motor com rotor do tipo bobinado (CHAPMAN, 2013).

Os motores de indução com o rotor bobinado apresentam manutenção mais cara em comparação com os motores de indução de gaiola de esquilo. Isto devido ao desgaste das escovas e anéis deslizantes, que elevam o custo do motor por isto são menos usados na indústria (CHAPMAN, 2013). De acordo com Umans (2014), os rotores de gaiola de esquilo têm uma construção mais simples e robusta, tem vantagens de custos mais baixos e são os mais utilizados desde motores fracionários ou de grande porte.

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Segundo Kosow (1982), na máquina de indução assíncrona seu estator contém um conjunto disposto de três enrolamentos espaçados em um ângulo de 120° entre eles, conforme pode ser visto na Figura 2.4. A corrente trifásica elétrica da concessionária de energia aplicada nesses enrolamentos gera um campo magnético girante e podem ser definidas da seguinte forma: i) quando o campo magnético atravessa o rotor, este provoca uma variação nos condutores da gaiola de esquilo e do rotor bobinado, produzindo uma (f.e.m) força eletromotriz induzida nos condutores, seguindo o princípio da Lei de Faraday², ii) as correntes induzidas percorrem os condutores do rotor; iii) de acordo com a

² Lei de Faraday: Sempre que através da superfície abraçada por um circuito, tiver neste lugar uma variação de fluxo ($d\phi/dt$), gera-se nesse circuito uma força eletromotriz induzida (e). Se o circuito for fechado, será percorrido por uma corrente induzida. [Fórmula: $e = -(d\phi/dt)$] (FRANCISCO (2006).

Lei de Lenz³, estas correntes induzidas seguem um sentido que pelas ações magnéticas tende a se opor a força que lhe originou.

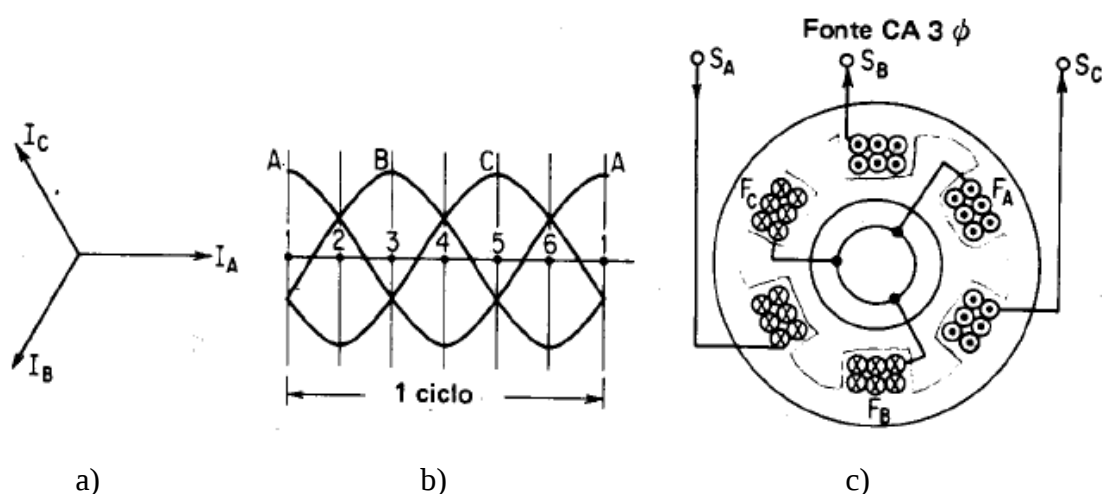


Figura 2.4 – a) Corrente defasadas de 120° em um enrolamento de armadura trifásico, b) Relação entre as correntes defasadas de 120° no tempo, c) Relação entre enrolamentos defasados de 120° no espaço (KOSOW, 1982)

De acordo com Kosow (1982), no rotor em cada instante de rotação, induzidas pelas correntes, terá um campo magnético que irá se opor ao campo magnético girante do estator, para que isso ocorra os dois campos tem que ter polos contrários, conforme pode ser visto na Figura 2.5.

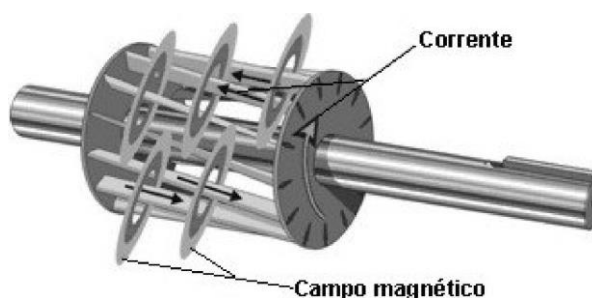


Figura 2.5 – Detalhes de um Rotor com o campo magnético se opondo ao campo girante do Estator (FRANCISCO, 2006)

Por ser o estator um meio de campo girante e pelo movimento norte/sul dos polos contrários se atraírem, o rotor gera um movimento para acompanhar o campo girante. Assim, a mescla de campo produzido pelas correntes induzidas no rotor com o campo girante do estator, gera uma força de origem magnética que, por sua vez, resulta em um conjugado no eixo do motor, fazendo que o rotor gire na mesma direção do campo girante (RAIMUNDO, 2019).

³ Lei de Lenz: O sentido da corrente é tal que esta, pelas suas ações magnéticas, tende a opor-se à causa que lhe deu origem (FRANCISCO (2006).

Como visto, em um MIT um conjunto de tensões são aplicadas ao estator em conjunto com as correntes que circulam no estator. As correntes que circulam no estator produzem um campo magnético girante (B_s) e a componente matemática da velocidade de rotação do campo magnético, pode ser dada pela equação:

$$n_{sinc} = \frac{120 f_{se}}{P} \quad (2.1)$$

Sendo, f_{se} é a frequência do sistema aplicada ao estator em hertz e P o número de polos da máquina.

Como resultado o campo magnético girante (B_s) entre as barras do rotor que induz uma tensão nessas barras do rotor. Esta tensão induzida pode ser equacionada por:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2.2)$$

Sendo, v é a velocidade da barra em relação ao campo magnético, B é o vetor densidade de fluxo magnético e l é o comprimento do condutor dentro do campo magnético.

Em consequente, o fluxo de corrente do rotor produz um campo magnético chamado de (B_R), e daí se tem a equação o conjugado induzido da máquina de indução:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s \quad (2.3)$$

Finalmente, tem-se o conjugado resultante τ_{ind} tem o sentido anti-horário e, por isso, o rotor ganha velocidade nesse sentido (CHAPMAN, 2013). Como pode ser visto na Figura 2.6 que apresenta o conjugado induzido em um motor de indução. Sendo na Figura 2.6 a) B_s o campo girante de estator que induz uma tensão nas barras do rotor, b) a tensão no rotor que gera um fluxo de corrente no rotor, este está atrasado em relação à tensão devido à indutância do rotor e c) B_R é um campo magnético girante que a corrente elétrica do rotor gera. B_R está atrasado 90° em relação a si próprio. E, por fim, o campo B_R se relaciona com $B_{líq}$ que produz um conjugado anti-horário no motor. Sendo $B_{líq}$ o campo magnético líquido, considerado como a soma vetorial dos campos do rotor e do estator.

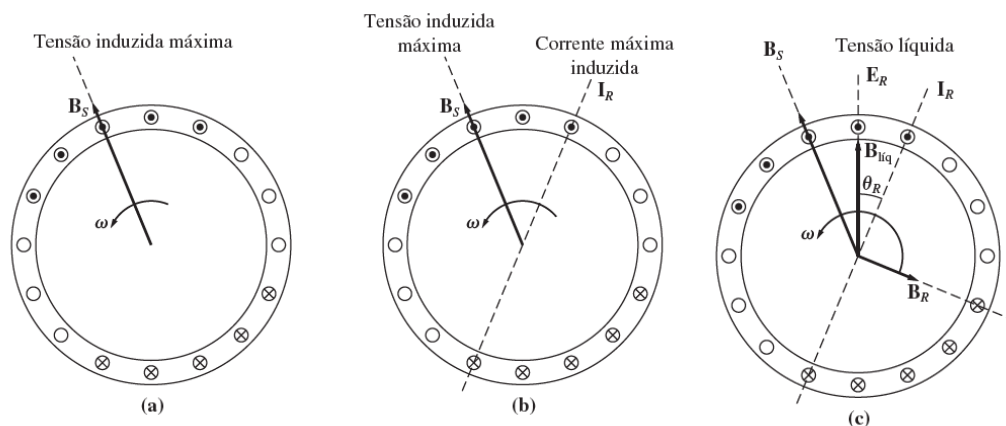


Figura 2.6 – Produção de um campo magnético girante (CHAPMAN, 2013).

2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A apresentação dos aspectos construtivos da máquina de indução trifásica com suas componentes e funções foram descritas com o intuito de se esclarecer o princípio de funcionamento deste tipo de motor assíncrono. De como a tensão que chega do rotor, que gera corrente do rotor e campo magnético do rotor, é induzida diretamente no enrolamento do rotor, tanto o do tipo rotor bobinado como do tipo rotor gaiola de esquilo. Com isso, pôde-se apresentar algumas grandezas do MIT, de como o campo magnético girante no estator contém um conjunto disposto de três enrolamentos espaçados em um ângulo de 120° entre eles.

Este capítulo foi produzido de forma a apresentar os aspectos principais de construção e funcionamento do MIT, isto, para que no próximo capítulo sejam apresentados as falhas em que os motores estão sujeitos e os impactos na vida útil dos motores de indução trifásicos.

CAPÍTULO 3

FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Neste capítulo será realizada uma abordagem sobre os principais estresses que causam falhas nas máquinas elétricas as chamadas TEAM (térmica, elétrica, ambiente e mecânica). Também será tratado os aspectos em que as TEAM afetam na vida útil do rotor e estator. Por fim, será abordado os tipos de manutenções empregados no prognóstico da ocorrência de falhas no campo da indústria.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

As falhas em máquinas elétricas podem ser classificadas com a expressão de estresses nos motores como TEAM (térmica, elétrica, ambiente e mecânica). Smit e Raghuram (2021), dizem que o estresses nos motores são causados por estresses gerados durante toda vida ou por um curto período de tempo. Para um estresse constante a falha pode ser diretamente relacionada com a quantidade de horas de operação do motor. Falhas ocasionadas por curtos períodos de tempo ou transitórias, estão diretamente relacionadas a quantidade de transitórios que o motor está sob influência.

3.1.1. ESTRESSE TÉRMICO

O estresse térmico é um componente de degradação do isolamento no Sistema de Isolamento Elétrico (EIS). Segundo Smit e Raghuram (2021), a parte do isolamento instalado nos motores de indução trifásicos modernos percorre um processo de oxidação que causa delaminação dos enrolamentos, fragilidade do isolamento e deterioração do material.

Onde a taxa de oxidação da reação é dada pela equação da Lei de Velocidade, conhecida como Lei de Velocidade de Arthenius:

$$L = Ae^{B/T} \quad (3.1)$$

Sendo, L é a vida útil do isolamento em horas, T é a temperatura em *Kelvin* e A e B são constantes.

Smit e Raghuram (2021), segundo esta equação afirmam que a cada aumento de 10°C de temperatura, considera-se que há uma perda de vida útil de 50% dos enrolamentos. Algo que só pode ser considerado para temperaturas altas, e a modelagem de mais de um processo químico não é viável em um sistema de primeira ordem.

3.1.2. ESTRESSE ELÉTRICO

Segundo Smit e Raghuram (2021), o estresse elétrico de frequência ocorre em equipamentos abaixo de 1.000 V causando um alto impacto de envelhecimento. Este envelhecimento ocorre porque há a presença de Descargas Parciais através da presença de tensão de frequências de energia. Essas Descargas Parciais (DP) ocorrem devido a pequenos fragmentos elétricos que existem na cavidade de ar/superfície de isolamento, gerado pelo acúmulo de cargas devido à corrente de excitação e diferenças de potencial.

A fórmula para o nível de tensão elétrica (E em kV/mm) ocasionado devido à presença de DP é:

$$L = cE^{-n} \quad (3.2)$$

Sendo, L é a vida útil do isolamento em horas, c e n constantes da Lei de Potência⁴.

Smit e Raghuram (2021), dizem que em um sistema de isolamento de máquinas elétricas o valor de c (constante) varia de 9 a 12. Para um valor de n igual a 10, como consequência de uma tensão dupla magnitude, diminuirá a vida útil do isolamento em 1.000 vezes. Com isso, os autores provam que o estresse elétrico tem um impacto importante na vida do MIT na ocorrência de Descargas Parciais (DP).

3.1.3. ESTRESSE AMBIENTAL

O estresse ambiental pode ser compreendido como um conjunto de fatores que afetam o entorno do MIT. Estes podem ser compreendidos como os seguintes fatores, de acordo Smit e Raghuram (2021): i) presença de umidade nos enrolamentos, ii) umidade no entorno, iii) vazamento de óleo dos mancais da transmissão ou caixa de engrenagens, iv)

⁴A **lei de potência** (também chamada de lei de escala) afirma que uma mudança relativa em uma quantidade resulta em uma mudança relativa proporcional em outra. O exemplo mais simples da lei em ação é um quadrado; se você dobrar o comprimento de um lado (digamos, de 2 a 4 polegadas), a área quadruplicará (de 4 a 16 polegadas quadradas) (STEPHANIE, 2016).

exposição química devido as operações no local, v) partículas abrasivas no líquido de arrefecimento, vi) partículas de desgaste da sapata/pastilha de freio, vii) detritos e sujeira e viii) exposição à radiação.

Estes fatores afetam diretamente o isolamento do rotor e estator da máquina elétrica. Uma combinação destes fatores pode ser ainda mais prejudicial ao motor, podendo causar o envelhecimento. Stone et al. (2004) afirmam que caso o óleo, a umidade e a sujeira se acumulem na ventilação de rotor e do estator, bem como no final do enrolamento bloqueando o fluxo de ar de resfriamento, aumentará o risco por deterioração térmica.

Stone et al. (2004), dizem que cada fator de estresse térmico pode afetar de formas diferentes o isolamento do rotor e do estator. Em algumas situações, estes fatores de influência por si só não causam o processo de envelhecimento no motor de indução, mas, em uma combinação de outros estresses, pode levar a perda de vida útil. Como exemplo, a umidade e/ou óleo, combinado com sujeira e/ou partículas de carvão, podem criar uma camada parcial condutora sobre o isolamento, em que o estresse térmico causará correntes na superfície do isolamento dos condutores.

3.1.4. ESTRESSE MECÂNICO

Um outro estresse que pode afetar a máquina elétrica é o mecânico. De acordo com Smit e Raghuram (2021) se origina de três fontes diferentes: i) altas forças centrífugas originadas do rotor que distorcem e tendem a esmagar o isolamento, ii) a corrente de frequência de energia que dá origem a altas forças eletromagnéticas que, por sua vez, geram vibrações nas ranhuras do estator e do rotor, e iii) vibrações externas experimentadas devido ao carregamento do motor que são sentidos no eixo do motor primeiro e são transferidos para fora e para o resto da máquina.

Smit e Raghuram (2021), dizem que para o fator de estresse mecânico, não há equações que possam modelar fisicamente os fenômenos de estresse. Estes são solucionados com análises via equipamentos de medições conectados aos motores de indução trifásicos.

Stone et al. (2004), citam o exemplo do ensaio mecânico no rotor como forma de medição do estresse mecânico. Devido ao estresse mecânico no sistema de isolamento ocasionado por uma alta força centrífuga, força centrífuga esta que tende a esmagar ou distorcer o isolamento do rotor. Através de ensaios mecânicos de curta duração é possível

avaliar qual parte do isolamento do rotor tem a capacidade de suportar esse tipo de estresse mecânico.

3.2. VIDA ÚTIL

Segundo WEG (2022), um motor elétrico não tem uma vida útil estimada, se desconsiderarmos peças que se desgastam devido ao uso, como as escovas e rolamentos. Pois, a vida útil está condicionada as instalações, bem como as condições e intervalo de manutenções que os motores são submetidos. De acordo com a WEG (2022), deve-se seguir alguns parâmetros para uma vida útil indefinida de um motor: i) armazenamento em um local adequado, ii) instalação de acordo com o manual do fabricante, iii) operar dentro dos parâmetros nominais e iv) realizar manutenções adequadas.

WEG (2022), diz que quando se fala de diminuição da vida útil do motor, tem-se em mente a vida útil do isolante, considerado como o mais importante para a temperatura de trabalho do motor. No entanto, quando se fala em diminuição da vida útil do motor, não se fala da redução da vida útil do motor por temperaturas elevadas, quando o isolante queima ou o enrolamento do estator é danificado. A vida útil é considerada a temperatura de trabalho do motor, ou seja, a menor temperatura de queima do isolante. Com isso, a vida útil relaciona-se ao envelhecimento gradativo do isolante, o qual vai se tornando seco e perde a força de isolação que, por fim, não suporta a tensão aplicada e acaba por produzir o curto-circuito.

Como forma de manter a vida útil do motor, a fabricante WEG (2022), menciona que os rolamentos têm uma limitação de vida útil de 20.000 horas estipuladas pelos fabricantes. E, devem ser feitas as relubrificações dos rolamentos seguindo placas, manuais do motor e após o período da vida útil, estes devem ser trocados. A Figura 3.1 mostra a placa de identificação do motor com destaque para o intervalo de relubrificações dos rolamentos do MIT de 100 cv.

Existem cuidados que devem ser seguidos para redução do tempo de relubrificação como, por exemplo, a temperatura do rolamento. Para rolamentos até 6312 e NU 312 a temperatura é de até 70°C. Para rolamentos 6314 e NU 314 e maiores conforme dados expressos na placa do motor, a temperatura é de até 85°C. Quando extrapolarem esses valores de temperatura, o intervalo de relubrificação deve ser reduzido pela metade para cada 15°C a mais na temperatura do rolamento (WEG, 2022).

  NBR.7094		 PNCEE REND.%= 92.5% cos φ 0.87 00022	
~ 3 250S/M		11/01 AY53872	
MOTOR INDUÇÃO - CAIXA INDUCT. MOTOR-SQUIRREL CAGE Hz 60		CAT N FS 1.00	
kW(HP-cv) 75(100)		RPM 1775	
ISOL F Δ 180 K Ip/In 8.8		IP55 ALT m	
220/380/440 V		245/142/123 A	
REG DUTY S1		MAX AMB	
 → 6314-C3 POLYREX EM-ESSO → 6314-C3 27 g 9789 h		462 kg	

Figura 3.1 – Identificação dos intervalos (em horas de operação), modelo de rolamento utilizado e a quantidade de graxa são expressos na placa de identificação do motor (WEG, 2022).

A seguir será mencionado um método para definir a vida útil do rolamento do motor, bem como a vida útil do estator.

3.2.1 VIDA ÚTIL DO ROLAMENTO

EASA (2002), diz que a vida útil do rolamento depende de alguns fatores: i) velocidade de rotação, ii) carga dinâmica, iii) qualidade do lubrificante, iv) carga de impacto e v) tamanho do rolamento. A indústria de rolamentos utiliza uma expressão para prever a vida útil do rolamento, chamada de vida L10. Essa expressão leva em consideração que a causa final da falha do rolamento é a fadiga submetida do material. Esta fadiga pode ser ocasionada por: i) calor excessivo, ii) falta de lubrificante e ii) cargas excessivas.

O termo vida L10 é conhecido como o tempo estimado para cada 10% de uma grande quantidade de população de rolamentos que irá falhar. Para uma vida L10 de um ano, há 10% de possibilidades de os rolamentos falharem no primeiro ano e metade falhar após 5 anos (L50). A fórmula de vida L10 pode ser expressa como:

$$L10 = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (3.3)$$

Para rpm constante, L10h é dado por:

$$L10h = \left(\frac{100.000.000}{60n}\right) \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (3.4)$$

Sendo, L_{10} vida nominal básica, em milhões de rotação; p para rolamentos de esferas $p = 3$, para rolamentos de rolos $p = (10/3)$, C classificação de carga dinâmica do rolamento, P carga de rolamento equivalente, n velocidade de rotação em rpm, considerando que rpm é o número de voltas que um eixo dá numa engrenagem por minuto.

Segundo EASA (2002), a indústria usa a vida útil L_{10} há muito tempo, para uma seleção apropriada para cada aplicação, a fim de garantir de forma satisfatória a vida útil do rolamento. Na Figura 3.2 a) mostra um exemplo de rolamento com falha por fadiga de utilização (estresse mecânico) e b) um rolamento por falha de estresse ambiental, causado por poeira, contaminantes secos finos que absorvem o óleo e engrossam a base da graxa.

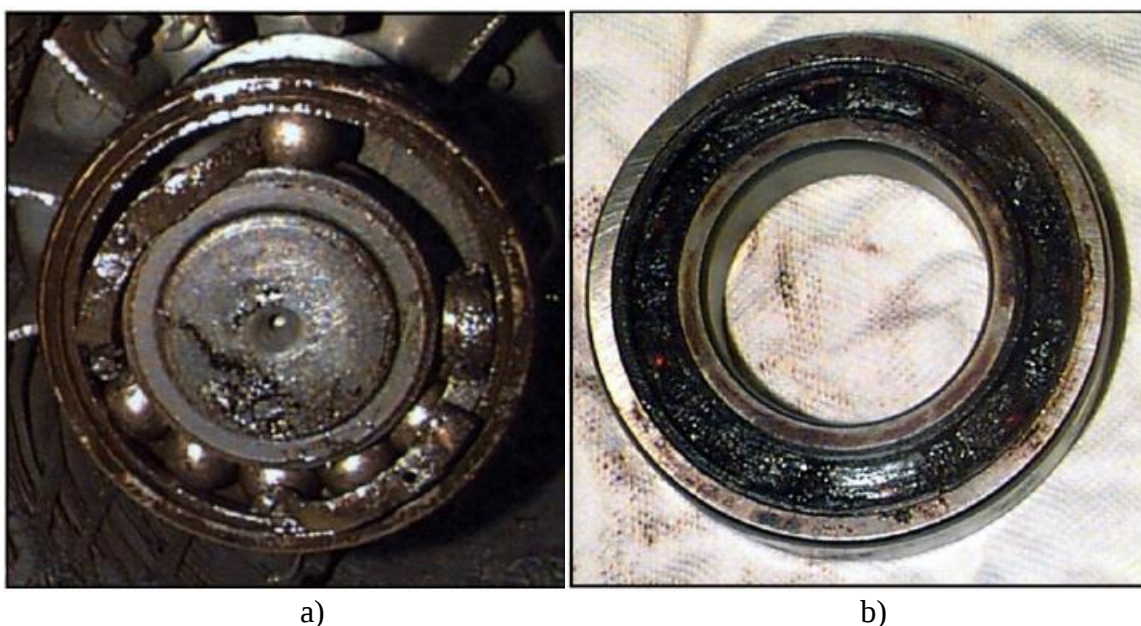


Figura 3.2 – a) Rolamento com falha por estresse mecânico e b) Rolamento com falha por estresse ambiental (EASA, 2002).

3.2.2 VIDA ÚTIL DO ESTATOR

EASA (2002), diz que a vida útil do estator depende de alguns fatores de estresse vistos na seção 3.1 *Classificação de Falhas em Máquinas Elétricas*. Um motor que está sob o efeito do estresse térmico, por exemplo, quanto maior for a temperatura, maior será a tensão térmica e maior a possibilidade de falha antecipada do enrolamento do motor de indução.

O estresse térmico possui alguns estresses básicos que impactam na vida útil do enrolamento do estator, como o envelhecimento térmico. Este está presente de forma permanente no motor, mesmo quando está fora de operação. Quando o motor está parado

uma taxa de envelhecimento é determinada pela temperatura ambiente de exposição. E, quando o motor está em operação, está em condições de fator de serviço que é limitado pela temperatura média do enrolamento em 155°C (Classe F).

EASA (2002), cita que o motor está sobre outros estresses quando o motor está operando, como as mecânicas e ambientais. Durante a vida do motor, em algum momento, o envelhecimento térmico tornará o enrolamento do estator mais suscetível aos estresses mecânicos e ambientais e, quando isso ocorrer, o enrolamento do estator perderá a isolamento e começará a entrar em curto-circuito entre espiras e com a terra.

Na Figura 3.3 é mostrada as curvas de vida útil da temperatura referente ao isolamento de enrolamento do estator de um motor. Pode-se verificar que a cada 10°C de redução de temperatura de isolamento do estator, a curva de vida útil do isolamento dobra de valor.

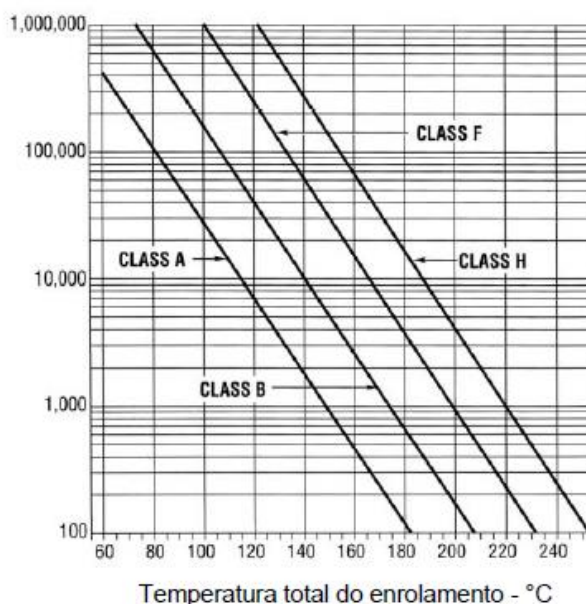


Figura 3.3 – Temperatura versus curvas de vida para sistema de isolamento (EASA, 2010).

Na Figura 3.4, se tem um exemplo de um enrolamento do estator que passou por um processo de estresse térmico que, por sua vez, gerou um superaquecimento e consequentemente danos em todas a bobinas.



Figura 3.4 – Temperatura versus curvas de vida para sistema de isolamento (EASA, 2010).

3.3. TIPOS DE MANUTENÇÃO

Como ferramenta de análise há alguns tipos de manutenções que geralmente são empregados na planta industrial com foco no prognóstico da ocorrência de falhas. Há algumas metodologias conhecidas: a primeira delas é a manutenção corretiva, onde há uma falha no equipamento. Outra também conhecida é a manutenção preventiva, em que há um planejamento temporal. A terceira delas é a manutenção preditiva, em que seguem condições predeterminadas para a realização (DEKHANDJI et al., 2019).

3.3.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA

De Almeida (2018), diz que a manutenção corretiva é um conjunto de procedimentos que são executados com o objetivo de tratar imediatamente a produção, a máquina ou o equipamento que parou. Com a ação imediata da equipe de manutenção para restabelecer seu funcionamento o mais rápido possível.

Da Silva et al. (2008), citam a forma que deve ser feita a manutenção corretiva: i) estipular paradas programadas, fazendo um *checkup* geral nos equipamentos, ii) realizar em instalações onde operam como unidade única ou sendo separadas em partes durante o processo de fabricação e uma unidade corrige o defeito sem afetar diretamente o processo de fabricação.

No caso de instalações que trabalham com vários dispositivos com funções semelhantes, pode-se concluir que trocar o MIT quando este parar é mais barato, mais fácil

e mais rápido, para uma posterior substituição por outro motor reparado ou novo. O motor substituído será reconstruído e continuará a operar no futuro. Os autores destacam que deve ser realizado um planejamento do método de reparo, bem como a preparação das ferramentas necessárias para a manutenção corretiva.

3.3.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

De Almeida (2018), diz que a manutenção preventiva é a manutenção planejada e controlada, realizada em datas programadas, para manter as máquinas ou equipamentos em condições adequadas de funcionamento e proteção e evitar paradas não planejadas. Esta manutenção planejada evita possíveis perdas devido a falhas mecânicas, que podem acarretar transtornos ou até mesmo falha total do MIT.

Da Silva et al. (2008), dizem que a manutenção preventiva é dividida em duas formas básicas, com tempos pré-estabelecidos: i) manutenção sistêmica e ii) manutenção preditiva. A manutenção sistêmica é baseada em períodos de tempos pré-determinados quando o motor ou seus componentes sofreu falha por desgaste, por exemplo, a substituição dos mancais antes do travamento do motor. Já a manutenção preditiva, os autores dizem que este tipo de manutenção são realizadas em períodos de tempos predeterminados.

Da Silva et al. (2008), mencionam que a substituição planejada é um modelo de manutenção preventiva, aplicado no setor industrial, principalmente, em motores de grande porte, na qual este motor responde pela unidade principal da unidade operacional da qual está situada. Neste tipo de manutenção preventiva os autores dizem que devem ser seguidos critérios técnicos e administrativos para a execução que são: i) conferir a base de dados de motores para suporte da empresa utilizado no processo produtivo, ii) ter informações de dados de fabricantes ou fornecedores, iii) a manutenção deve ser planejada em dia específico de parada do processo produtivo, iv) devem estar disponíveis as partes ou o conjunto total das peças que serão substituídas no momento da manutenção, v) também deve estar disponível as ferramentas necessárias, os instrumentos de medição e aferição e vi) os técnicos responsáveis que conhecem o processo produtivo na empresa.

3.3.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA

De Almeida (2018), diz que a manutenção preditiva é indicada para definir as reais condições de funcionamento da máquina de acordo com dados obtidos através de fenômenos apresentados pelo motor em funcionamento. Quando por exemplo, uma peça começa a se desgastar ou alguma regulagem é necessária, ou mesmo quando a equipe de manutenção já tem conhecimento do motor e sabe interpretar os sons que o motor emite. Na manutenção preditiva, pode-se dizer que é a previsão da falha do equipamento, e quando é tomada a decisão de intervir no reparo, o que ocorre de fato é a manutenção corretiva programada.

Na manutenção preditiva, ela também complementa a preventiva, pois trata-se de análise detalhada dos dados das máquinas, para prever a vida útil aproximada dos equipamentos e proporcionar eficiência por mais tempo. Da Silva et al. (2008), dizem que a manutenção preditiva é baseada em períodos de tempos predeterminados, onde a análise de testes realizados periodicamente permite que os parâmetros acompanhados representem a situação do motor. Pode-se citar como manutenção preditiva, as leituras da resistência de isolamento da bobina do estator do motor, a fim de, definir um parâmetro de expectativa de vida útil do isolamento do enrolamento.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim pôde-se apresentar os tipos de estresse as quais estão sujeitas o rotor e estator, a expressão de estresse nos motores chamada de TEAM (térmica, elétrica, ambiente e mecânica). Estas causam estresse durante um curto período de tempo ou durante a vida toda do motor, que geram falhas e impactam diretamente na sua vida útil. E como ferramentas de garantia, bom funcionamento e longevidade da vida útil do motor foram apresentados os tipos de manutenções mais conhecidas no campo industrial: i) corretiva, ii) preventiva e iii) preditiva.

Este capítulo foi produzido de forma a apresentar os aspectos principais de falhas em que os motores estão sujeitos e os impactos na vida útil do rotor e estator. Para que no próximo capítulo sejam apresentados os testes e ensaios mais conhecidos a fim de uma boa manutenção e vida útil dos motores de indução trifásicos.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS

Neste capítulo é descrito a evolução dos ensaios através de alguns equipamentos. Será realizado uma breve introdução sobre a importância de tais equipamentos para detecção de falhas em MIT, bem como o uso de cada equipamento e suas particularidades para análise. Será descrito sobre: i) megômetro analógico, ii) megômetro digital, iii) teste com equipamento *Alltest-Pro*, com foco no equipamento *Baker AWA-IV* para análise de circuito de motores (MCA).

4.1. EQUIPAMENTOS DE MEDIDA

A medição ou medir permite estabelecer a relação numérica entre as grandezas. Sendo elas de mesma espécie e tomando a relação numérica entre as grandezas como unidade de medida. E, o que permite essa relação é a utilização de determinados equipamentos para determinação de parâmetros e identidades elétricas (LEÃO, 2022).

4.1.1 MEGÔMETRO ANALÓGICO

Um método convencional e de uso comum para testes no MIT é a utilização do equipamento representado na Figura 4.1, conhecido como “megger” ou “megômetro” analógico. Este equipamento é fundamentalmente um ohmímetro de ímã permanente de bobinas cruzadas e uma manivela para impulsionar de forma manual a geração de energia para os ensaios. O megômetro também é utilizado para medir resistência ôhmica entre bobinas. Embora não seja capaz de gerar relatórios, suas leituras são precisas e independentes da tensão de alimentação (YOKOGAWA, s.d.).



Figura 4.1 – Vista do megômetro analógico (YOKOGAWA, s.d.).

Para se entender o megômetro, utiliza-se a lei de Ohm, para determinar a resistência de isolamento, onde se aplica uma tensão em corrente contínua e se mede a corrente que circula através do galvanômetro. O megômetro é fundamentalmente um ohmímetro de imã permanente e bobinas cruzadas. A tensão de alimentação e as bobinas de leituras são independentes e através de um campo magnético permanente o ponteiro percorre os pontos de leitura.

A Figura 4.2 mostra o esquema interno do gerador que é conduzido através de uma manivela manual que por força humana é girada para geração da tensão e corrente de teste. Embora o equipamento consiga fornecer os valores de tensões necessárias, os erros originários surgem durante a leitura, pois, o ponteiro analógico não para de se mexer, logo o teste deve ser realizado para cada condutor. O teste é realizado entre bobinas para verificar a presença de baixa isolação entre espiras e para verificar a baixa isolação entre carcaça (YOKOGAWA, s.d.).

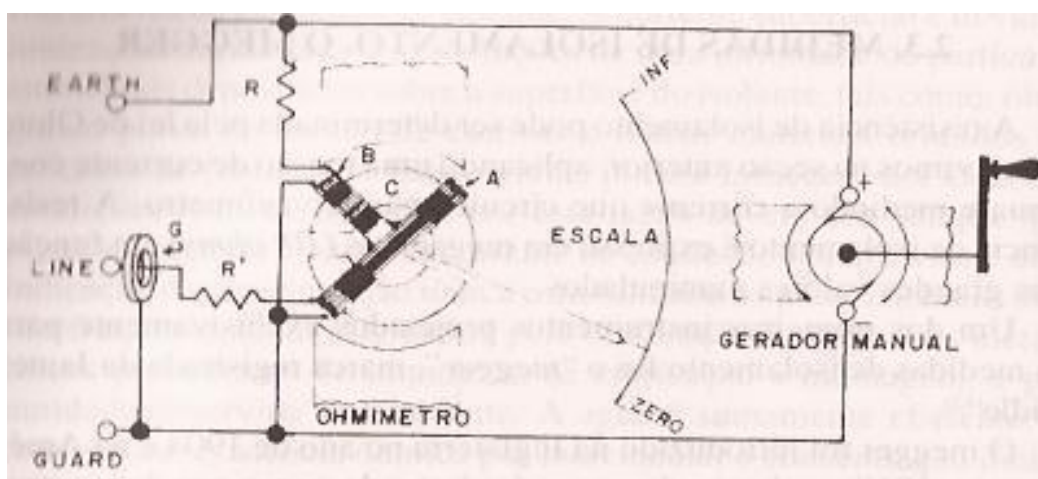


Figura 4.2 – Esquema interna do megômetro (YOKOGAWA, s.d.).

4.1.2 MEGÔMETRO DIGITAL

O megômetro digital representado na Figura 4.3 funciona com bateria interna e tem a capacidade de realizar ensaios manuais, além da análise de bobinas e resistência de isolamento. Entre as suas configurações de níveis de tensão desejadas se tem a aplicação de tensão em rampa e um display que facilita a leitura de dados, onde se melhora as condições de testes e leituras com precisão (FLUKE, 2010).



Figura 4.3 – Megômetro digital FLUKE (FLUKE, 2010)

Com o uso do megômetro digital, utilizando as duas pontas para teste, é possível realizar os testes de índice de polarização, absorção dielétrica e teste de ruptura elétrica em modo de rampa. As tensões são aplicáveis entre 250 V a um valor de 10.000 V. O *display* indicador digital permite ainda acompanhar através de barras a leitura de resistência. Posteriormente, os dados devem ser coletados e anotados para análise de resultados (FLUKE, 2010).

4.2. TESTES DE MCA

O teste de análise de circuito de motores da sigla (MCA) permite ir além de outros equipamentos, predizendo falhas ocultas. Através de assinaturas é possível detectar pontos fracos e falhas no isolamento do MIT. Sendo essencial para a manutenção preditiva garantindo as condições físicas do bobinado (MEGGER, 2022).

4.2.2 TESTE DE MCA EM MIT COM ALLTEST-PRO

O *Alltest-Pro* representado na Figura 4.4 é um instrumento de teste *MCA offline* que fornece um conjunto de testes separados para testes *online*. O *Alltest-Pro* é um conjunto de testes de (LV) de baixa tensão e ele não inclui qualquer teste de alta tensão. Portanto, o teste de resistência ao isolamento está limitado a 1.000 V. O objetivo principal do *Alltest-Pro* é detectar defeitos de isolamento que indiquem o desenvolvimento de sinuosos: i) sinuosos existentes, ii) contaminação sinuoso, iii) isolamento a falhas a terra e iv) falhas no rotor. O *ALL-TEST Pro* também fornece o *ALLTEST-PRO OL* (ATPOL) para testes *online* (ALLTEST, 2019).



Figura 4.4 – Instrumento de teste de análise de circuito de motor desenergizado *AllTest-Pro*(ALLTES, 2019).

Basicamente, este equipamento realiza os seguintes testes: i) ensaio de resistência ao isolamento (sem correção da temperatura), ii) resistência sinuosa e balanço, iii) indução e desequilíbrio, iv) impedância e desequilíbrio, v) ângulo de fase (ϕ), vi) resposta de frequência atual I/F, vii) capacidade para o solo medido em corrente contínua (DC - *Direct Current*), viii) fator de dissipação. E, este equipamento não é capaz de não medir (PI) Índice de polarização e (DA) Absorção Dielétrica (ALLTEST, 2019).

4.2.3 TESTE DE MCA COM BAKER AWA-IV

O instrumento utilizado neste trabalho, o analisador de MIT, o *Baker AWA-IV* (Megger), representado na Figura 4.5, é um instrumento que possui as maiores variedades de testes. Este permite realizar todos os ensaios do MIT em um só instrumento de forma automatizada e testes repetíveis e programáveis pelo usuário, buscando de tal forma analisar minuciosamente as condições de motores.



Figura 4.5 – *Baker AWA-IV* (MEGGER, 2021).

A utilização do *Baker AWA-IV* dispensa a necessidade de uso de qualquer outro instrumento para teste, desde um multímetro a um megômetro, baseado nas normas do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE).

Tal instrumento dispõe de testes de alta performance como: i) provas de balanço de resistência (Método *Kelvin*) baseando nas recomendações de referências IEEE STD 118 (1978), IEEE STD 56 (1977), ANSI/EASA STD AR100 (2020), ii) provas com megômetro para resistência de isolamento com referências IEEE STD P43 (2000), iii) índice de polarização e absorção dielétrica com referências IEEE STD P43 (2000), iv) provas de tensão por escala (*Step Voltage*) de Hipot com referências IEEE STD 95 (2002), NFPA 70B (2019), ANSI/EASA STD AR100 (2020) , v) *surge test* (prova de impulso) com referências IEEE 522 (2004), NFPA 70B (2019), EASA 2020. (SALES, 2021).

4.3. MÉTODOS DE ENSAIOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS - MIT

Nesta seção será apresentada informações sobre o equipamento de pesquisa *Baker AWA-IV* e será explicito os testes realizados com suas importâncias, sendo o: i) teste de balanço de resistência (Método *Kelvin*), ii) teste de resistência de isolamento, iii) índice de polarização e absorção dielétrica, iv) as provas de tensão por escala (*StepVoltage*) Hipot e v) *surge test* (prova de impulso). Levando em consideração que, a medição de indutância e capacitância, a medição de descargas parciais é realizada dentro do *surge test* (SALES, 2018).

4.3.1 TESTE DE BALANÇO DE RESISTÊNCIA (MÉTODO KELVIN)

Com o teste de balanço de resistência de isolamento é possível detectar falhas de forma a predizer o que possa ocorrer ou que já foram ocorridas através do desequilíbrio de resistência em número de voltas por fase. Esta predição ocorre nos seguintes aspectos: i) curto-circuito no núcleo do motor, ii) curto-circuito entre as bobinas, iii) curto-circuito na mesma bobina, iv) identifica diâmetro de cobre diferentes em motores rebobinados, v) falha em conexões internas das bobinas com alta resistência, vi) falha nas conexões internas do fechamento abertas, entre curvas e vii) através de análise de tendências históricas (PEÑA, 2012).

No teste de resistência é utilizada a expressão 4.1 para definir a aprovação ou reprovação do MIT. Os valores estabelecidos para aprovar ou reprovar um MIT são

definidos da seguinte forma: i) para motores novos são utilizados $< 1\%$ (menor que um por cento) para taxa de aprovação, ii) motores reformados $< 3\%$ (menor que três por cento); iii) motores em serviço $< 10\%$ (menor que dez por cento), iv) *Delta* é o resultado do desvio em porcentagem, v) $R_{max} - R_{min}$ é resistência máxima subtraído pela resistência mínima, é o desvio máximo das médias registradas e, vi) ($R_{average}$) resistência média (SALES, 2018).

$$Delta = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{average}} * 100\% \quad (4.1)$$

A medida elétrica conhecida como resistência é baseada no Sistema Internacional de Medidas Elétricas (SIME) e mantidos por todos os países que aderiram a Convenção Internacional de Medidas.

A cooperação entre tais países foi realizada por meio da Conferência Geral Internacional de Pesos e Medidas, em *Sèvres* - França, onde ficou definido que os responsáveis pelo escritório internacional de pesos e medidas, contaria com o auxílio dos comitês consultivos e com o comitê consultivo de eletricidade (IEEE STD 118, 1978).

O primeiro laboratório de pesquisa em ciências físicas do governo federal dos Estados Unidos (USA), *National Bureau of Standards* (NBS) foi fundado pelo congresso em 03 de março de 1901 como laboratório doméstico de medição e padrões autorizados. Em 1988, o *National Bureau of Standards* foi renomeado para *National Institute of Standards and Technology* – NIST (HISTORY, 2022).

O NBS, é o responsável por estabelecer e manter padrões para as unidades elétricas legalizadas, é a autoridade final nos Estados Unidos. Para manter seus padrões de valores em outros países a autoridade legal é concedida às Agências Nacionais de Padronização (IEEE STD118,1978).

No ano de 1948, através do acordo internacional, foi adotado o valor da unidade de resistência como uma aproximação insignificante por um conjunto de resistores padrão. Desta forma, foi determinado o *ohm* absoluto e antes desse acontecimento, a unidade era adotada como *ohm* internacional e continha 495ppm, maior que a unidade atual.

Nos testes realizados pelo NBS e outros laboratórios nacionais de normalização, chegou-se à conclusão de que o valor da unidade legal deve ser diferente da unidade do Sistema Internacional de Medidas (SI), dependendo diretamente dos resultados obtidos das

medidas, logo, isso significa que é improvável que duas unidades sejam diferentes por mais de 1ppm (IEEE STD 118,1978).

4.3.2 TESTE DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

A partir dos testes de resistência de isolamento o (*megohm*) é possível diagnosticar falhas através da medição de resistência ao aterramento. Através de baixa resistência e através de dados históricos, determinar falhas de possível contaminação na superfície de bobinas.

Esta predição ocorre nos seguintes aspectos: i) defeito no revestimento ou encapsulamento das ranhuras do estator na acomodação da bobina, ii) fios da bobina com defeito de isolação durante esmaltagem, iii) curto-circuito ou perda de esmalte na mesma bobina, iv) rompimento ou perda parcial de parte do condutor, v) falha entre conexões internas de fechamento das bobinas e borne da caixa de ligação, vi) falha causadas por presença de contaminantes, pó, carbono, água ácido, e materiais condutivos e vii) uso de esmalte de má qualidade na rebobinagem do motor (PEÑA, 2012).

Estes testes são semelhantes à tensão de operação em corrente contínua, útil para criar tendências e não determina se o motor está totalmente em boas condições ou se existem falhas entre as voltas internas da máquina.

O teste de resistência utiliza-se do teste de tensão direta para a medição da resistência de isolamento, a tensão de teste não pode ultrapassar os valores prescritos para cada enrolamento de acordo com sua tensão nominal. É importante manter essa observação para motores de baixa tensão ou motores com enrolamento úmidos. O teste pode sobrecarregar o isolamento se a tensão aplicada for muito alta podendo causar danos a estrutura do enrolamento.

A Tabela 4.1 apresenta os níveis de tensão nominal, linha a linha, para máquinas trifásicas (CA) de corrente alternada. Tensão de linha a terra, tensão para máquinas monofásicas e tensão contínua nominal para máquinas (CC) ou enrolamentos de campo. Para isso, se tem diretrizes para tensões diretas a serem aplicadas durante o teste de resistência de isolamento e as leituras da resistência de isolamento que são feitas para tensão de teste aplicada por 1 min (IEEE STD 43, 2013).

Taxas de tensão do enrolamento	Tensão direta de teste de resistência de isolamento
<1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12 000	2500 – 5000
>12 000	5000 – 10 000

Tabela 4.1 – Diretrizes para tensão direta (IEEE STD 43, 2013).

4.3.3 ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO E ABSORÇÃO DIELÉTRICA

O teste de índice de polarização e absorção dielétrica é realizado para medir a capacidade de polarização entre o enrolamento. Este método busca os seguintes aspectos: i) deterioração no isolamento impedindo a polarização, ii) fios com ressecamento e fissuras de esmalte, iii) umidade entre as bobinas, e iv) contaminação entre as bobinas e carcaça do motor levando fuga a terra,

Este teste é similar a utilização do megômetro, porém, a duração dos testes é determinada no tempo de 10min/1min para (PI) Índice de Polarização e de 3min/30s para (DA) Absorção Dielétrica. Embora os dois testes serem semelhantes, estes são aplicados com tempos diferentes (SALES, 2018).

A Tabela 4.2 mostra a tabela de classe de isolamento e representação de valores mínimos recomendados de Índice de Polarização para todos os componentes de máquina classes de isolamento conforme IEEE 43-2000 (IEC 60085-01, 1984).

Classificação da classe térmica	P/ mínimo
Classe A	1,5
Classe B	2,0
Classe F	2,0
Classe H	2,0

Tabela 4.2 – Classe de isolamento (IEC 60085-01, 1984).

O Índice de Polarização representados na expressão 4.2, é a variação do valor da resistência de isolamento com o tempo. Tradicionalmente os valores definidos para o quociente da resistência de isolamento no tempo de (10) dez minuto (IR_{t2}), dividido pela

resistência de isolamento no tempo de (1) um minuto (IR_{t1}), testada a uma temperatura relativamente constante. Por convenções de unidade de tempo é determinado que os valores abaixo de 14 são considerados em minutos, para os valores igual e maiores que 15 são considerados em segundos, sendo: i) (PI) Índices de Polarização, ii) (IR_{t2}) resistência de isolamento tempo 2 e iii) (IR_{t1}) resistência de isolamento tempo 1 (IEEE STD 43, 2000).

$$PI = \frac{IR_{t2}}{IR_{t1}} \quad (4.2)$$

As leituras do IP se aplicam a enrolamentos CA e CC novos, e para MIT em serviço que são encapsulados em isolamento. O PI é o indicativo da inclinação da curva característica demonstrada na Figura 4.6.

Se os enrolamentos estiverem limpos e secos, a corrente total (I_T) normalmente diminui com o tempo, uma vez que, a corrente total é dominada pela corrente de absorção ou seja, polarização (AD). O índice de polarização (PI) é tradicionalmente definido como a razão entre a resistência de isolamento de 10min (IR_{10}) para a resistência de isolamento de 1 min (IR_1), testada a uma temperatura relativamente constante.

Em materiais de isolamento mais antigos como a mica asfáltica, as correntes de absorção geralmente levam 10 min ou mais para decair para quase zero (IEEE STD 43, 2000).

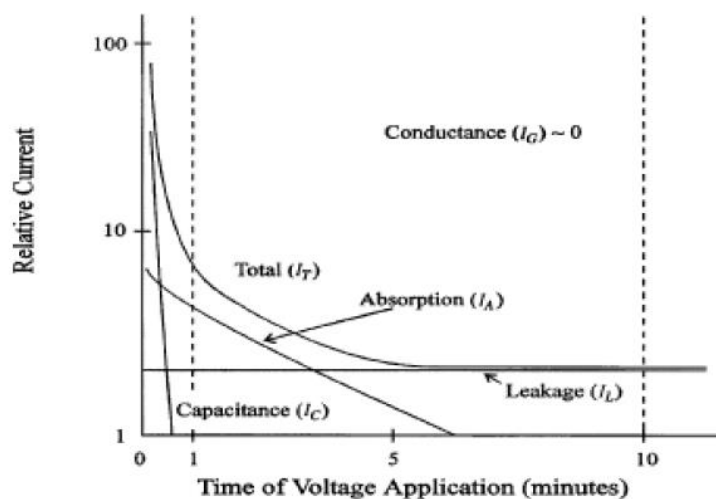


Figura 4.6 - Tipos de correntes para um isolamento epóxi-mica com uma corrente relativamente baixa (IEEE STD, 2000).

A corrente de Absorção (DA) apresentada na expressão 4.3 é a corrente resultante da polarização molecular e do fluxo de elétrons, o qual diminuem com o tempo a partir de um valor inicial relativamente alto até zero quando o tempo é suficientemente grande. Esta corrente depende do tipo e da condição do material usado no sistema isolante, sendo: i) I_A índice de absorção dielétrica; ii) K depende do sistema de isolamento e da tensão aplicada; iii) t tempo de aplicação de tensão e iv) $-n$ depende do sistema de isolamento (ZAMBRANO, 2015).

$$I_A = Kt^{-n} \quad (4.3)$$

Para que seja realizado o teste de (IA) índice de absorção dielétrica é preciso que a resistência obtida seja superior a 5.000 MΩ (mega ohm) durante um minuto, que é semelhante ao (IP) índice de polarização, mas, com os valores em 30 segundos e 3 minutos.

Em medição de tempos longos (> 10 min) maior que dez minutos, o valor de (AD), índice de absorção dielétrica, geralmente é baixo. Este valor é suficiente para que a corrente total se aproxime assintoticamente do valor da corrente de condução direta que é a soma da fuga de corrente ao longo dos braços terminais, (IL) corrente de condutância e (IG) através do volume de isolamento. Elas constituem a corrente de condução finita constante que é observada com sistemas isolantes sob uma constante de tensão quando aplicado por longos períodos (ZAMBRANO, 2015).

4.3.4 PROVAS DE TENSÃO POR ESCALA (STEPVOLTAGE) HIPOT

Com o uso do instrumento Hipot podem ser detectados as seguintes falhas: i) de isolamento ligadas a rigidez dielétrica do isolamento ii) rachadura ou fissura no bobinado, iii) contaminação da superfície do bobinado, iv) esmalte ou resina mal curada, v) umidade interna no conjunto de bobinas, vi) defeito de laminação do estator e vii) perfurações no isolamento das bobinas podendo levar fuga a terra.

A Figura 4.7 demonstra o gráfico do teste de isolamento de tensão de passo (IEEE STD 95, 2002). O teste não é capaz de detectar falhas entre voltas ou curtos, no entanto, avalia apenas a isolação entre os condutores e a parede da ranhura do núcleo do estator. E equipamentos eletrônicos não podem estar conectados ao motor (ZAMBRANO, 2015).

Na Figura 4.7, é apresentada a tensão CC, esta é aplicada a todas as três fases do enrolamento. Ela é aumentada lentamente para um nível de etapa de tensão pré-programado e mantida por um período especificado. Esta tensão CC é então elevada para a próxima etapa de tensão e mantida pelo período especificado. Isso continua até que a tensão de teste alvo seja alcançada.

As etapas típicas para um motor de 4.160 V são incrementos de 1.000 V, mantendo-se em intervalos de um minuto. Para motores inferiores a 4.160 V, as tensões de passo devem ser de 500 V (MEGGER, 2013).

O teste de Hipot se divide em três partes, de forma que é possível escolher uma delas para utilização: i) o teste (HiPot) de alta potência de uso convencional é o teste que permite atingir a tensão de teste rapidamente, ele pode ser utilizado para a fabricação de bobinas e cabos, ii) o teste de (*Ramp HiPot*) rampa de alta potência, é o teste que permite aumentar a tensão lentamente (parametrizado pelo usuário), é o teste em que é possível identificar fugas de corrente na superfície sem a necessidade de atingir um nível crítico, iii) teste (*HiPot Step Voltage*) alta potência em degrau de tensão é o teste com índice de menor estresse que os demais, pois, a tensão a ser aplicada e o intervalo de tempo são predefinidos pelo usuário e, isso permite que as correntes de fuga também se estabilizem (ZAMBRANO, 2015).

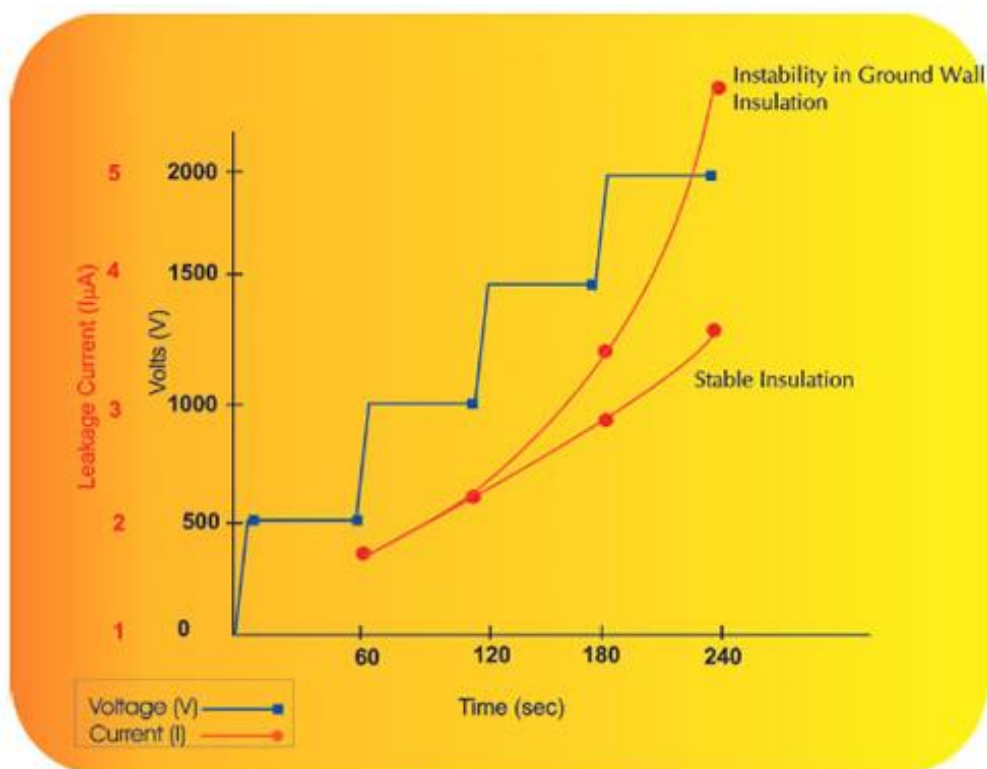


Figura 4.7 – Teste de isolamento de tensão de passo (ZAMBRANO, 2015).

Ainda no teste de Hipot, a medição de corrente é realizada durante o teste de alta tensão. Utiliza-se da corrente medida para a soma da corrente capacitiva geométrica, sendo elas a corrente de absorção e a corrente de condução.

A corrente capacitiva geométrica é a componente atribuível a capacitância entre o enrolamento e a terra e igual a taxa de variação da tensão aplicada multiplicada pela capacitância geométrica. A fórmula é representada na expressão 4.4, onde tem-se: i) i_c corrente capacitiva geométrica, ii) C capacitância geométrica e iii) $\frac{dv}{dt}$ Taxa de variação aplicada durante um período (IEEE STD 95, 2002).

$$i_c = C * \frac{dv}{dt} \quad (4.4)$$

A capacitância (C) varia de acordo com a geometria do condutor do núcleo, ou seja, depende do tamanho do enrolamento do estator, da forma e do espaçamento, onde a constante dielétrica relativa é aplicável.

O nível da tensão de teste, para a corrente de teste, quando atingir um valor constante, refletirá na resistência total entre o corpo de prova e a terra. Conforme evidencia a expressão 4.5 tem-se: i) R resistência do material, ii) ρ resistividade do condutor (ρ), iii) L comprimento do condutor ou caminho percorrido e iv) A representa a seção transversal do condutor (IEEE STD 95, 2002).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.5)$$

Ainda se pode perceber que a corrente capacitiva geométrica decai exponencialmente para zero em segundos após a primeira etapa de aplicação de tensão. Esta é uma corrente que geralmente não é considerada na avaliação, sendo a representação de uma energia reversível armazenada. A resposta da corrente de absorção a uma tensão escalonada é semelhante à resposta da corrente capacitiva geométrica, exceto que a corrente de absorção leva de minutos a horas para decair para um valor insignificante (IEEE STD 95, 2002).

Um outro teste com o uso do instrumento Hipot é o teste de tensão de passo. Este teste tem o tempo uniforme, envolvendo a aplicação direta de alta tensão em uma série de etapas e intervalos regulares. No final do intervalo de cada etapa é realizado as leituras de

corrente e a curva de corrente versus tensão, com a opção de se plotar graficamente durante e após o teste.

Na análise do gráfico a curva é indicativa de aumentos ou outras variações na corrente de condução versus a resposta da tensão aplicada, que pode indicar perda de dielétricos, indicando um enfraquecimento do isolamento (IEEE STD 95, 2002).

Ainda o teste de tensão de passo pode ser considerado um teste de etapas, no qual as etapas de tensão e os intervalos de tempo são de pequenos intervalos. A formação da rampa de tensão é formada à medida que a dimensão dos incrementos de tensão e tempo se aproximam de zero. Este teste também pode ser parametrizado de forma automática a tensão aplicada em um ponto preestabelecido.

Em uma análise do gráfico do teste de tensão de passo, através das dimensões do gráfico plotado nas variáveis X-Y, é possível verificar e analisar a corrente de isolamento versus a tensão aplicada. A aplicação de rampa ao invés de passos discretos de tensão e a linearização acontece de forma automática e os componentes geométricos capacitivos e de absorção da corrente. Isto para que as pequenas variações significativas na corrente medida sejam observadas (IEEE STD 95, 2002).

A *Baker Instruments* recomenda o uso de Hipot do tipo *Step Voltage* em motores elétricos (MEGGER, 2020). Para equipamentos em condições de trabalho, ao passar pela etapa de manutenção, a tensão de teste pode depender do tipo e condição do isolamento, do histórico do equipamento e da confiabilidade do serviço desejado.

Em geral, o teste de tensão alternada varia entre 125% a 150% da tensão nominal em (rms). A tensão (E) de linha a linha provou ser adequada, isso é aproximadamente igual a valores de 65% a 75% da expressão $2E + 1.000 \text{ V}$, dependendo da tensão nominal do equipamento a ser testado. A tensão é aplicada de forma direta e o valor de teste para manutenção é 1,7 vezes o valor de teste de manutenção, de tensão alternada (rms) em frequência de 50 Hz ou 60 Hz (IEEE STD 95, 2002).

4.3.5 SURGE TEST (PROVA DE IMPULSO)

No ano de 1889 surgiu a Lei *Pashen*, esta lei diz que a tensão disruptiva de folhas em paralelo envolto em gás, como uma função da pressão e da distância entre eles, prevê a existência de uma tensão de ruptura mínima para um certa pressão e separação.

Com isso, o teste de surto tem uma função ideal para encontrar a falha no isolamento de arco voltaico. Neste caso, o isolamento do motor mostra-se fraco ao falhar

no teste de surto, mas não se tornou curto franco ou curto metálico (quando não existe a resistência de falta entre a fase e a terra). Por isso este isolamento ainda pode conter um baixo nível de isolamento podendo ser recuperado, embora, pouco tenha sobrado.

Para análise dos testes com motores com rotor, não se compara as formas de onda finais (Linha - Linha EAR). As falhas podem ser detectadas de espiras para a espira, de fase para fase e de bobina para bobina. Uma vez que, para motores sem rotor, deve-se comparar formas de onda finais (Linha - Linha EAR). O teste de surto pode detectar falhas nos seguintes aspectos: i) espira para espira, ii) fase para fase, iii) bobina para bobina, iv) bobinas invertidas, v) curtos entre espiras, vi) desbalanço de fases, vii) números de voltas diferentes, viii) diâmetro dos condutores cobre diferentes e ix) curtos com as lâminas (ZAMBRANO, 2015).

A Figura 4.8 apresenta a chamada de curva de *Paschen*, ela mostra a tensão de ruptura versus espaçamento de ar no padrão temperatura e pressão para um campo uniforme. Antes que haja uma chance de formação de um arco em um dielétrico gasoso, uma tensão mínima deve ser aplicada através de uma lacuna ou fissura. Essa tensão mínima é chamada de “mínimo de *Paschen*”, o nível de tensão mínima é de aproximadamente 350 V (WILSON, 2003).

Na expressão 4.6 está representado a tensão V que é o terminal através da bobina, L é a indutância da bobina e $\frac{di}{dt}$ é a taxa de tempo de mudança do pulso de corrente. Segundo Wilson (2003) descobriu-se que ao diminuir o espaço entre as folhas à pressão normal, criou-se um arco elétrico com o mínimo de distância. Sendo que, o mínimo cotado para uma pressão atmosfera e uma separação é de 7,5 μm é 327 V (SALES, 2021).

$$V = L * \frac{di}{dt} \quad (4.6)$$

A tensão de teste também deve atender aos requisitos para aplicação da Lei de *Paschen*. Ou seja, pelo menos 350 V por volta, sem exceder a tensão de teste para o isolamento em relação à terra. Esta lei afirma que a uma temperatura constante, a tensão de ruptura é uma função apenas do produto da distância entre eletrodos planos paralelos (SALES, 2021).

Para que esta lei se relacione com o teste de surto, a Lei de *Paschen* significa que uma tensão aplicada não pode preencher espaços de duas placas planas. Ou seja, espiras

em curto, com um certo espaço entre elas até que a tensão seja elevada acima de um nível mínimo. Este mínimo é de 350 V por volta.

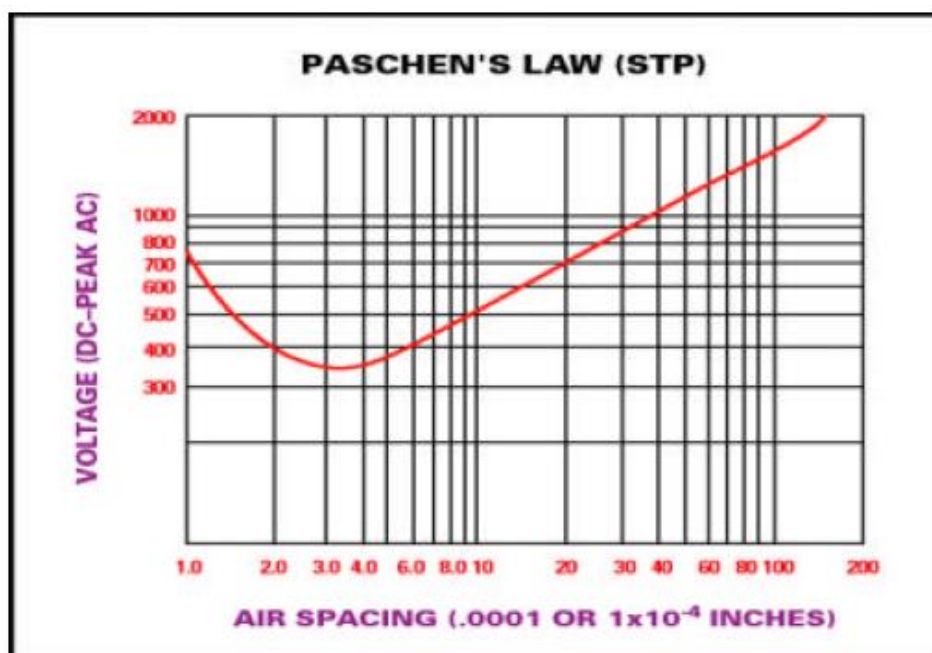


Figura 4.8 – Gráfico curva de *Paschen* (WILSON, 2003).

Representado na expressão 4.7, para uma armadura deve ser aplicado 500 V, a tensão de teste de surto deve ser aplicada (2 x tensão nominal) + 1.000 V. Esta tensão se aplica a uma bobina de enrolamento novo, e para um enrolamento que está em serviço, uma vez que, este é considerado um ensaio não destrutivo (EASA, 2007).

$$A_{\text{armadura}} = (2 * T_{\text{tensão nominal}}) + 1000V \quad (4.7)$$

Por padrão o teste de surto necessita exceder a Lei de *Paschen*, para isso é determinado o número de barras do comutador em cada lado das pontas de teste. Os níveis de tensão em volts por barra serão o mínimo de 350 V por volta e será dividido pelo número de voltas no enrolamento. Se o número de voltas não for conhecido, suponha que ele tenha uma volta, nesse caso deve ser usado 2.000 V e 350 V por barra para uma bobina de 1 volta (EASA, 2007).

O princípio de funcionamento do *surge test* inicia-se a partir de uma corrente que é aumentada rapidamente. Quando aplicada a uma bobina e a uma tensão que será gerada através da bobina pelo princípio da indução, esta tensão na bobina é dada pela expressão 4.6.

A tensão nos terminais da bobina é a soma da tensão induzida criada entre laços individuais na bobina. Se o isolamento entre as bobinas adjacentes for fraco e se a tensão induzida for maior do que a rigidez dielétrica nessa bobina, será formado um arco entre as bobinas. O equipamento de teste de surto é projetado para criar a tensão induzida entre bobinas adjacentes e detectar o arco indicativo do ponto fraco ou falha do isolamento.

O capacitor interno é carregado em uma tensão conhecida pela fonte de alimentação. Em um momento específico, um interruptor de alta tensão se fecha, transferindo a carga do capacitor através dos enrolamentos da bobina.

Se as resistências e a perda de todo o circuito são tais que o sistema estiver sob amortecimento, a carga será capaz de fluir através do indutor, para o outro lado do capacitor, resultando em uma oscilação. Este processo de toque se repetirá até que as resistências e perdas no circuito absorvam completamente toda a energia que estava originalmente no capacitor. A medição da tensão terminal da bobina versus o tempo fornece a forma de onda de surto, que mostra a oscilação amortecida (WILSON, 2003).

A frequência de toque da forma de onda senoidal amortecida é representada de acordo com a fórmula 4.8:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)} \quad (4.8)$$

Se o isolamento entre as voltas da bobina falhar com um arco de período curto entre duas voltas na bobina, uma fração da indutância será curto do circuito representado na Figura 4.9.

Da equação 4.8 a frequência de toque f aumentará à medida que a indutância diminuir devido ao curto. Um aumento na frequência de toque se mostrará como um salto para a esquerda do padrão de toque. Esse aumento súbito na frequência de toque que é a indicação da falta espira de arco. Dependendo da bobina e da localização de um arco curto, a magnitude da forma de onda de surto também pode diminuir. A instrumentação aumentará lentamente a tensão de teste e procurará o aumento do toque frequência.



Figura 4.9 – Bobina interpolar para representar a medição *surge test* (MEGGER, 2013).

O teste de comparação de impulso (*Surge*) pode detectar defeitos entre espiras de uma bobina, entre bobinas, entre grupos de bobinas e entre fases dos enrolamentos que não podem ser detectadas pelo teste de resistência de isolamento, absorção dielétrica ou teste de sobretensão – Hipot (PEÑA, 2012).

O teste de surto consiste então em aplicar nos enrolamentos por tempos determinados, impulsos de alta corrente muito rápidos, este pulso de corrente causa uma diferença de tensão entre as espiras que fazem parte do enrolamento. A diferença de tensão será alta o suficiente para criar um arco elétrico se a isolação entre 2 espiras, fases ou bobinas for fraca. O arco elétrico causará uma mudança no padrão de onda exibido pelo equipamento. A Figura 4.10 representa o curto entre espiras causado por falha no isolamento (PEÑA, 2012).



Figura 4.10 – Curto ente espiras (PEÑA, 2012).

O teste de impulso é realizado com um gerador de impulsos e uma tela onde será mostrado o padrão da onda formada pelo aumento dos impulsos representado na Figura 4.11.

As mudanças na forma de onda quando há um problema entre as curvas podem ser, um deslocamento do padrão de onda para a esquerda ou uma diminuição na amplitude da onda. O padrão de onda observado durante um teste de impulso ou surto está diretamente relacionado à indutância da bobina. Existem outros fatores que influenciam o padrão da onda, mas principalmente a indutância (PEÑA, 2012).

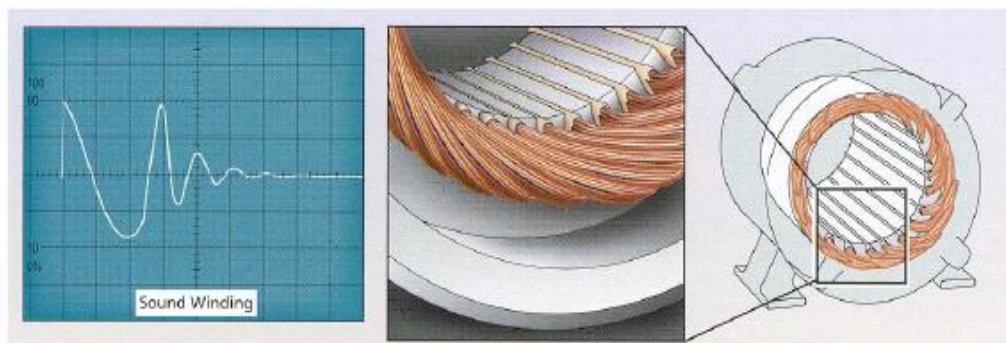


Figura 4.11 – Forma de onda de um bom enrolamento (ZAMBRANO, 2015).

Quando há um curto entre espiras, haverá menos espiras em uma bobina, o que causará uma mudança na indutância da bobina e um aumento na frequência representado na Figura 4.12. A tensão ou amplitude do padrão de onda é diminuída pela mudança na indutância. Quando o isolamento entre espiras é fraco o resultado é um arco de baixa energia e uma mudança na indutância. Quando isso ocorre, o padrão de onda torna-se instável, pode deslocar-se rapidamente para a esquerda e para a direita e em seguida retornar à posição original (ZAMBRANO, 2015).

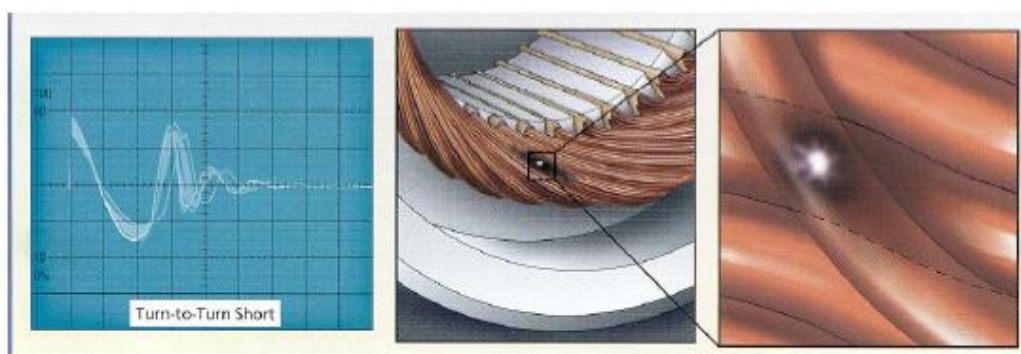


Figura 4.12 – Forma de onda de um enrolamento problemático (ZAMBRANO, 2015).

O erro EAR (Linha – Linha) tem uma boa aplicação em testes de motores sem rotor. Quando o rotor está instalado no motor a relação de acoplamento é apresentada pelo magnético que não é igual entre o rotor e o estator. Isto devido a posição das barras do rotor versus as ranhuras do estator, criando uma taxa de engajamento diferente para cada uma das três ondas senoidais correspondente a cada linha do motor.

Alguns motores apresentam mais problema do que outros. Para motores com enrolamento concêntrico o cálculo do erro *EAR* pode mostrar um alto valor devido a diferença geométrica das bobinas durante sua fabricação. Por isso deve-se verificar o balanceamento resistivo de enrolamento (ZAMBRANO, 2015).

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As teorias contextualizadas neste capítulo apresentam formas de testes em motores de indução trifásica. Os equipamentos foram apresentados de forma a demonstrar métodos diferentes e seus usos. A diferença de cada teste apresentado serve para demonstrar a importância e a evolução dos equipamentos. A utilização do equipamento *Baker AWA-IV* com opções avançadas de testes, sobressai sobre os demais equipamentos apresentados.

A apresentação de cada teste a partir do uso do instrumento *Baker AWA-IV* nos possibilita que seja realizado, análises eficazes e preditivas sobre o MIT. A explanação de cada teste é teorizada e fundamentada em normas internacionais. Este capítulo foi desenvolvido de forma a embasar teoricamente cada passo que o equipamento executa, visto que, este conhecimento seja utilizado para análise, entendimento e interpretação dos Capítulos 5 e 6.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito o método utilizado para a realização deste trabalho. Utilizando o equipamento *Baker AWA-IV* será apresentado as etapas para a realização de ensaio da máquina de indução. Desde a escolha do MIT até a conexão do instrumento de análise aos terminais da máquina elétrica rotativa, com a finalidade de coleta dos dados preditivos.

5.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO

A Figura 5.1 representa cada passo a ser seguido para a realização do procedimento de teste com a utilização do equipamento *Baker AWA-IV*. De forma a contextualizar cada item, os aspectos e parâmetros definidos estão descritos abaixo para fornecer informações importantes a respeito do teste.

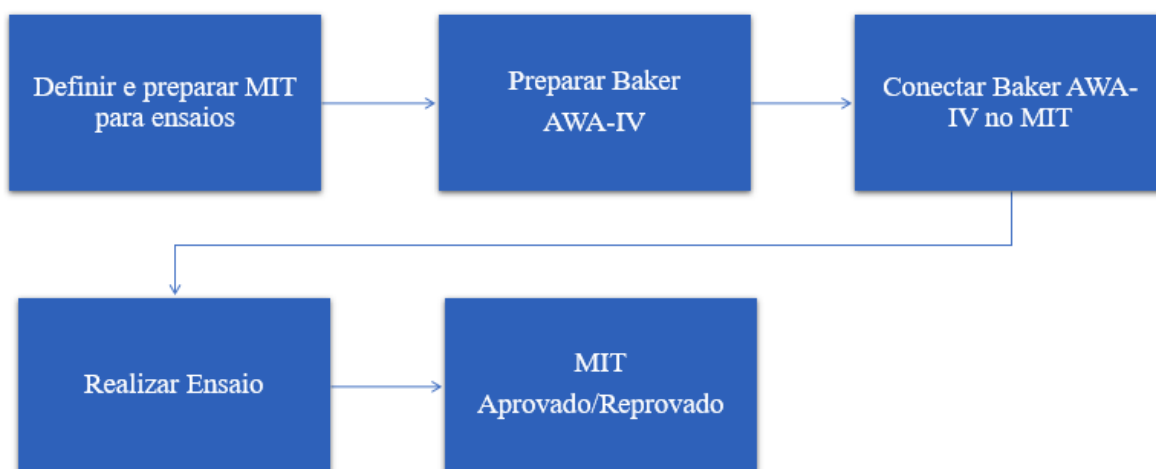


Figura 5.1-Fluxograma das etapas dos ensaios.

Os ensaios somente devem ser realizados por profissionais capacitados e habilitados segundo as normas vigentes do país.

5.2. DEFINIR E PREPARAR O MIT PARA ENSAIOS

A definição do MIT se deve aos seguintes critérios: i) motores com características de envelhecimento, ii) locais úmidos, iii) equipamentos com histórico de falha, iv) críticos para a produção, v) custos de reparação, vi) tempo para reparação e sobressalentes disponíveis, vii) motores altamente sobrecarregados, viii) motores de difícil manutenção, ix) motores pesados, x) motores que exigem guindastes para substituição ou mesmo abertura de edifícios e remoção de estruturas, xi) motores caros, xii) motores especiais, xiii) grandes motores, xiv) motores à prova de explosão e xv) motores onde não há peças sobressalentes.

Para a realização dos ensaios elétricos é preciso considerar os dados de placa do motor. O MIT deve estar: i) *offline* (fora de linha) condutores de alimentação desconectados na caixa de ligação, ii) sem o condutor de aterramento, iii) com a pontas de fechamento em delta ou estrela, iv) o rotor deve estar bloqueado para evitar movimentação, se necessário utilize algum dispositivo para auxiliar v) verificar os pontos de contatos, eles não podem estar com zinabre, sujidade ou umidade e vi) deve ser garantido aperto e melhor área de contato nos terminais localizados dentro da caixa de junção. Ademais será utilizado uma bancada para o apoio e a sustentação do instrumento *Baker AWA-IV* (MEGGER, 2010).

5.3. PREPARAR BAKER AWA-IV

O instrumento está em formato de maleta com alça de forma a facilitar seu transporte. Na maleta contém: i) um teclado com mouse, para conexão em uma das duas portas USB do instrumento, ii) um cabo de alimentação vem solto guardado na maleta, e deve ser conectado no equipamento, iii) um par de condutores para teste de balanço de resistência que vem guardado na maleta do equipamento, que deve ser utilizado nos terminais de ligação da bobina do MIT e iv) um par de condutores sendo de cor preta a referência do equipamento, deve ser utilizado na carcaça do MIT, os condutores de cor vermelha as pontas de provas para tensão e resistência devem ser conectados nos terminais de ligação do MIT (MEGGER, 2010).

O instrumento deverá ser alimentado com uma tensão de linha de 220 VCA e frequência da rede 50/60 Hz monofásica. Na Figura 5.2 o ícone indicado com retângulo em cor vermelha e o numeral (2) indica como alerta de atenção, pois a alimentação é

localizada na parte de trás do equipamento *Baker AWA-IV* (MEGGER, 2010). É altamente recomendado que se use um (DR) dispositivo residual, certifique-se que o equipamento esteja aterrado, caso contrário, o teste não poderá ser realizado (NBR 5410, 2008).

Na parte de trás do equipamento, indicado pelo retângulo de cor vermelha e numeral (1) é indicado o local onde o condutor de alimentação deve ser conectado, no mesmo local fica o interruptor utilizado para ligar e desligar a alimentação. O cabo condutor de alimentação fica guardado junto ao equipamento, devendo ser conectado na parte de trás do equipamento para alimentação. Após a realização das etapas anteriores pode-se ligar o equipamento através do interruptor. Após o carregamento do programa deve-se entrar com a senha padrão que é universal (senha: *baker*) (MEGGER, 2010).

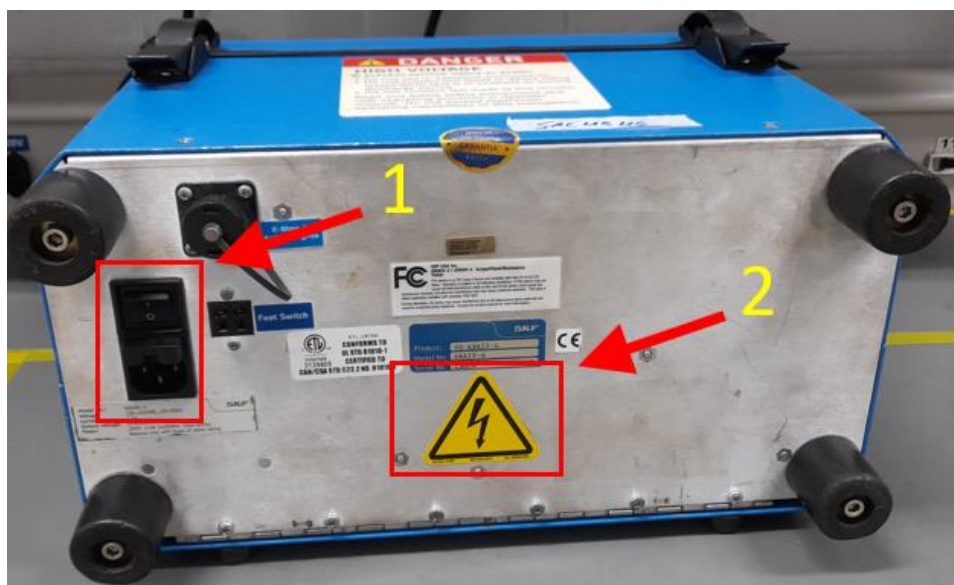


Figura 5.2 – Ícone representa ponto de alimentação localizada na parte de trás do equipamento *Baker AWA-IV* (MEGGER, 2010).

A Figura 5.3 é uma vista total do equipamento *Baker AWA-IV*. Com o equipamento na bancada já podendo ser ligado e com o botão de emergência livre *equipment stop* (*E-Stop*) representado no item 4, pode-se iniciar os procedimentos. Se o botão estiver pressionado o teste não será realizado. O item 6 indica o led de segurança para falta do aterramento, o teste não deverá ser realizado se o led estiver aceso, pois o instrumento pode sofrer avarias (MEGGER, 2010).

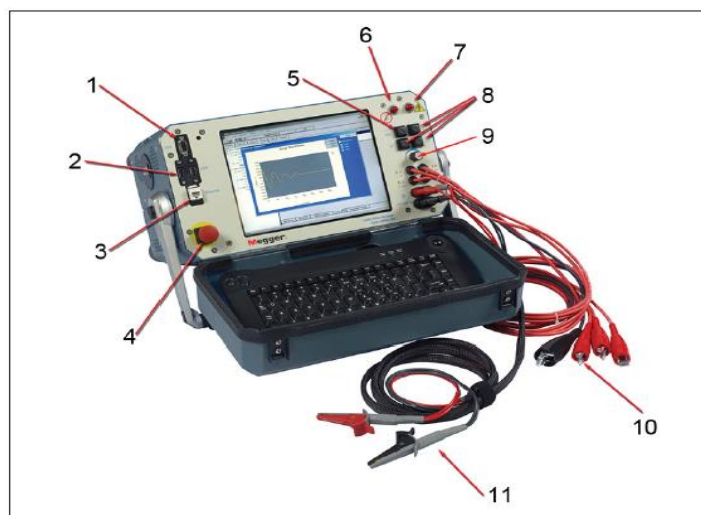


Figura 5.3 – Baker AWA-IV – Item 6 Led de segurança (MEGGER, 2010).

O *software* do equipamento *Baker AWA-IV* funciona com sistema operacional *Windows*. Se todos os procedimentos anteriores forem realizados com sucesso, deve-se clicar no ícone do *software* localizado na área de trabalho do *Windows*, representado na Figura 5.4. Desta forma, abre-se a opção de criar uma data-base, ou utilizar uma data-base existente que pode ser visto na Figura 5.5. Recomenda-se criar uma base de dados na pasta *Baker AWA-IV*, pois, é importante que, para a realização dos testes, as pastas estejam no mesmo diretório (MEGGER, 2010).



Figura 5.4 – Ícone de abertura no *Software* (MEGGER, 2010).

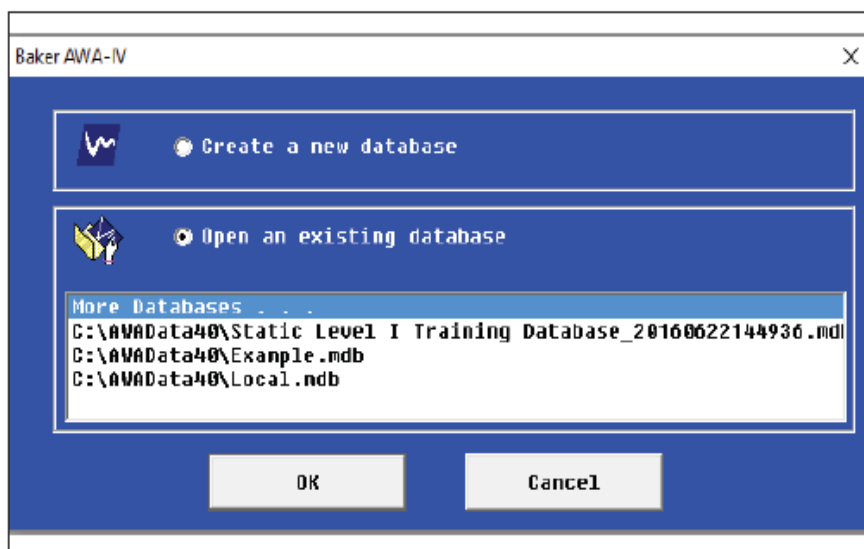


Figura 5.5 – Tela de definição da base de dados (MEGGER, 2010).

Então, inicia-se o processo de preenchimento dos dados: i) do motor, ii) área de instalação, iii) aplicação, iv) identificação (tag) do motor, v) modelo, vi) fabricante, vii) número de série (SN), viii) configuração do enrolamento estrela (Wye) ou triângulo (Delta), ix) classificação de tensão do motor, x) potência (HP/KW), xi) tensão de operação, xii) classe de isolamento (Isol), xiii) fator de serviço (SF), xiv) classificação de corrente, xv) velocidade (RPM), xvi) frequência (HZ) e xvii) corrente de operação. Na Figura 5.6 está a tela utilizada para a inserção dos dados de placa do MIT (MEGGER, 2019).

Clicando em adicionar uma nova janela, será solicitado mais informações. O ID de teste deve ser selecionado. A Figura 5.7 é a Tela de definição do MIT e representa o modelo de opções de seleção para cada nível de operação, neste exemplo está selecionado a seguinte indicação (480 V w/Rotor<100 HP StepV,): i) o valor de 480 V significa a tensão aproximada de trabalho, ii) a indicação de (w/Rotor) significa motor com estator, iii) a indicação de (<100HP) representa motores com potência menor do que 100 HP, iv) e (StepV) significa passo de tensão.

Baker AWA-IV - [Example.mdb]

File View Database Window Tools Help

Motor ID: CoolFan332-2 3

Explore Motor ID Route Data Tests Trending

Time Test ID Test Result Motor ID PI DC Sur...

Time	Test ID	Test Result	Motor ID	PI	DC	Sur...
3/19/2002 1:53:...	480V w/o PI					FAIL
3/19/2002 1:41:...	480V w/o PI					FAIL
3/19/2002 1:38:...	480V w/o PI	PASS	PASS		FAIL	FAIL

Location: North Plate Building: Unit 2 Motor ID: CoolFan332-2

Model: M1 Manuf: Century Electric SN: B-331258-01

Volts Rating: 230/450 HP/KW: 1.5 End: Volts Oper: 450 Volt Insul: B SF: 1.15

Amps Rating: 5.0/2.5 RPM: 1725 Hz: 60

Amps Oper: 2.5 Frame: S145T LR Adj: 9.5

NEMA Design: B Amb °C: 40 LR Code: L

NEMA nom eff: 0 Duty Cycle: Cont

Manuf's Type: SC Manuf Dt Code: Descriptions:

Figura 5.6 – Tela de inserção de dados do MIT (MEGGER, 2019).

Selecionar ID de teste

Selecionar um ID de teste a ser usado quando testar esse motor.

Default

480V w/o Rotor > 100HP StepV

480V w/ Rotor HiPot

480V w/ Rotor < 100HP StepV

480V w/ Rotor > 100HP StepV

6900V w/ Rotor HiPot

6900V w/ Rotor StepV

Figura 5.7 – Tela de definição se o MIT está com ou sem rotor (MEGGER, 2019).

A Figura 5.8 representa a tela de definição para utilizar uma base de dados existente e esta opção se apresenta quando a base de dados existente é utilizada para a realização do novo MIT. Já na opção de utilizar uma base de dados dispensa o uso de preenchimento de dados de placa do MIT. Aqui é necessário que durante o uso da base de dados existente, o operador do equipamento não sobreponha os dados anteriores, pois haverá perda dos ensaios realizados (MEGGER, 2019).

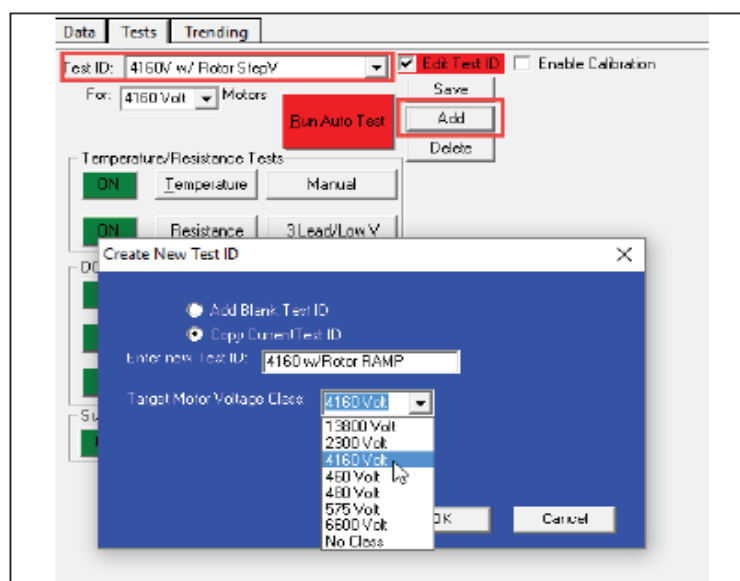


Figura 5.8 – Tela de definição quando se utiliza um base de dados existente (MEGGER, 2019).

5.4. CONECTAR BAKER AWA-IV NO MIT

Para realizar os ensaios, primeiramente deve-se conectar as pontas de provas, e condutores de resistência (Ponte *Kelvin*) nos terminais do motor. Neste caso bem específico a não garantia de conexão poderá acarretar resultados falsos. Uma vez que, as pontas de provas do modelo de garras do tipo jacaré são separadas por isolante interno e se unem através da conexão com as pontas dos condutores de alimentação do MIT. A Figura 5.9 representa a conexão dos condutores de teste, conectados de forma correta no equipamento *Baker AWA-IV* indicada por uma fita de cor vermelha em volta do condutor. Já a Figura 5.10 representa os conectores de Ponte *Kelvin* que se conecta no MIT para a realização dos testes. Após a finalização dos testes os condutores deverão ser desconectados (MEGGER, 2019).



Figura 5.9 – Baker AWA-IV – Conexão Ponte *Kelvin* (MEGGER, 2019).



Figura 5.10 – Baker AWA-IV – Item 11 Conexão Ponte Kelvin (MEGGER, 2019).

Para a realização dos testes, utiliza-se os condutores de alta potência. A Figura 5.11 representa a forma de conexão das pontas de provas no MIT. Representado em circunferência, na cor amarela, estão os três condutores de cor vermelha conectados no borne terminal na caixa de ligação do MIT. Sendo que as vermelhas obedecem a sequência de fase R, S, T.

O condutor de aterramento está representado pela circunferência de cor preta na Figura 5.11. Utiliza-se de um local onde não se encontra tinta, neste caso, usa-se um parafuso, pois a tinta pode vir a servir como isolante impossibilitando a detecção de fuga a terra, se possível dê preferência a pontos próximos da caixa de ligação, ou dentro dela. Nessa etapa de testes as pontas de provas não devem ser alteradas de posição (MEGGER, 2019).

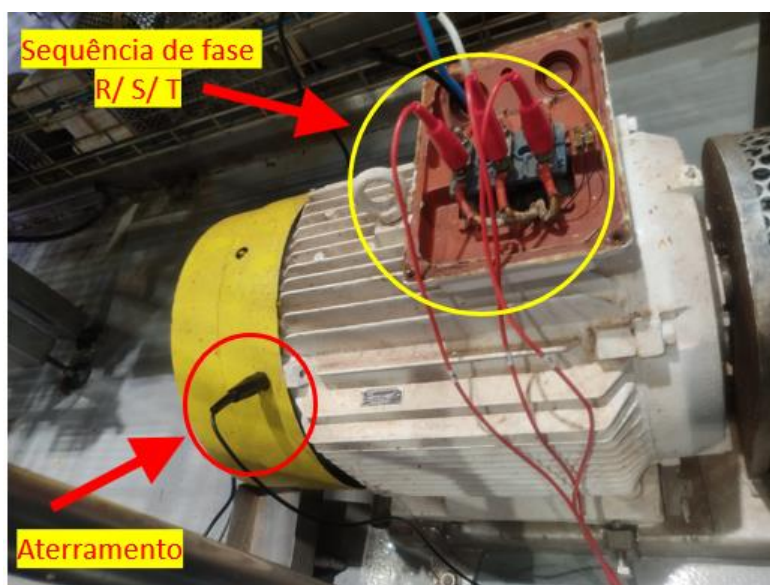


Figura 5.11 – Conexão para teste de Hipot (MEGGER, 2019)

5.5. REALIZAR ENSAIO

Os testes realizados pelo equipamento estão elencados nos itens: i) teste de temperatura/Resistência, ii) teste de DC (Corrente Contínua) utiliza três etapas: *Megohm* tensão de 500 V, teste de DA/PI 500 V e degrau de tensão 2.000 V (Hipot) e iii) o teste de Surto 2.000 V (*surge test*), este último é outro teste realizado.

Para a realização de testes com alta performance o equipamento vem configurado em automático, obedecendo as sequências de ensaios a serem realizados. Com isso, cabe ao operador do equipamento o manuseio das pontas de provas quando necessário, iniciando e finalizando as etapas quando solicitado pelo equipamento. Quando não houver interrupção por detecção de avaria interna o procedimento deverá ser seguido na sequência solicitada.

5.5.1 TESTE DE TEMPERATURA/RESISTÊNCIA

A Figura 5.12 apresenta a tela aberta no *software Baker AWA-IV*, destinada a configuração dos parâmetros de testes, cada parâmetro é configurado seguindo o modelo de MIT a ser ensaiado. O texto em sequência detalha os passos a ser seguido para a realização deste teste.

O teste de equilíbrio de resistência também é conhecido como resistência de linha a linha (Ponte *Kelvin*). Para realizar o teste deve-se alternar as sequências das pontas de provas obedecendo as seguintes sequências RS, ST, TR, de forma a garantir que todos os pontos foram realizados.

Este teste busca o equilíbrio ou o desequilíbrio de resistência entre as bobinas, sendo que, para motor envelhecido o desbalanceamento não deverá ultrapassar o máximo de 10% de desequilíbrio entre as fases, para motores enrolados com fios de cobre motor (MEGGER, 2020).

A temperatura do motor deverá ser coletada com o auxílio de um termômetro digital, com a finalidade de inserir a temperatura no instrumento, essa temperatura é utilizada como referência de temperatura do enrolamento do motor (MEGGER, 2020).

Temperature/Resistance Test AWA4_4kV_4WIRE

☐ Temperature Enable Close

☒ Manual Temperature Entry Accept °C

☐ Relative Humidity (0-100%) Accept

☒ Resistance Enable ☐ 2 Leads(1 phase) ☒ Automatic

Winding Config: Wye ☒ 3 Leads(3 phase)

☒ Delta R (%) ☐ Manual Entry

☐ Correct to °C ☒ Copper IEEE 118

☐ Alum. Constant

☐ Target Corrected Resistance +/- %

Test Results

Test All Leads	Measured L-L	Temp Corrected	Calculated Coil R
Lead 1-2(0hms)	0.0 Ω	0.0 Ω	Ω
Lead 2-3(0hms)	0.0 Ω	0.0 Ω	Ω
Lead 3-1(0hms)	0.0 Ω	0.0 Ω	Ω

Delta R (Max-Min)/Avg %

Figura 5.12 – Configuração de parâmetros para ensaio temperatura e resistência (MEGGER, 2019)

A Figura 5.13 representa a configuração de parâmetros de temperatura: i) dentro da aba de teste há uma indicação de temperatura em manual que deverá estar marcada, ii) a unidade de temperatura deverá ser alterada a escala de grau Fahrenheit para grau Celsius, iii) inserir o valor da unidade coletada, e iv) clicar em (*Accept*) confirmará a aceitação do valor inserido (MEGGER, 2020).

Temperature/Resistance Test AWA4_4kV_4WIRE

☐ Temperature Enable Close

☒ Manual Temperature Entry Accept °C

☐ Relative Humidity (0-100%) Accept

Figura 5.13 – Configuração de parâmetros temperatura (MEGGER, 2020)

A Figura 5.14 representa a configuração de parâmetros de porcentagem de falha. Na mesma aba, a indicação de fases a serem testadas deverá ser selecionada: i) 3 Leads (3

phase) fase de três condutores, ii) Delta R (%) 10% para motores envelhecidos, iii) *Copper* (cobre) 234,5 que é a resistividade do cobre (IEEE STD 43, 2013).



Figura 5.14 – Configuração de parâmetros porcentagem de falha (*Delta R*) (MEGGER,2019)

Ao finalizar o processo de leitura de cada sequência aparecerá uma mensagem solicitando continuidade da operação, que somente deverá ser aceita após a alternância das pontas de provas.

As pontas de provas devem estar conectadas nos terminais de ligação do MIT. A partir deste ponto se pode dar início ao teste. A Figura 5.15 representa a tela de teste onde na posição (Lead 1) e (Lead 2), inicia-se o ensaio. A primeira leitura a ser realizada em *Lead 1-2* (Ohms). O equipamento *Baker AWA-IV* direciona uma corrente circulando pelo conjunto de bobinas retornando para a realização de leitura.

Seguindo o teste, mantendo-se com a ponta de medição na posição (Lead 2), a ponta de medição passará da posição (Lead 1) para (Lead 3), dessa forma, iniciará a sequência na tela *Lead 2-3* (Ohms). A janela para aceitação da sequência do teste estará aberta, apertando a tecla espaço do teclado ou clicando em *Lead 2-3* (Ohms), dará continuidade a sequência (MEGGER, 2020).

Em sequência, no teste, permanecendo com a ponta de medição na posição (*Lead 3*), a ponta de medição da posição (*Lead 2*) será conectada na posição para (*Lead 1*), dessa forma iniciará a sequência na tela *Lead 3-1* (Ohms). Esta é a sequência do teste para finalização das etapas, apertando a tecla espaço do teclado ou clicando em *Lead 3-1* (Ohms), se dará continuidade a sequência.

Temperature/Resistance Test AWA4_4kV_4WIRE

☐ Temperature Enable Close

☒ Manual Temperature Entry °C

☐ Relative Humidity (0-100%)

☒ Resistance Enable ☐ 2 Leads(1 phase) ☒ Automatic

☒ 3 Leads(3 phase) ☐ Manual Entry

Winding Config: Wye

☒ Delta R (%)

☐ Correct to °C ☒ Copper ☐ Alum. IEEE 118 Constant

☐ Target Corrected Resistance +/- %

Test Results			
Test All Leads	Measured L-L	Temp Corrected	Calculated Coil R
Lead 1-2(Ohms)	0.0 Ω	0.0 Ω	Ω
Lead 2-3(Ohms)	0.0 Ω	0.0 Ω	Ω
Lead 3-1(Ohms)	0.0 Ω	0.0 Ω	Ω
Delta R (Max-Min)/Avg 0.0 %			

Figura 5.15 – Esta parte da tela representa o teste instantâneo e resultados do teste (MEGGER,2020)

Ao finalizar o teste aparecerá um valor de (Delta R (Max-Min)/Avg) indicando qual é a porcentagem de desbalanceamento do conjunto de bobinas.

5.5.2 TESTE DE (DC) CORRENTE CONTINUA, (DC TESTS)

Para a realização dessa etapa de teste, deverá selecionar em executar testes selecionados (*Run Selected Tests*), marcados em vermelho. A Figura 5.16 teste de (DC) corrente contínua, (*DC TESTS*) mostra a tela geral. As etapas posteriores iniciarão em automático estando todos em (*ON*) ligado, desde que todos os testes sejam aprovados. Ao contrário disso, o teste encerra na falha (MEGGER,2020).

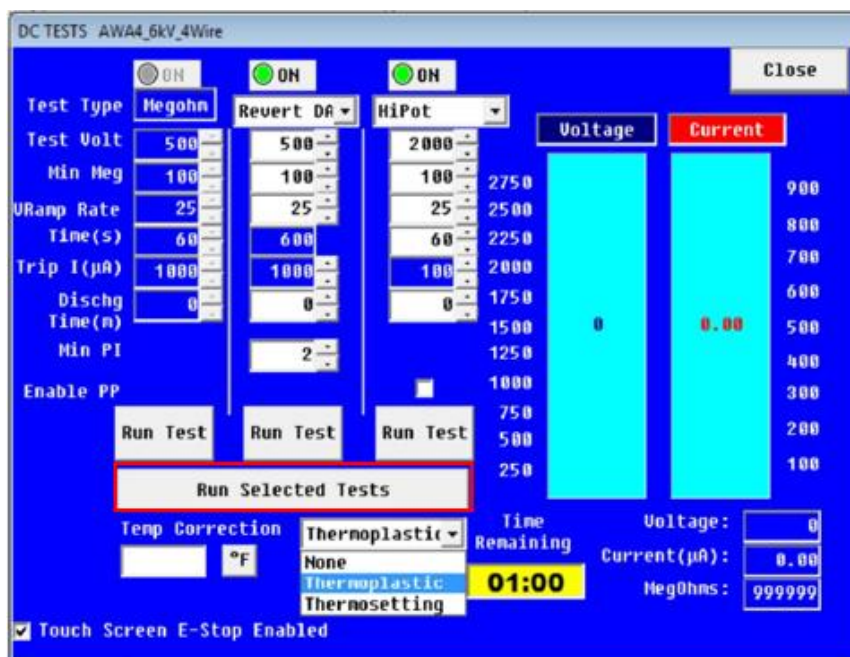


Figura 5.16 Teste de (DC) Corrente Contínua, marcado em vermelho (*DC TESTS*) (MEGGER, 2020)

5.5.2.1 MEGOHM TENSÃO DE 500 VOLTS

A Figura 5.17 representa o teste de *megohm* marcado em vermelho. Os valores de referências estão inseridos de forma possibilitar os testes. Os valores não devem ser alterados: i) tipo de teste (*Test Type*) unidade de teste será em *megohm*, ii) teste de tensão (*Test Volt*) o valor indicado para este teste é de 500 V, iii) valor mínimo de medição em *megohm* (*Min Meg*) valor mínimo estabelecido é de 100 *megohm*, iv) variação de tensão taxa de rampa (*VRamp Rate*) 25 %, v) tempo de aplicação (*Time(s)*) dados em 60 s, vi) valor estabelecido para desarme ou parada (*Trip I* (μA)) valor em máximo de 1000 μA , vii) tempo de descarga (*Dischg Time*) (m): valor configurado em zero (0) (MEGGER, 2020).

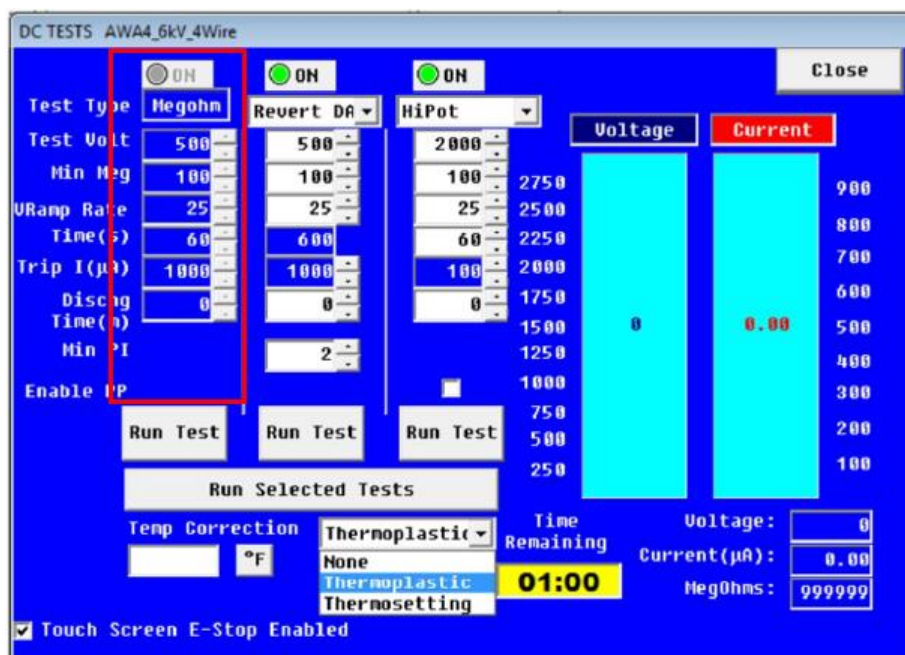


Figura 5.17 – Representa o teste de *megohm* marcado em vermelho (MEGGER, 2020)

5.5.2.2 TESTE DE DA/PI 500 VOLTS

A Figura 5.18 teste de DA/PI, marcado em vermelho, representa a Absorção Dielétrica (DA) e o índice de polarização (PI). Uma vez que os valores foram inseridos, os mesmos não devem ser alterados: i) tipo de teste (*Test Type*) unidade de teste será em DA/PI, ii) teste de tensão (*Test Volt*) o valor indicado para este teste é de 500 V, iii) valor mínimo de medição em *megohm* (*Min Meg*) valor mínimo estabelecido é de 100 *megohm*, iv) variação de tensão taxa de rampa (*VRamp Rate*) 25 %, v) tempo de aplicação (*Time(s)*) dados em 600 s, vi) valor estabelecido para desarme ou parada (*Trip I* (μA)) valor em máximo de 1.000 μA, vii) tempo de descarga (*Dischg Time* (m)) valor configurado em zero (0) e viii) valor mínimo do índice de polarização (*Min PI*) estabelecido o valor de 2 unidades (REFERENCE GUIDE, 2019).

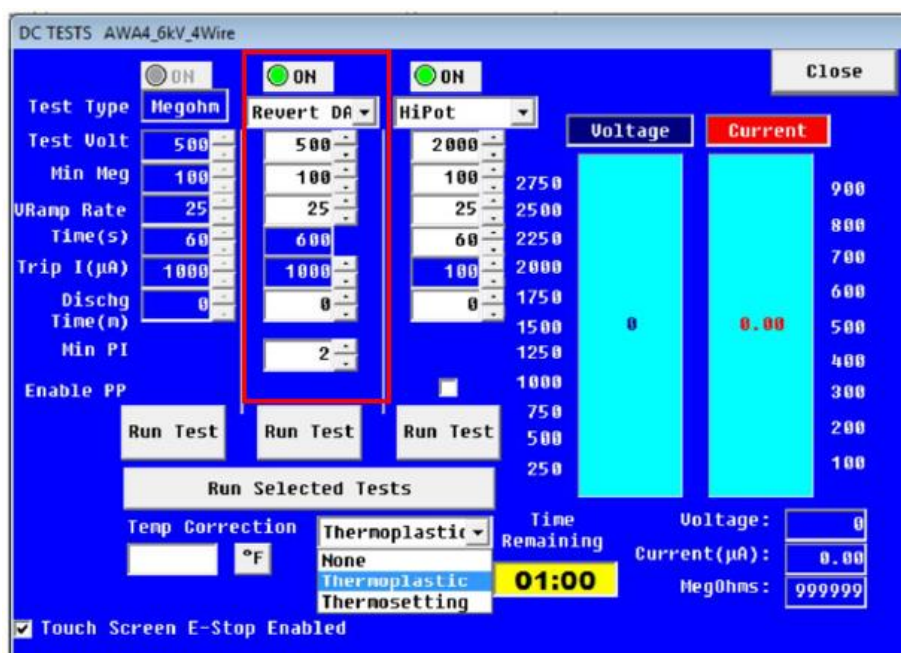


Figura 5.18 Teste de DA/PI marcado em vermelho (MEGGER, 2020).

5.5.2.3 DEGRAU DE TENSÃO 2000 VOLTS (HIPOT)

A Figura 5.19 representa o teste de Hipot, marcado em vermelho. Os seguintes itens devem estar configurados de forma a possibilitar os testes e estes valores não devem ser alterados para evitar falhas no teste: i) tipo de teste (*Test Type*) unidade de teste será em Hipot, ii) teste de tensão (*Test Volt*) o valor indicado para este teste é de 2.000 V. iii) valor mínimo de medição em *megohm* (*Min Meg*) estabelecido é de 100 *megohm*, iv) variação de tensão taxa de rampa (*VRamp Rate*) 25 %, v) tempo de aplicação (*Time(s)*) dados em 60 s, vi) valor estabelecido para desarme ou parada (*Trip I* (μA)) valor em máximo de 100 μA, vii) tempo de descarga (*Dischg Time*) (m) valor configurado em zero (0) (MEGGER, 2020).

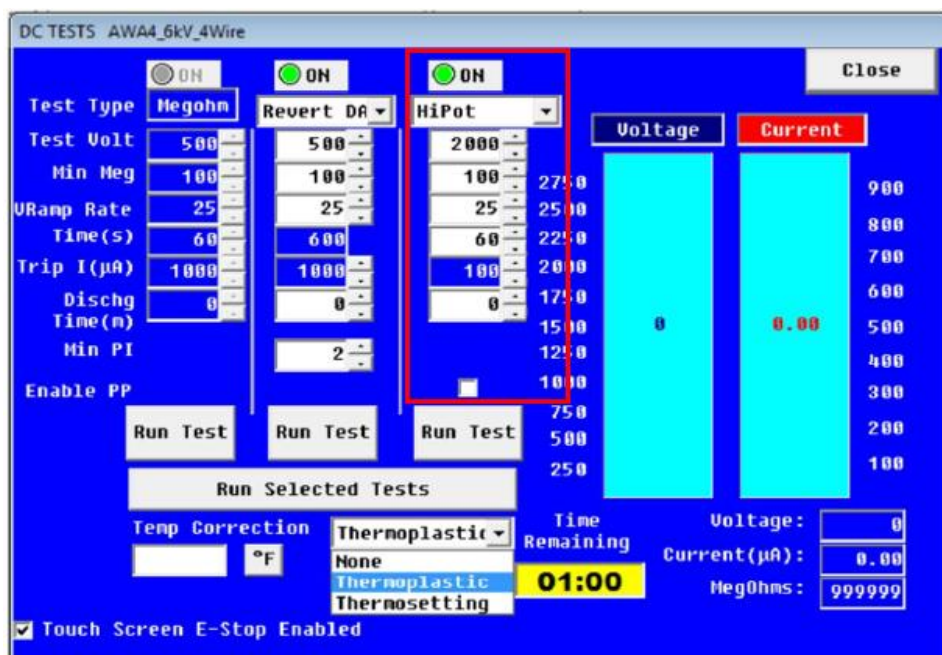


Figura 5.19 – Representa o teste de Hipot marcado em vermelho (MEGGER, 2020).

Na Figura 5.20, a janela de cor vermelha, está indicando em tempo real os níveis de tensão, corrente e resistência de isolamento coletadas durante os testes de *megohm* e Hipot. Dentro da mesma janela está disponível o indicador de tensão na escala de 250 V a 2.750 V, indicador de corrente com escala de 100 A 900 A em formato de barra deslizante.

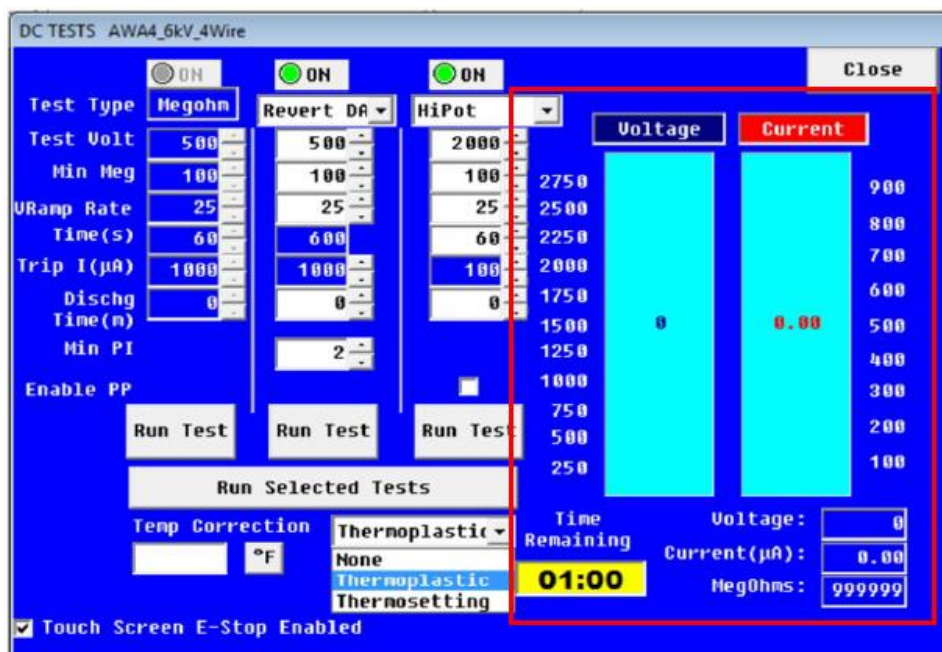


Figura 5.20 – Indicando em tempo real os níveis de tensão, corrente e resistência de isolamento (MEGGER, 2020).

Se o nível de tensão afundar de forma a não se manter estabilizado indica que há uma fuga para carcaça de terra (*Ground*). O instrumento é capaz de detectar e finalizar o teste se essa condição ocorrer. O ícone *Time Remaining* (tempo restante) indica o tempo de duração de aplicação para cada item em contagem regressiva iniciando com um minuto.

Ao final desse processo aparecerá um ícone de barras carregando, após a finalização deste processo, deverá clicar em fechar para seguir para o teste de surto (*surg test*) (MEGGER, 2020).

5.5.3 TESTE DE SURTO 2000 VOLTS (SURG TEST)

Antes de iniciar o teste de surto, o operador deverá verificar os valores de configuração padrão. A Figura 5.21 indica: i) tensão de surto (*Surge Voltage*) no valor máximo de 2.000 V, ii) variação de tensão taxa de rampa (*VRamp Rate*) 50 %, iii) Pulsos de surto (*Surge Pulses*) valor máximo de 5 %, iv) tensão em divisão para ajuste do gráfico (*Volts/Div*: (Auto)), v) valores obtidos em microssegundo por divisão (μ *Seconds/Div*: (Auto)) e este parâmetro pode ser alterado para valores entre 5 % a 100 % manualmente. Na janela *Set Pass/Fail Tolerances*, deve ser marcado a condição “P-P EAR (%)”: (10) pico a pico para motor com rotor e vi) os demais itens não devem ser marcados (MEGGER, 2020).

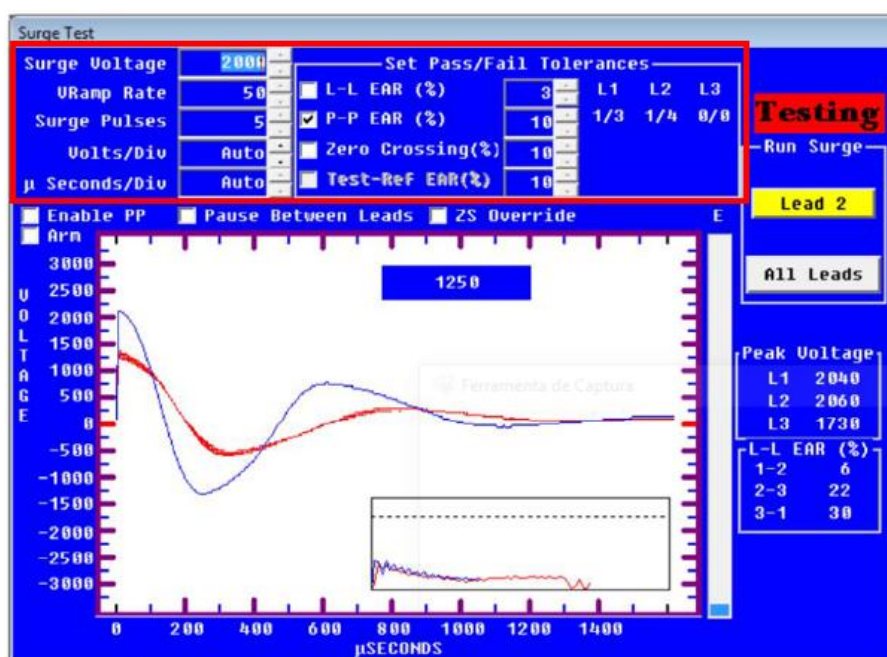


Figura 5.21 – Tela do surge test (MEGGER, 2020).

Para iniciar o teste deve-se clicar em *All Leads*, que o teste será realizado, sendo este o último teste. É recomendado que o nível de tensão de surto seja $2 V + 1.000 V$ (onde (V) é a tensão nominal de linha nominal do dispositivo em teste. A taxa de rampa de tensão controla a taxa na qual a tensão aumenta durante o teste e é definida para uma taxa padrão de 25 V.

O campo *Surge Pulses* é utilizado para definir o número de pulsos aplicados ao enrolamento após ser finalizado e a tensão de teste total for atingida. Os campos *Volts/Div* e *μSeconds/Div* estão relacionados aos eixos (x) e (y) do gráfico na forma de onda de surto localizado no meio da janela.

O campo *Volts/Div* é definido como Auto por padrão, mas pode ser inserido um valor específico manualmente, (à critério do operador do instrumento). Este campo define a exibição da escala do eixo y no gráfico de forma de onda de surto. O campo *μSeconds/Div* (eixo x) também é definido como Auto por padrão para capturar a forma de onda no tempo, mas, pode ser inserido um valor específico manualmente, mais uma vez, à critério do operador do instrumento.

A parte superior central da janela inclui uma série de caixas de seleção que determinam os critérios de aprovação/reprovação para o teste de pico. A caixa de seleção LL EAR (%) define a relação de área de erro entre derivações (EAR) máxima permitida entre as diferentes derivações (MEGGER, 2019).

5.6. MIT APROVADO/REPROVADO

Ao final do teste o instrumento *Baker AWA-IV* nos direciona para a página inicial onde é apresentado dados se o motor foi aprovado. Caso apareça a palavra (*PASS*) é aprovado, como aparece nos blocos de cor verde representado pela Figura 5.22. Se o motor é reprovado em algum dos testes, aparece a palavra (*FAIL*) falha, representado no bloco de cor vermelha pela Figura 5.23. (MEGGER, 2020).

Posteriormente, aparecerá um ícone para salvar o teste independentemente de estar aprovado ou reprovado como demonstra a Figura 5.24 (MEGGER, 2020).

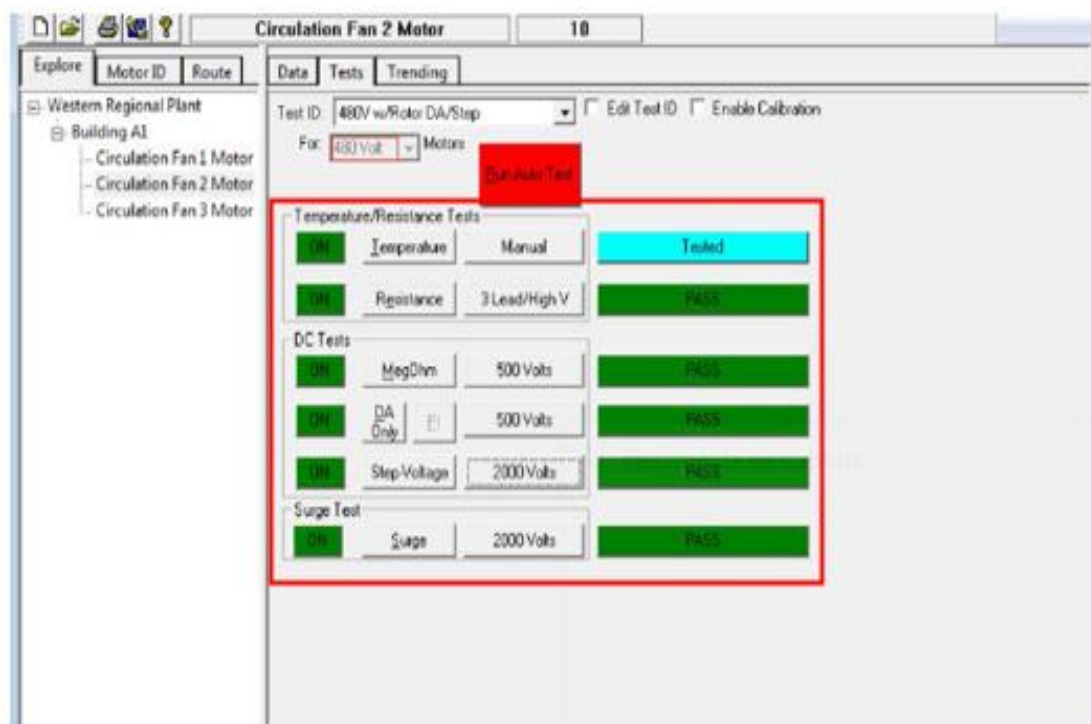


Figura 5.22 – Motor aprovado (MEGGER, 2020).

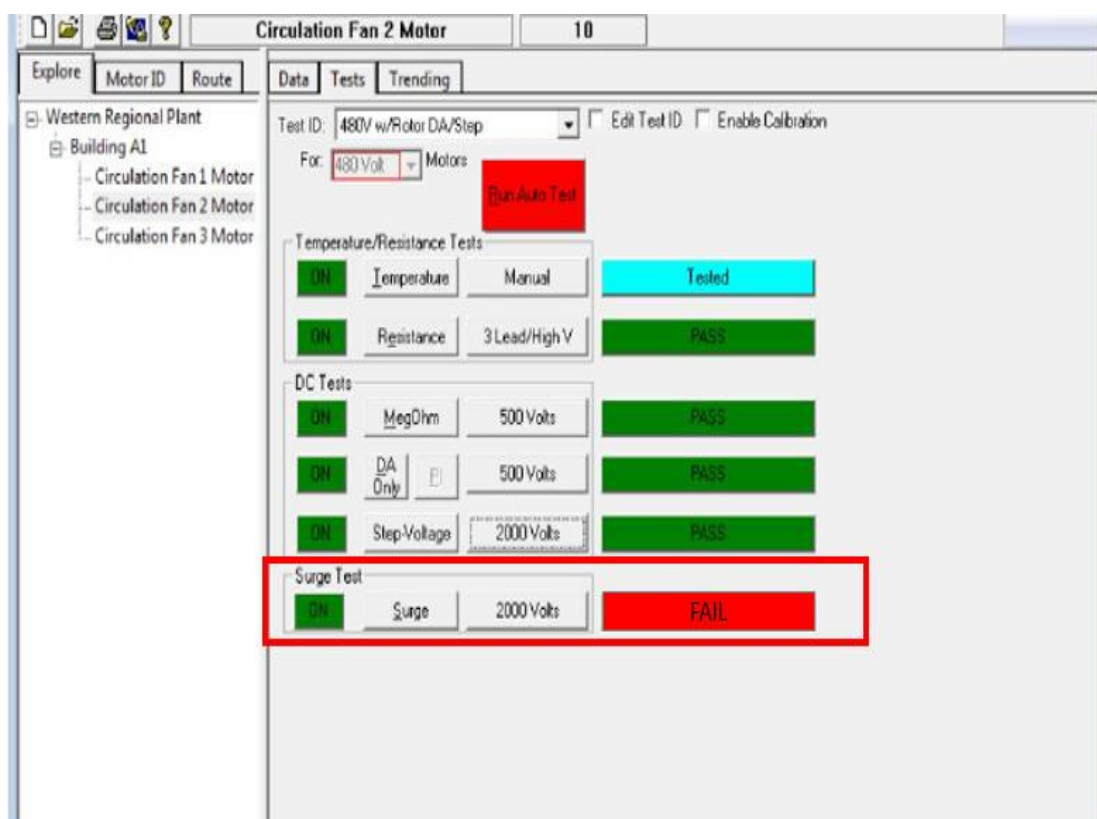


Figura 5.23 – Motor reprovado- FAIL (MEGGER, 2020).

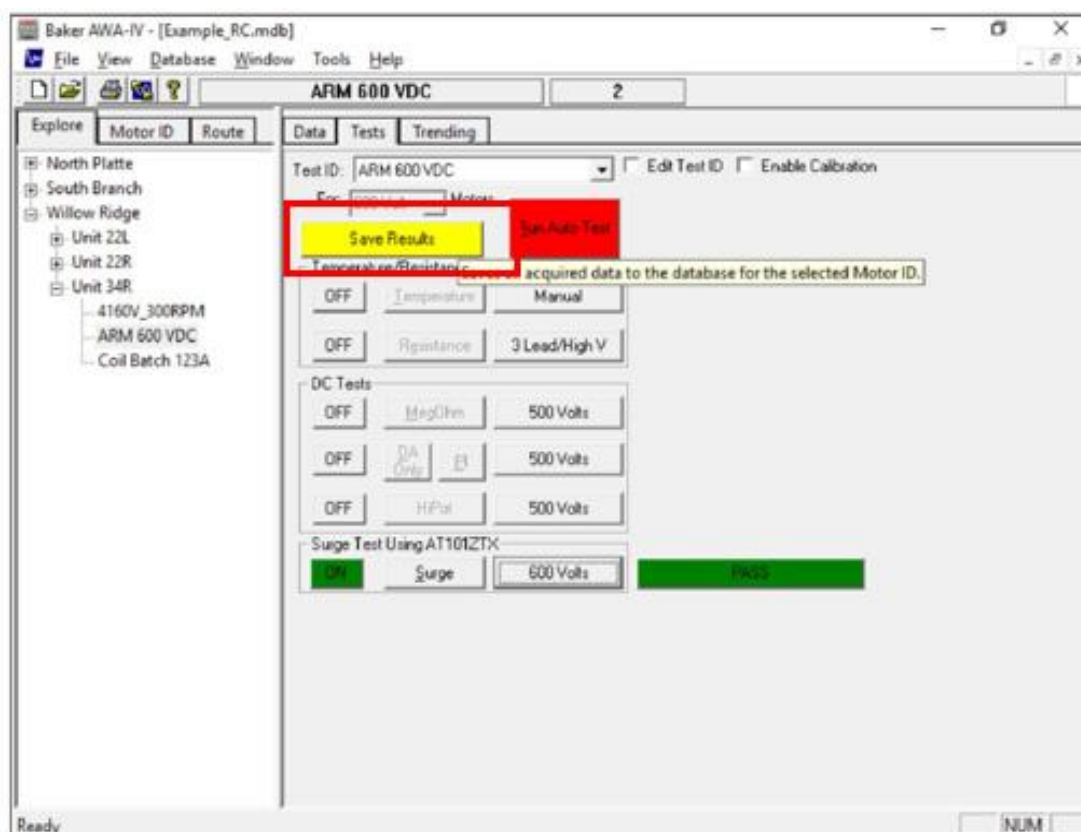


Figura 5.24 – Salvar resultado (MEGGER, 2020).

5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A teoria dos ensaios elétricos foi evidenciada e aplicada, também, nesta parte do trabalho. As normas internacionais e as suas recomendações, foram aplicadas para a configuração de cada teste a ser executado e, para cada teste a ser realizado, foi estabelecido os limites máximos e mínimos aceitáveis levando em consideração o uso da corrente, da tensão e da resistência como grandezas elétricas fundamentais.

Então, em linhas gerais, a proposta da metodologia foi apresentar as opções de utilização do *Baker AWA-IV* e descrever as configurações a serem utilizadas para cada etapa de teste, teorizando sobre cada um e indicando o que cada teste representa para as condições de falhas no MIT. Para que, assim, no próximo capítulo, sejam feitas as análises dos resultados encontrados nos testes do MIT.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da utilização do equipamento *Baker AWA-IV*. Onde são descritas as etapas de coletas de dados e realizada comparações entre duas coletas em tempos diferentes, visando a obtenção do resultado almejado por este trabalho.

6.1. CENÁRIO

A fábrica de atomatados de Cargill Agrícola de Goiânia-Goiás se divide em diversos setores. Dentre estes setores pode-se citar: i) a E.T.E (Estação de Tratamento de Efluentes), ii) a E.T.A (Estação de Tratamento de Água), iii) utilidades geração de vapor através de caldeiras, iv) ar comprimido através de compressores, v) água gelada através de Chiller's, vi) processo primário e moagem - onde é realizado o descarregamento de tomates, a limpeza dos tomates e o processamento dos mesmos para virar polpa, vii) hotfill (envase a quente) - é a área que funciona durante todo ano, local pelo qual é responsável em realizar a preparação de formulação de molhos, os extratos de tomates e o envase dos produtos e viii) processo final, o produto finalizado.

Este foi o cenário utilizado para a escolha do MIT, pois, o mesmo se encontra dentro da empresa Cargill, empresa de produção alimentícia que, por sua vez, capta a água no Rio Meia Ponte e tem como compromisso devolvê-la tratada para este mesmo rio.

A Figura 6.1 é a imagem de uma parte do processo da E.T.E, local que consiste em receber o ar dentro do efluente. Através do soprador de ar a inserção de oxigênio na água cria micro aeração que compõem um conjunto de fatores para o processo de tratamento do efluente.



Figura 6.1 – Lagoa 01 Cargill agrícola (CARGILL, 2022).

Os Sopradores são utilizados no tratamento de água com aeração para produzir ar sob baixa pressão. A Figura 6.2 é a imagem do soprador com vista frontal, tal imagem foi realizada do soprador em estado de manutenção.



Figura 6.2 – Soprador de ar 04 SB8623 Cargill agrícola (CARGILL, 2021).

A Figura 6.3 apresenta a imagem do soprador com vista lateral, tal imagem também foi realizada do soprador em estado de manutenção.

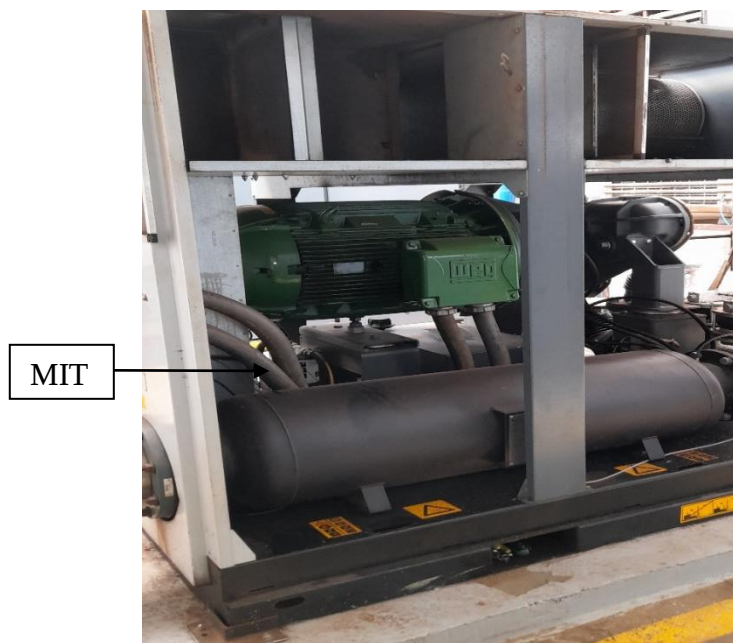


Figura 6.3 – Soprador de ar 04 SB8623 Cargill agrícola (CARGILL, 2021).

O processo de injeção de ar através dos sopradores se dá durante o ano todo. No entanto, durante um período do ano se diminuí a injeção de ar na lagoa 1, pois, a empresa Cargill Agrícola trabalha com safra e entressafra. Durante a safra o volume de efluentes industriais aumenta para valores significativos, acarretando a necessidade de operação dos cinco sopradores. Para o período de entressafra o volume de efluente é menor, por este motivo este é o período em que se realiza a manutenção nos equipamentos deste setor de E.T.E.

O período de safra geralmente tem início no mês de junho de cada ano e previsão para finalizar no mês de novembro com duração de aproximadamente cinco meses. A safra é o período de colheita e de processamento de tomates, já a entressafra é o período de se utilizar a polpa que foi estocada pelo processo.

Durante o período de entressafra é realizado a manutenção preditiva dos MIT. Levando, então, tal período em consideração o primeiro ensaio foi realizado no dia 14 de fevereiro de 2019, já o segundo ensaio foi realizado no dia 10 de dezembro de 2021. Entre as duas datas há um período de aproximadamente três anos. Sendo assim, tiveram três safras entre o período dos dois ensaios.

6.2. ESCOLHA DO MIT ATRAVES DE SUA CRITICIDADE

Dentro do ambiente fabril, tem-se diversos equipamentos com maior criticidade de operação, desta maneira alguns fatores foram utilizados para a escolha do MIT. Tais

fatores foram apresentados no item 5.2 *Definir e Preparar o MIT para Ensaios* do Capítulo 5 *Metodologia*. Sendo eles: i) importância para o processo contínuo, ii) nível de exposição a área abrasiva e iii) local com vapor de produtos químicos.

O equipamento definido é um soprador de ar comprimido que é utilizado para aeração da lagoa 1 e 2 da área de tratamento de resíduos E.T.E. O soprador de ar 04 SB8623 compõem um conjunto de cinco sopradores que operam simultaneamente por um período de cinco meses durante o ano no período de safra, tendo todos juntos a capacidade necessária para suprir a aeração. Durante o período de safra se faz necessário 4 sopradores, não podendo ocorrer falhas. Através do histórico passado e de novo ensaio, pode-se realizar a análise preditiva e definir a tratativa do MIT.

Para realizar o teste deve-se bloquear a fonte de energia elétrica do soprador e abrir as suas tampas laterais. Ao ter acesso a placa de identificação do motor deve-se coletar os dados de placa que está representado na Figura 6.4. Então, deve-se direcionar ao motor, abrir a sua caixa de ligação e soltar os condutores de alimentação. Para este motor seus terminais de ligação estão conectados em delta.

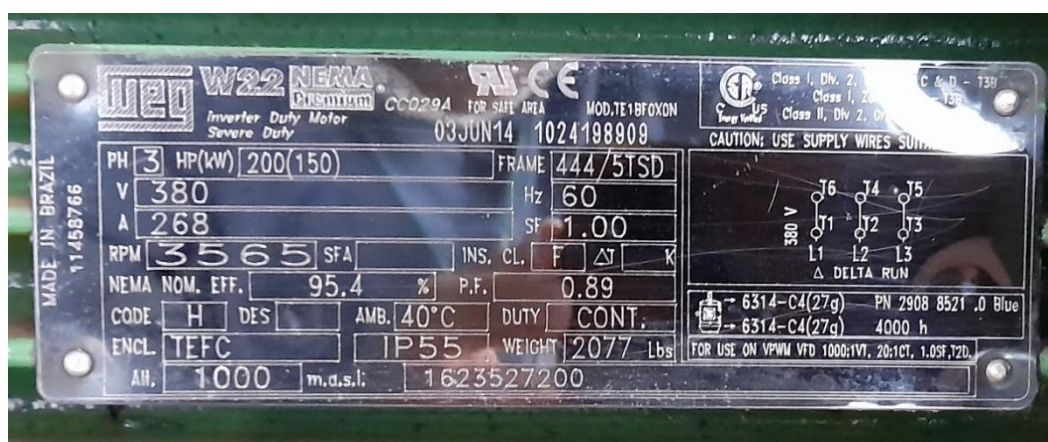
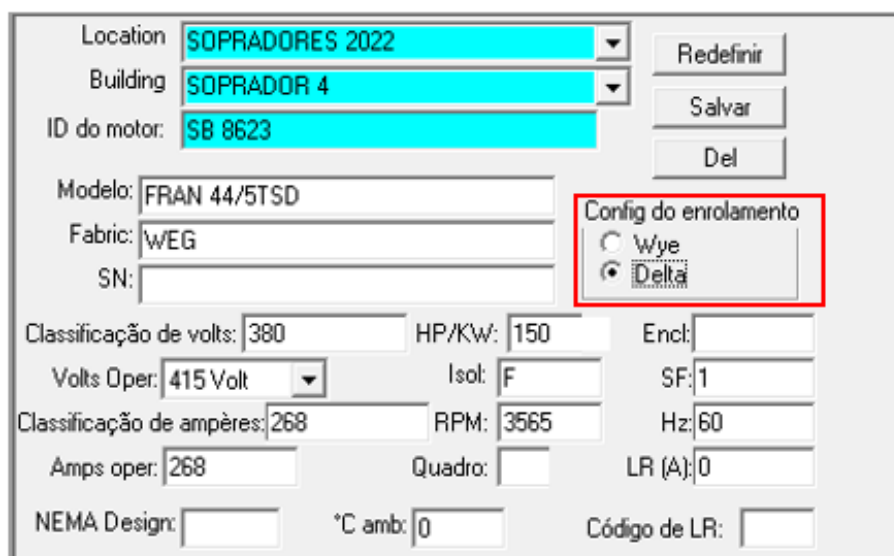


Figura 6.4 – Placa MIT do soprador de ar 04 SB8623 Cargill agrícola (CARGILL, 2021).

Para dar sequência, deve-se verificar se não há resíduos de sujidades nos pontos de conexões, então, em seguida verifica-se se não há zinabre ou ferrugem nas porcas e chapas ou sinais de curtos-circuitos e, até mesmo, humidade. Após todas as verificações deve-se realizar o fechamento e garantir que exista áreas de contatos entre todos os pontos. A partir deste momento o MIT estará preparado para a coleta de dados.

6.3. INSERÇÃO DE DADOS NO BAKER AWA -IV

Com os dados de placa coletados, deve-se inseri-los no programa do *Baker AWA-IV* da mesma forma que foi realizado na Figura 6.5. Com os dados através da placa do MIT é possível verificar o esquema de ligação em Delta, por este motivo deve-se marcar na configuração de enrolamento a mesma posição no programa.



The screenshot displays the Baker AWA-IV software interface for entering motor data. The 'Location' is set to 'SOPRADORES 2022', 'Building' to 'SOPRADOR 4', and 'ID do motor' to 'SB 8623'. The 'Modelo' is 'FRAN 44/5TSD' and 'Fabric' is 'WEG'. The 'Config do enrolamento' section is highlighted with a red box, showing 'Delta' selected. Other fields include 'Classificação de volts' (380), 'HP/Kw' (150), 'Encl' (blank), 'Volts Oper' (415 Volt), 'Isol' (F), 'SF' (1), 'Classificação de ampères' (268), 'RPM' (3565), 'Hz' (60), 'Amps oper' (268), 'Quadro' (blank), 'LR (A)' (0), 'NEMA Design' (blank), '°C amb' (0), and 'Código de LR' (blank). Buttons for 'Redefinir', 'Salvar', and 'Del' are visible.

Figura 6.5 – Soprador de ar 04 SB8623 (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021).

Em seguida, deve-se marcar a classificação do motor como indicado na Figura 6.6, pelo qual se mostra a classe de tensão de trabalho 480 V, motor com roto interno (W/RTR) e potência maior que 100 HP (>101HP).

É imprescindível que esteja disponível um ponto de alimentação de tomada com a alimentação de tensão em 220 V entre fase neutro, de forma a garantir o aterramento do equipamento para a continuidade do processo já com o *Baker AWA-IV* ligado e preparado, com os dados inseridos.

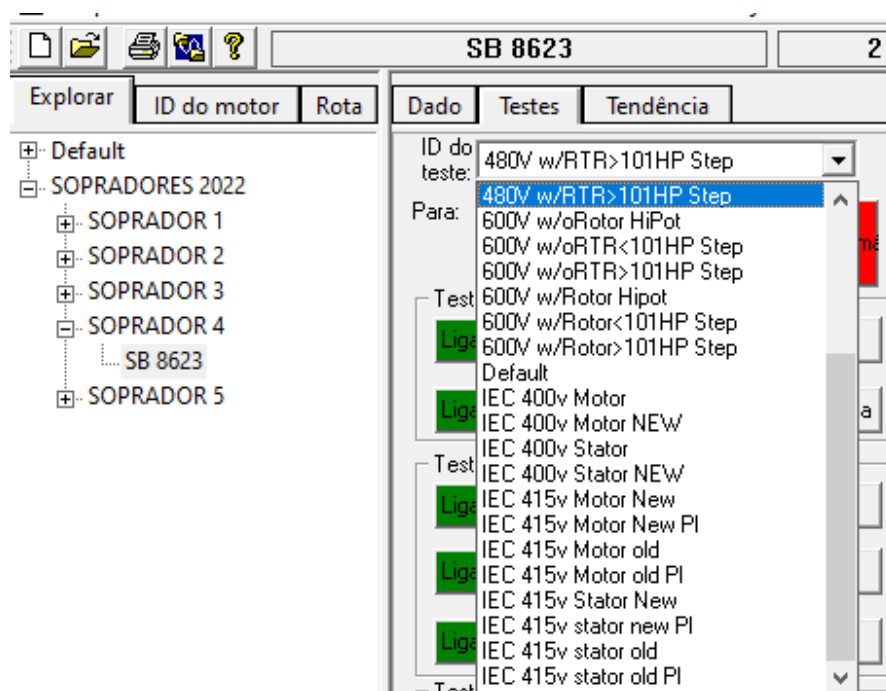


Figura 6.6 – Classe de tensão e potência MIT SB8623 (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021).

6.4. CUIDADOS COM AS CONEXÕES

Para a realização dos ensaios deve-se abrir a caixa de ligação do motor. Na Figura 6.7 está a imagem do MIT onde foi realizado o ensaio. Ao abrir a caixa de ligação encontra-se o terminal de conexão da alimentação, então, para a realização do ensaio deve-se seguir os seguintes passos: i) com um multímetro na escala de volts, realizar a medição de tensão, a medição deverá ser realizada entre fase e fase e, entre fase e terra entre todos os terminais de conexão para garantir que esteja com energia em nível zero de tensão, ii) com ferramentas adequadas retire as porcas dos condutores de alimentação, na Figura 6.7 os condutores de alimentação estão identificados nas cores azul, branco e roxo, iii) retirar o parafuso do condutor de aterramento que está fixado na carcaça do motor, iv) retirar as placas de conexão para inspeção e limpeza das sujidades e v) conecte as placas e reparte-as através das porcas, de forma a garantir o máximo a área de contato entre os parafusos e os condutores de conexão das bobinas.



Figura 6.7 – Caixa de ligação MIT SB8623 (CARGILL, 2021)

Adiante, para a realização dos ensaios, deve-se conectar as pontas de provas nos parafusos do terminal da caixa de ligação seguindo os passos propostos no Capítulo 5 *Metodologia*, a partir do item 5.4 *Conectar Baker AWA-IV no MIT*. A Figura 6.8 representa as pontas de provas de Ponte *Kelvin* utilizadas para a realização do primeiro teste, as pontas alternam-se entre os terminais do motor para realização do teste.



Figura 6.8 – Pontas balanço de resistência (BAKER AWA IV, 2021)

As pontas de prova garra jacaré utilizadas após teste de Ponte *Kelvin*, são utilizadas nos terminais do motor, ficando fixas e imóveis até a realização do teste. Para a conexão

em cada ponto utiliza-se as três pontas de prova de cores vermelho e uma de cor preta que se conectam na carcaça do motor, conforme representado na Figura 6.9.



Figura 6.9 – Pontas de alto potencial (BAKER AWA IV, 2021)

6.5. COLETA DE SINAIS ELÉTRICOS DO MIT

Neste trabalho será abordado o comparativo de dois ensaios, através da análise de dados para determinação de aspectos preditivos do MIT.

Lembrando que, no dia 14 de fevereiro de 2019 foi realizado o primeiro ensaio do motor. E, no dia 10 de dezembro de 2021, o segundo ensaio. Entre as duas datas há um período de aproximadamente três anos.

6.6. ANÁLISE DO TESTE BALANÇO DE RESISTÊNCIA (KELVIN)

A Figura 6.10 e a Figura 6.11 representam os testes de temperatura, e resistência para o ano de 2019 e 2021, respectivamente. E nos testes em questão o MIT foi aprovado. No entanto, embora o motor tenha sido aprovado nessa etapa, nota-se uma perda de resistência ôhmica entre os dois ensaios.

O teste de resistência de equilíbrio ou resistência linha a linha é um teste de resistência da bobina que procura o desequilíbrio de resistência entre as fases. Se for encontrado um grande desequilíbrio o motor deve ser inspecionado buscando à causa das discrepâncias. Os problemas típicos geralmente incluem: i) curtos rígidos no núcleo do

motor, ii) curtos rígidos entre bobinas, iii) dentro da mesma fase ou entre fases, e iv) bobinas rebobinadas com fio de bitola imprópria.

Status da Resist	Passar
Bal L1 (Ohms)	
Bal L2 (Ohms)	
Bal L3 (Ohms)	
L1-L2 (Ohms)	0,0217 Corr:0,0000
L2-L3 (Ohms)	0,0227 Corr:0,0000
L3-L1 (Ohms)	0,0224 Corr:0,0000
Máx Delta R %	26,512
Bobina 1 (Ohms)	0,0107 Corr:0,0107
Bobina 2 (Ohms)	0,0110 Corr:0,0110
Bobina 3 (Ohms)	0,0117 Corr:0,0117

Figura 6.10 – Teste de temperatura e resistência (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Status da Resist	Passar
Bal L1 (Ohms)	
Bal L2 (Ohms)	
Bal L3 (Ohms)	
L1-L2 (Ohms)	0,0186 Corr:0,0183
L2-L3 (Ohms)	0,0189 Corr:0,0185
L3-L1 (Ohms)	0,0182 Corr:0,0179
Máx Delta R %	15,425
Bobina 1 (Ohms)	0,0090 Corr:0,0088
Bobina 2 (Ohms)	0,0096 Corr:0,0094
Bobina 3 (Ohms)	0,0093 Corr:0,0091

Figura 6.11 – Teste de temperatura e resistência (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

6.6.1 ANÁLISE DO TESTE DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

Para análise deste resultado foi verificado a resistência de isolamento do MIT, como demonstra a Figura 6.12 e a Figura 6.13 são o teste de *megohm*, teste de DC (*Direct Current*) corrente contínua, para o ano de 2019 e o ano de 2021, respectivamente.

O MIT foi aprovado nos dois ensaios (estudo de caso), pois verifica-se que não ultrapassou os limites de corrente coletadas pelo aparelho tendo como referência para níveis de tensão a *Tabela 4.1 Diretrizes para Tensão Direta* do Capítulo 4 *Ensaio*.

Se durante o teste o motor for reprovado, o equipamento não permite a continuação da sequência de ensaio, ele é determinístico. Então, da forma que se chegou até este ponto observa-se que o motor foi aprovado.

Status do Megohm	Passar
Volts (V)	500
I(μ A)	0,03
Resist	19674
A 40°C	

Figura 6.12 – *Megohm*, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Status do Megohm	Passar
Volts (V)	500
I(μ A)	0,02
Resist	21300
A 40°C	10650

Figura 6.13 – *Megohm*, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

6.6.2 ANÁLISE DO TESTE (PI) E (DA)

O teste do Índice de Polarização (PI) é realizado para medir quantitativamente a capacidade de um isolante se polarizar. A Figura 6.14 e a Figura 6.15 representam o teste de Índice de Polarização no ano de 2019 e o ano de 2021, respectivamente. Nos ensaios realizados nos dois 2019 e 2021 o MIT foi aprovado.

A janela de configuração DC *tests* mudará seu foco para a coluna de testes PI/DA. Como o ID de teste neste exemplo foi configurado para um teste de Absorção Dielétrica (DA), a duração do teste é de 10 min (600 s). Ao final do teste, se não ocorrerem falhas, o *software* continuará com a próxima série.

Se durante o teste o motor for reprovado, o equipamento não permite a continuação da sequência de ensaio sendo, mais uma vez, determinístico. Logo, da forma em que se chegou até este ponto observa-se que o motor foi aprovado.

Status de PI	DA somente
Volts (V)	500
Relação de DA	1,0
Relação PI	>2 OL

Figura 6.14 – Índice de polarização, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Status de PI	DA somente
Volts (V)	500
Relação de DA	2,0
Relação PI	> 2 OL

Figura 6.15 – Índice de polarização, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

O gráfico Absorção Dielétrica mostra a corrente versus tempo e, a leitura de resistência versus tempo. No gráfico (DA) estão os pontos de dados selecionados usados. No lado direito do gráfico, apresenta-se os dados para PASSA/FALHA, tensão de teste, relações DA e quatro caixas de seleção. A Figura 6.16 e a Figura 6.17 representam o teste de Absorção Dielétrica do ano de 2019 e do ano 2021, respectivamente.

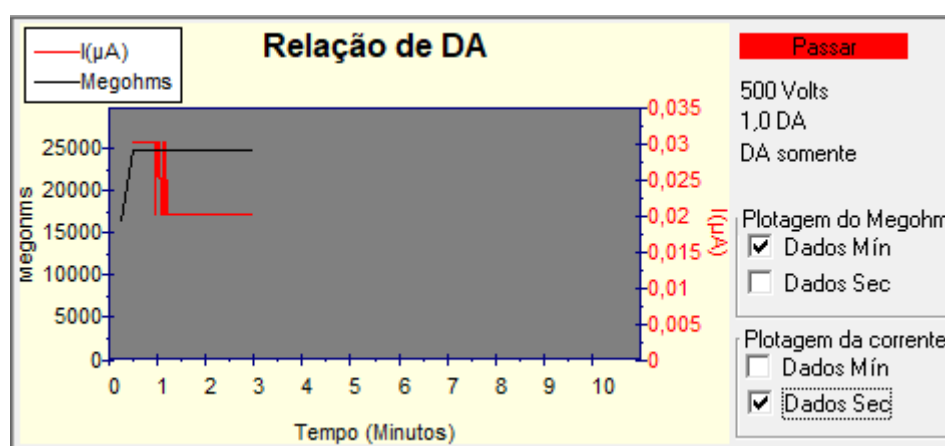


Figura 6.16 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

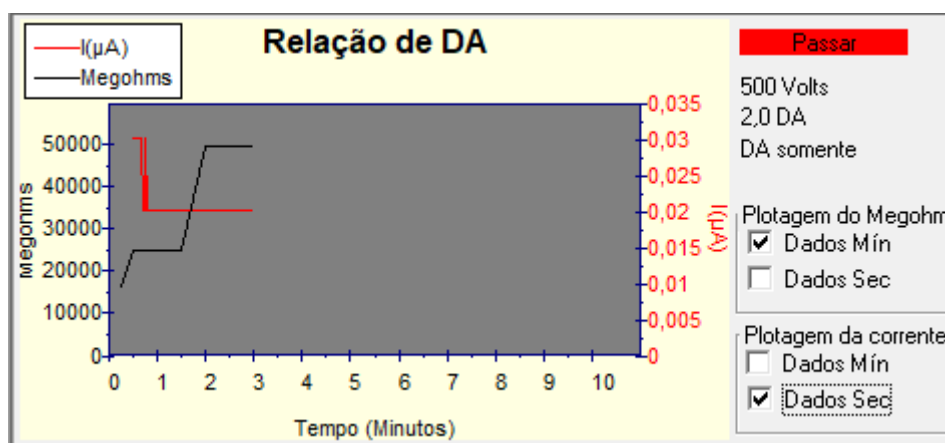


Figura 6.17 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

Dando sequência a análise, tem-se nas Figuras 6.18 e 6.19 que representam o teste de Absorção Dielétrica realizados no ano de 2019 e ano de 2021, respectivamente. Neste

teste é aplicado uma tensão em relação ao tempo e através do resultado da corrente obtida é possível obter a resistência, no *software* o resultado é dado na unidade de *megohms*.

Tempo (Min)	I(μ A)	Megohms
0:15	0,03	16666
0:30	0,02	25000
0:45	0,02	25000
1:00	0,02	25000
1:30	0,02	25000
2:00	0,02	25000
2:30	0,02	25000
3:00	0,02	25000

Figura 6.18 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Tempo (Min)	I(μ A)	Megohms
0:15	0,03	16666
0:30	0,02	25000
0:45	0,02	25000
1:00	0,02	25000
1:30	0,02	25000
2:00	0,01	50000
2:30	0,01	50000
3:00	0,01	50000

Figura 6.19 – Teste de DA – Absorção Dielétrica (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

Entre os dois resultados é possível perceber uma variação de corrente e resistência a partir do tempo de dois minutos (02 min). Há um afundamento de corrente e aumento de resistência ôhmica. Se a tensão aplicada é constante e a corrente aumenta em relação ao tempo de aplicação, esse comportamento demonstra uma fuga de corrente causada pela perda de dielétricos.

6.6.3 ANÁLISE DO TESTE DE TENSÃO POR ESCALA (HIPOT)

Para análise deste teste verifica-se a etapa de tensão, logo, a Figura 6.20 e a Figura 6.21 representam o degrau de tensão e o teste em corrente contínua, respectivamente. O

teste realizado no ano de 2019 é utilizado como base devido ser o primeiro teste realizado, e nesse caso o motor foi aprovado, satisfazendo assim todas as etapas de tensão.

Status de CC	Passar
Tipo de teste	Etapa-Tensão
Volts (V)	2000
I(μ A)	0,08
Resist	25838
A 40°C	

Figura 6.20 – Degrau de tensão, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Para o teste representado na Figura 6.21, o analisador detectou uma baixa leitura de resistência na escala de *megohm* ou um desarme de sobrecorrente, logo, nesta condição o teste é interrompido imediatamente e os terminais serão descarregados e aterrados de forma automática, neste teste do ano de 2021 o MIT foi reprovado.

Status de CC	OVER CURRENT
Tipo de teste	Etapa-Tensão
Volts (V)	1280
I(μ A)	95,50
Resist	13
A 40°C	6

Figura 6.21 – Degrau de tensão, Teste de DC (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

Ao analisar os resultados obtidos pela Figura 6.21 nota-se um afundamento de tensão e aumento de corrente, com isso, um valor baixo de resistividade indicando uma fuga de corrente para a carcaça do MIT. O valor de resistência é obtido através da aplicação de tensão e leitura de corrente e o *software* realiza todos os cálculos e mostra o resultado de resistência obtido.

A Figura 6.22 e a Figura 6.23 representa o gráfico do degraú de tensão do ano de 2019 e do ano de 2021, respectivamente. O gráfico gerado padroniza para plotar corrente versus tensão. Logo, os triângulos vermelhos indicam o nível atual de corrente versus tensão no final de cada etapa. Ao clicar nos botões de opção Corrente versus Tensão ou Corrente/tensão versus tempo, se determina o que será plotado no gráfico e na tabela.

A tensão é exibida em azul e a corrente em tempo real em vermelho. A linha verde com marcadores de triângulo indica a corrente no final de cada etapa. A Figura 6.22,

demonstra o motor que foi aprovado e a Figura 6.23, demonstra o comportamento gráfico obtido do motor que foi reprovado.

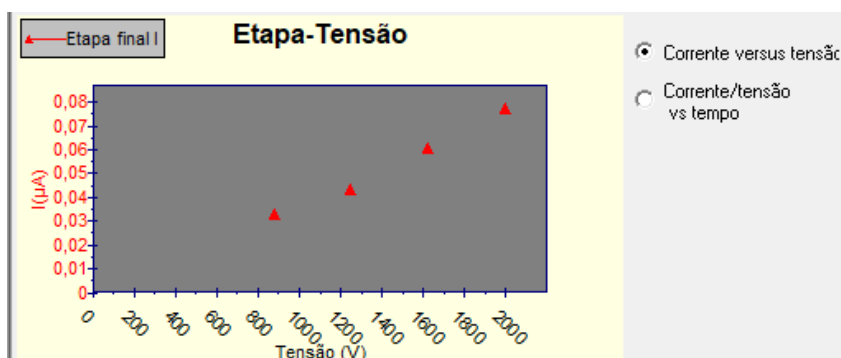


Figura 6.22 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

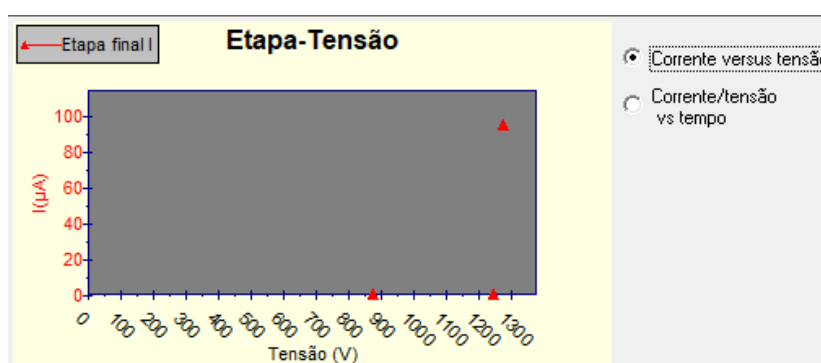


Figura 6.23 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

A Figura 6.24 e a Figura 6.25 representa o gráfico de degraude tensão da corrente e tensão, versus o tempo, do ano de 2019 e do ano de 2021, respectivamente. As grandes oscilações das linhas vermelhas de corrente em tempo real mostram a corrente de carga do motor, enquanto é o aumento de tensão. O motor aprovado representado pela Figura 6.24, apresenta essas grandes oscilações que não indicam um problema de isolamento, a preocupação aqui é normalmente dada à corrente no final da etapa de tensão, indicadas por triângulos na linha verde. As correntes de fim de etapa devem ser lineares.

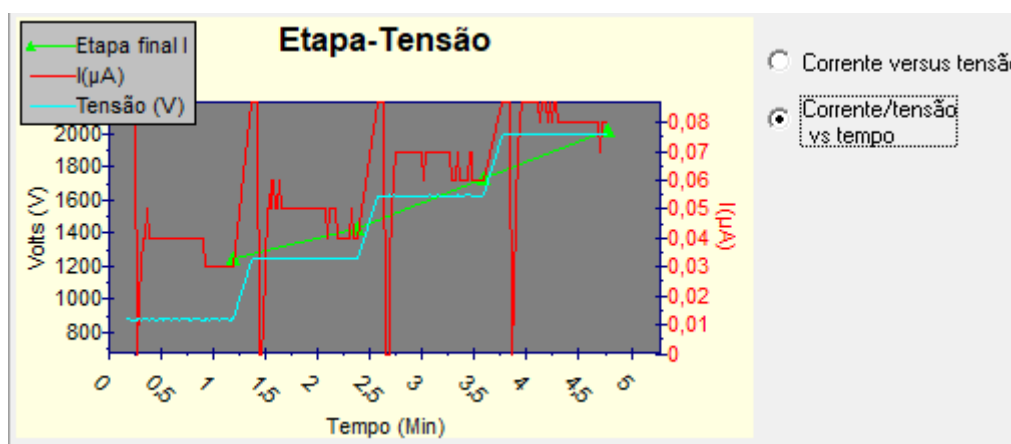


Figura 6.24 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Já a Figura 6.25, indica que o MIT foi reprovado devido a interrupção de corrente ou correntes de fuga altas que, por sua vez, são indicações de isolamento da parede de aterramento danificado. Comparando a etapa de tensão da Figura 6.24 com a Figura 6.25, nota-se que no intervalo de 2,4 min houve neste ponto um aumento de corrente perdendo o padrão de semelhança com o gráfico anterior.

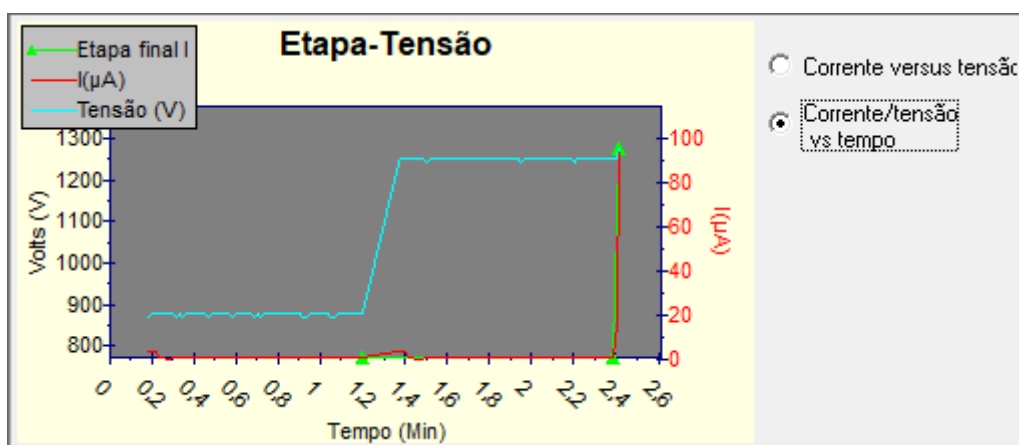


Figura 6.25 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

Os dados na Figura 6.26 e o dados da Figura 6.24 representa o degraude tensão, do ano de 2019 e do ano de 2021, respectivamente. Estes dados dos gráficos mostram: i) o tempo de teste por etapa, ii) a tensão de cada etapa, iii) a corrente de ponto final medida e iv) o valor *megohm* em cada ponto final.

Analisando os dados verifica-se que, no teste representado na Figura 6.26, para cada etapa de teste o tempo é fixo para cada degraude tensão, alterando o nível de tensão ao final de cada degraude e, à medida que o nível de tensão aplicada é elevado, nota-se a leitura de corrente e resistência com uma pequena variação.

Para análise de dados da Figura 6.27, verifica-se que a partir do terceiro degrau de tensão à uma variação repentina no tempo, então, o teste de degrau, prolonga o tempo de aplicação de tensão e observa-se que a corrente está elevada indicando a fuga de corrente.

Olhando em direção a resistência nota-se um comportamento incomum, pois, os valores de resistência estão acima do teste anterior representado na Figura 6.26. A partir do terceiro degrau nota-se um valor baixo de resistência obtida, deixando claro o a falha.

Tempo (s)	Volts (V)	I(μA)	Megohms
60	880	0,03	26841
60	1250	0,04	28894
60	1620	0,06	26594
60	2000	0,08	25838

Figura 6.26 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Tempo (s)	Volts (V)	I(μA)	Megohms	IR@40C
60	880	0,03	31944	15972
60	1250	0,04	31127	15563
145	1280	95,50	13	6

Figura 6.27 – Degrau de tensão (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

6.6.4 ANÁLISE DO SURGE TEST (PROVA DE IMPULSO)

Para efeito de análise utiliza-se o primeiro teste, representado na Figura 6.28 que é o *surge test* do ano de 2019. O teste está indicando os valores de pico, que são os valores máximos de tensão aplicada para cada fase e que o motor foi aprovado, atingindo todos os pontos de picos de teste.

A Figura 6.29 representa o *surge test* do motor realizado no ano de 2021. A indicação (ppEAR LIMIT) representado em cor vermelho indica que o MIT foi reprovado, não atingindo os valores máximos de tensão de pico a pico. Na Figura 6.29 está indicando que: i) na fase (L1) o valor de pico foi atingido, ii) na fase (L2) o valor de pico chegou a (1260 V) e iii) na fase (L3) houve um afundamento de tensão.

Status do surto	Passar
Volt(V) de pico L1	2020
Volt(V) de pico L2	2020
Volt(V) de pico L3	2020
Máx P-P EAR(%)	1,0/1,1/1,1
EAR 1-2/2-3/3-1(%)	Nenhum teste

Figura 6.28 – Teste surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

Status do surto	ppEAR LIMIT
Volt(V) de pico L1	2020
Volt(V) de pico L2	1260
Volt(V) de pico L3	0
Máx P-P EAR(%)	1,2/14,2/--
EAR 1-2/2-3/3-1(%)	Nenhum teste

Figura 6.29 – Teste surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

Para melhor visualização gráfica utiliza-se a forma de onda. O gráfico representado pela Figura 6.30, que é o teste de surto do ano de 2019, apresenta de forma sobreposta três formas de ondas. Neste gráfico fica visível a linearidade entre as ondas, ao lado esquerdo do gráfico tem-se a escala em nível de tensão e na parte inferior do gráfico tem-se a escala em microssegundos. Acima do gráfico, apresenta um quadro contendo as cores dos três condutores.

A Figura 6.30 apresenta em uma caixa de cor verde do lado direito superior a indicação (Passar) para representar que ele foi aprovado. O lado direito do gráfico apresenta a tensão de pico atingida, no valor de 2020 V. Para o teste em específico observa-se o valor de pico a pico, indicado pela nomenclatura (Máx P-P EAR), este valor não deve ultrapassar a 10%.

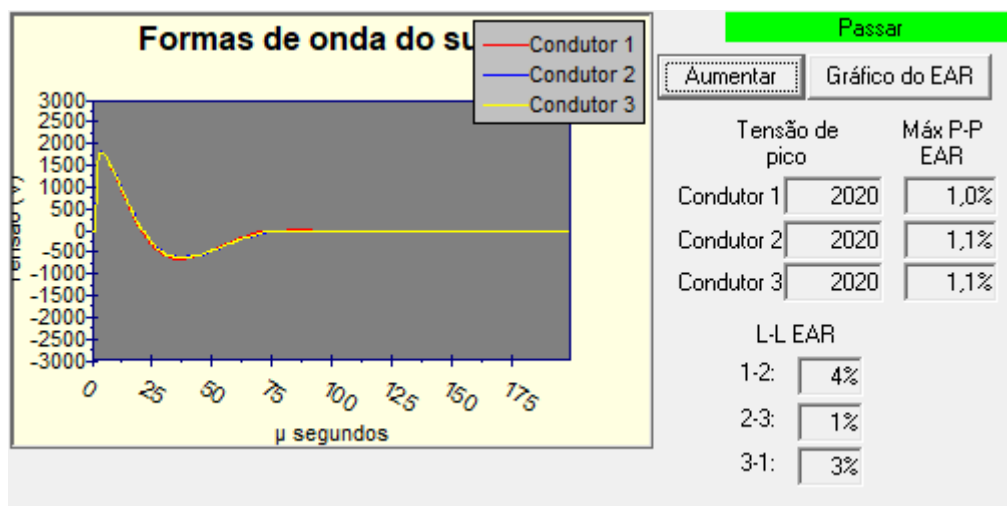


Figura 6.30 – Teste de surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2019)

A Figura 6.31 é o teste de surto do ano de 2021. O gráfico apresenta de forma defasada as três formas de ondas. Observando a escala em nível de tensão, do lado esquerdo do gráfico, nota-se que o condutor 2, representado pela cor azul, não atingiu o

nível máximo de tensão. A forma de onda de cor branca representa a falha e o condutor 3 é representado na cor amarela.

As cores branca e amarela são o mesmo teste, mas, como houve uma falha o gráfico traz uma forma de onda falha e uma linear. A Figura 6.31 apresenta em uma caixa de cor vermelha, do lado direito superior, a indicação (ppEAR LIMIT) para representar que ele foi reprovado, atingindo o limite máximo de variação que foi superior a 10 %. A tensão de pico no condutor 2 indica o nível de tensão de 1.260 pontos de falha do teste.

A tensão aplicada pode saltar através do isolamento fraco. Logo, removendo essas curvas desviadas do circuito reduz a indutância do circuito e faz com que a frequência da forma de onda soe mais rápido. Isso produzirá o deslocamento de frequência para a esquerda em forma de onda.

A tensão ou a amplitude do padrão de onda diminuí pela mudança na indutância. Isso é determinado quando a corrente varia com o tempo e quando existe uma perda de isolamento entre as voltas de espiras. O resultado é um arco de baixa energia, uma mudança na indutância e, quando isso acontece, o padrão de onda torna-se instável e pode mudar rapidamente para a esquerda e para a direita e voltar à posição original novamente.

O padrão da onda observado durante um teste de impulso ou surto está diretamente relacionado à indutância da bobina. Existem outros fatores que influenciam o padrão da onda, mas a indutância é o principal (MEGGER, 2010).

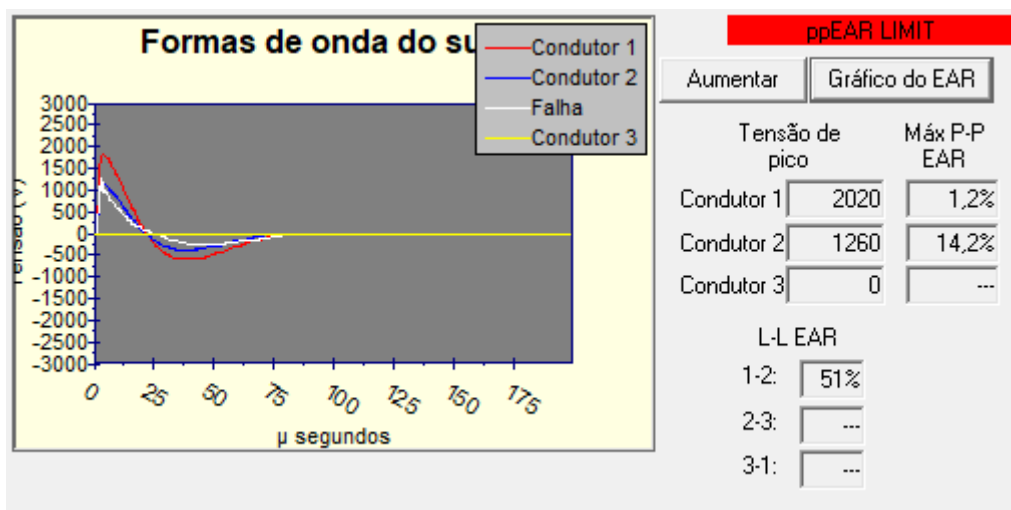


Figura 6.31 – Teste de surto (SOFTWARE BAKER AWA IV, 2021)

6.7. TOMADA DE DECISÃO COM OS RESULTADOS

Ao longo do Capítulo 6 foi apresentado as duas formas de resultados, que são: i) motor de indução trifásica aprovado e ii) motor de indução trifásico reprovado.

Levantando a hipótese de que, para esse mesmo MIT se ele tivesse sido somente aprovado no ensaio, as análises de dados seriam de outra forma, pois ao avaliar as perdas dielétricas entre determinado tempo de ensaio, o analista dos dados teria que tomar como decisão diminuir ou manter o tempo de ensaio e abrir no motor as tampas dos eixos para análise interna.

Para o MIT aprovado no ano de 2019, nenhum dos ensaios realizados indicou que necessitaria de um rejuvenescimento ou abertura do motor para análise do bobinado, pois, baseado nas teorias descritas nos capítulos anteriores e colocado em prática com *Baker AWA-IV* nota-se um comportamento de acordo com as faixas estabelecidas no Capítulo 4 *Ensaio*s.

Já para o MIT reprovado no ano de 2021, o equipamento *Baker AWA-IVI* indica os pontos de reprovação do MIT, e através das análises de dados obtidos dos testes que foram aprovados, notasse uma perda de resistência que ao longo prazo levaria a queima. E, as ações tomadas para esse motor foram deixá-lo desligado para que possa ser retirado para avaliação.

A Figura 6.32 representa a imagem do MIT após a retirada do soprador para avaliação de bobinas internas. Já a Figura 6.33 é a imagem do bobinado do MIT, onde foi realizado a abertura das tampas do lado acoplado e oposto ao acoplado para avaliação de bobina. Nesta imagem é visível as ranhuras causadas pelo rotor, indicado pelas setas de cor vermelha.



Figura 6.32 – Motor retirado para análise interna (Cargill, 2021)

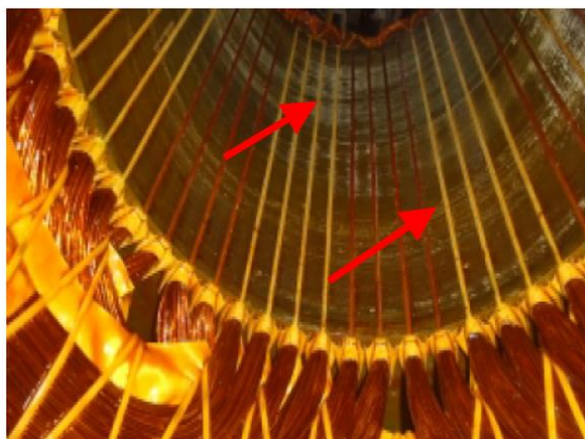


Figura 6.33 – Bobina interna do motor para análise (Cargill, 2021)

Tendo como referência a teoria descrita no *Capítulo 3 Falhas Em Máquinas Elétricas* que discorre sobre falhas em máquinas elétricas e ao analisar os rolamentos que se apresentam danificados, causando os desbalanceamentos do rotor, é possível constatar a causa da perda de dielétrico e baixa isolamento causada pelo aquecimento térmico. Logo, este motor deve ser enviado a reforma, para uma empresa especializada em manutenção de máquinas elétricas de indução.

6.8. DISCUSSÕES

O principal ponto de dificuldade encontrado durante a escrita do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi encontrar bibliografias e artigos que tratam de ensaios no MIT utilizando o equipamento *Baker AWA-IV*.

Em campo, as principais dificuldades encontradas estão relacionadas as condições dos equipamentos, quanto aos resíduos de sujidades nos pontos de conexões dos equipamentos, bem como zinabre e ferrugens nas porcas e chapas dos motores do MIT.

Outra dificuldade foi quanto a manutenção do equipamento, pois, o envio para o fabricante para o conserto de defeitos e o retorno demora um tempo considerável e, com isso, leva-se um tempo para o retorno e o prosseguimento das atividades. O alto custo de manutenção do equipamento *Baker AWA-IV* é outro ponto que impacta nos ensaios do MIT.

Durante os ensaios, levantou-se a discussão sobre erros cometidos quanto à falta de aterramento, pois, o equipamento é bem sensível a pontos onde não há tomadas com conexão a malha de aterramento, deve-se garantir um bom aterramento. Em um certo período o equipamento *Baker AWA-IV* já chegou a danificar por motivo de ponto de

aterramento falho. Então, é sempre bom ter uma boa malha de terra próxima ao ensaio a ser realizado para se evitar danificar o equipamento.

Já os pontos positivos do trabalho estão relacionados ao livre acesso dos autores do TCC à fábrica onde os motores MIT foram ensaiados. Possibilitando-se assim a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica, acerca dos equipamentos existentes em toda a cadeia do processo produtivo. Contribuindo, assim, para uma coleta de dados mais assertiva e para a facilidade no manuseio tanto dos motores de indução trifásicos quanto a utilização eficaz do equipamento *Baker AWA-IV*.

Como aspecto inovador este trabalho iniciou um ciclo de discussões acerca do emprego do equipamento *Baker AWA-IV* na detecção de falhas no MIT para uma previsibilidade de falhas e, com isso, garantir um bom plano de manutenção, seja preventiva, corretiva ou preditiva, a fim de, trazer um ganho financeiro quanto as paradas indesejadas de linhas de produção no ambiente de fábrica.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Este trabalho promoveu discussões relacionadas ao equipamento *Baker AWA-IV (Megger)*, tendo como objetivo realizar um estudo teórico e de caso, através de pesquisas sobre a tecnologia e a prática executada em ensaios com o uso de tal instrumento na linha de produção de uma fábrica.

O desenvolvimento do trabalho foi realizado respeitando as seguintes etapas de ensaios: i) definir e preparar o MIT, ii) preparar o equipamento *Baker AWA-IV (Megger)*, iii) conectar o *Baker AWA-IV (Megger)*, iv) realizar o ensaio do MIT, e v) analisar os resultados dos testes e verificar se o MIT está aprovado ou reprovado.

Para a definição do motor de indução trifásico (MIT), foi proposto os seguintes critérios: i) motores com características de envelhecimento, ii) locais úmidos, iii) equipamentos com histórico de falha, iv) críticos para a produção, v) custos de reparação, vi) tempo para reparação e sobressalentes disponíveis, vii) motores altamente sobrecarregados, viii) motores de difícil manutenção, ix) motores pesados, x) motores que exigem guindastes para substituição ou mesmo abertura de edifícios e remoção de estruturas, xi) motores caros, xii) motores especiais, xiii) grandes motores, xiv) motores à prova de explosão e xv) motores onde não há peças sobressalentes.

E de forma sucinta abordou-se sobre os diferentes modelos de equipamentos, que são utilizados para detecção de falhas em MIT, com destaque para o equipamento *Baker AWA-IV (Megger)*. Foi abordado ainda sobre as teorias envolvendo o ensaio elétrico aplicado através do *Baker AWA-IV*, assunto que estava fora do nosso domínio de conhecimento e levou os autores a uma capacitação através de pesquisas e estudos em manuais, normas e livros.

Com a escolha do MIT, soprador de ar comprimido, da fábrica da Cargill de Goiânia, que é utilizado para aeração da lagoa 1 e 2 da área de tratamento de resíduos E.T.E (Estação de tratamento de efluentes), pode-se concluir com eficácia a coleta de dados após ensaio do MIT, com o uso do instrumento *Baker AWA-IV*. Com a análise dos dados no equipamento *Baker AWA-IV* chegou-se à conclusão de que o soprador de ar comprimido apresentou o resultado de aprovado (PASS) e a partir desses resultados pode-se definir futuras manutenções preditivas do MIT. E para o motor reprovado (FAIL) este foi encaminhado a reforma, para uma empresa especializada em manutenção de MIT.

A análise dos dados obtidos foram de grande importância para fazer as comparações do ensaio anterior com o atual, pois, através da realização da análise se obteve conhecimento para interpretar os dados e diagnosticar de forma preditiva as condições do MIT.

Como sugestão para um próximo passo a ser realizado nos estudos ou pesquisas sobre os ensaios no MIT utilizando o equipamento *Baker AWA-IV* recomenda-se, realizar ensaios em diferentes tipos de MIT e realizar a comparação com os resultados obtidos neste trabalho. Desta forma, contribui-se para a evolução na detecção de falhas dos diferentes tipos de manutenção preditiva, preventiva e corretiva.

Para finalizar, recomenda-se empregar o equipamento *Baker AWA-IV* em diferentes tipos de motores e fazer uma correlação com os resultados aqui apresentados para se comparar os mesmos ganhos obtidos com o equipamento *Baker AWA-IV*. E, também verificar se os resultados obtidos nesse trabalho, dentre os tipos de ensaios, i) *surge test*, ii) Hipot, iii) medição de resistência, iv) perdas dielétricas, há outros cenários empregados com algum deles com um maior índice encontrado em falhas no MIT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. T. **Análise de vibrações na manutenção preditiva de motores elétricos**. Technical report, 1996.

ALL-TEST. **Deenergized Motor Circuit Analysis (MCA) Testing Instrument**. [S. l.]. Disponível em: <https://alltestpro.com/motor-testing-products/deenergized/all-test-pro-7/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-17094-3: Máquinas elétricas girantes - Parte 3: Motores de indução trifásicos - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018, P.10-11.

BACCARINI, Lane Maria Rabelo. **Deteção e diagnóstico de falhas em motores de indução**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais; UFMG.

BARBOSA, Luiz Henrique Arantes et al. **Teste para Prognósticos de Falhas em Motores de Indução: Discussão Teórica e Estudo de Caso**. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020.

BERTEQUINI, Fábio. **Introdução a medidas elétricas**. p.2. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo-1_medidas-eletricas_fabiobleao.pdf, Acesso em: 02 dez. 2022.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. AMGH editora, 2013.

DA SILVA, Marcos Antônio; GONZALEZ, Y.; LOSADA, Manuel. **Influência de fatores da manutenção que afetam a vida útil dos motores de indução**. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas. 2008.

DE ALMEIDA, Paulo Samuel. **Manutenção Mecânica Industrial–Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. Saraiva Educação SA, 2018.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Prentice-Hall do Brasil, 1994.

DEKHANDJI, Fatma Zohra; HALLEDJ, Salah Eddine; ZABOUB, Oussama. **Predictive Maintenance Applied to Three Phase Induction Motors**. Algerian Journal of Signals and Systems, v. 4, n. 2, p. 71-88, 2019.

DOS SANTOS, Ricardo Viol. **MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO**. 2013. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.

EASA – The Electro-Mechanical Authority. **Root Cause Failure Analysis, 2nd Edition**. 2002.[S. l.]. Disponível em: <https://easa.com/training/private-seminars/root-cause-failure-analysis>. Acesso em: 05 jun.2022.

ENGENHEIROS. associados.com.br. **Documento eletrônico**. [S. l.].Disponível em <https://www.engenheirosassociados.com.br/servicos/testes-e-ensaios-em-equipamentos-esistemas>. Acesso em 13 mar. 2022.

FLUKE. **Megohmetro digital – 1550c**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/testadores-de-isolamento/fluke-1550c-kit> . Acesso em: 05 jun. 2022.

FRANCISCO, António MS. **Motores de indução trifásicos**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2006.

GOMES, Sinésio Raimundo. **Aula 17 - Energização de motor de indução com 12 terminais**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <http://maquinaseletricasi.blogspot.com/2016/03/manutencao-industrial-aula-13.html>. Acesso em: 05 jun. 2022.

HISTORY, **Nist.gov. Documento eletrônico**. [S. l.]: s.d.. Disponível em < <https://www.nist.gov/history> > Acesso em 16 maio 2022.

HITTEL, Michael J.; BINGHAM, Richard; SANDERS, Melvin K. **NFPA 70B recommended practice for electrical equipment maintenance 2002 edition**. In: 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. IEEE, 2003.

IEC TS 61934:2011, **Electrical insulating materials and systems - Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses**. [S. l.]: 2011.

IEC TS 60085:1984, **Thermal evaluation and of electrical insulation**. [S. l.]: 1984.

IEEE Std 118-1978, (Revision of IEEE Std 118-1949). **IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement**. [S. l.]: s.d..

IEEE Std 43- 2013, **Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery** (Revision of IEEE Std 43-2000). [S. l.]: s.d..

IEEE Std 95-2002, **Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage**. (Revision of IEEE Std 95-1977). [S. l.]: s.d..

IEEE Std 522-2004, **Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines** (Revision of IEEE Std 522-1992). [S. l.]: s.d..

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. Globo, 1985.

KUCHENBECKER, Walter. **Critérios para avaliação do sistema de isolação de máquinas elétricas girantes para a realização de serviços**. Artigo técnico WEG, Artigo técnico WEG, 2020.

LIMA, Enio Camilo de. **Diagnóstico de Motores de Indução Trifásicos operando em Redes Desequilibradas e Distorcidas**. 2016.

MELO, Pedro. **Manutenção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos**. 2015.

MEGGER. Baker AWA-IV - **Analizador de Motor Estático**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <https://megger.com/static-motor-analyzer-baker-awa-iv>. Acesso em: 06 dez. 2021.

MEGGER. Baker AWA-IV - **User manual Part number: 71-025, rev.V11, 2013.** [S. l.]: 2013. Disponível em: <https://pt.scribd.com/home-PUB-CM-I4-71-025-EN-V11-Baker-AWA-IV-User-manual-2013>. Acesso em: 15 maio 2022.

MEGGER. Baker AWA-IV - **User manual Part number: 71-015, rev.11, 2010.** [S. l.]: 2010. Disponível em: <https://pt.scribd.com/home-PUB-CM-I4-71-015-EN-V11-Baker-AWA-IV-User-manual-2010>. Acesso em: 15 maio 2022.

MEGGER. Baker AWA-IV - **User manual Part number: 71-015, rev.6, 2019.** [S. l.]: 2019. Disponível em: <https://pt.scribd.com/home-Baker-AWA-IV-QRG-English-2019>. Acesso em: 15 maio 2022.

MEGGER. **High-voltage test equipment for testing motors when they are off-line.** [S. l.]: s.d.. Disponível em: <https://megger.com/products/motor-and-generator-testing/static-analyzers>. Acesso em: 02 dez. 2022.

NASCIMENTO, Alan de Araújo Rodrigues; DE SOUZA MOREIRA, Josemar; ZAPAROLI, Isabela Oliveira. **Deteção de falhas de rolamentos em motores de indução utilizando análise do envelope de corrente.** In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020.

OLIVEIRA, Clareana Rangel. **Análise Energética e Econômica referente a Aquisição ou Recondicionamento de Motor Elétrico de Indução.** 2018.54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ONÍLIO, Alexandre Santos et al. **IOT em motores de indução trifásicos.** 2021.

PEÑA, Wilmar León. **1º Encuentro de Mantenimiento Predictivo.** 26 de abril 2012, El Salvador, Condition Monitoring Portables & Baker - Product Manager SKF Latintrade.

PEÑA, Wilmar León. **Mantenimiento Predictivo Eléctrico - Análisis Estático, Condition Monitoring Portables & Baker - Product Manager,** SKF Latintrade. 1º Encuentro de Mantenimiento Predictivo, 26 de abril 2012, El Salvador.

SALES, Luis Beltrán. **Prueba de Impulso o Surge em motores eléctricos y sus variables modernas de diagnóstico.** El Salvador, 2021.

SALES, Luis Beltrán. **Pruebas Eléctricas Estáticasy, Dinámicas em Máquinas Rotativas para el, Mantenimiento Predictivo.**(Manager CSA, Mexico and Canada Baker Instruments).

SALES, Luis Beltrán. **Encuentro de usuario estático.**(Manager CSA, Mexico and Canada Baker Instruments).

SAHRIN, A.; PURNOMO, M. H. **Three-phase electric motor isolation diagnosis modelling caused unbalance voltage using radial basis function network.** In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. p. 012092.

SILVA, Jonas Guedes Borges da. **Modelagem e Tratamento dos Sinais da Assinatura Elétrica de Máquinas para Melhoria do Diagnóstico de Falhas.** 2015.

SODRÉ, Ulysses. **Séries de Fourier**. 2012.

SMIT, Dave; RAGHURAM, Shankar. **Degradation and Diagnostics of Electrical Machines**. 2021.

STEPHANIE. **Statistics How To**, [S. l.]: jun. de 2016. Disponível em: <https://www.statisticshowto.com/power-law/>. Acesso em: 17 jun. 2022.

STONE, Greg C. et al. **Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair**. John Wiley & Sons, 2004.

POSTÓL SOBRINHO, Alexandre et al. **Critérios de projeto e construção de motores de indução trifásicos de alta rotação**. 2008.

RAIMUNDO, Sinésio. **Aula 13 - Motores de Indução Monofásico e Trifásico**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <http://maquinaseletricasi.blogspot.com/2016/03/manutencao-industrial-aula-11-inspecao.html>. Acesso em: 06 mar. 2022.

THORSEN, Olav Vaag; DALVA, Magnus. **A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries**. IEEE transactions on industry applications, v. 31, n. 5, p. 1186-1196, 1995.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. AMGH Editora, 2014.

WEG. **Motores de indução trifásicos de baixa e alta tensão linha M - Rotor de gaiola - Horizontais**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: https://www.weg.net/institutional/BR/pt/search/downloadcenter?q=motores+el%C3%A9tricos+de+indu%C3%A7%C3%A3o&mediaContainerName=MKT_DOWNLOAD_USER_MANUALS_CONTAINER&languageIsoCode=*. Acesso em: 15 jun. 2022.

WEG. **Motores de indução trifásicos de baixa e alta tensão - Rotor de anéis**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: https://www.weg.net/institutional/BR/pt/search/downloadcenter?q=motores+el%C3%A9tricos+de+indu%C3%A7%C3%A3o&mediaContainerName=MKT_DOWNLOAD_USER_MANUALS_CONTAINER&languageIsoCode=*. Acesso em: 15 jun. 2022.

WEG. **Qual é o intervalo de relubrificação dos rolamentos?** [S. l.]: s.d.. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/contact/faq?page=173>. Acesso em: 15 jun. 2022.

WEG. **Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.kmabrasil.com.br/produtos/arquivos/weg-motores-eletricos-3785.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2022.

WEG. **Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.kmabrasil.com.br/produtos/arquivos/weg-motores-eletricos-3785.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2022.

WILSON, John. **Current state of surge testing induction machines**. In: Iris Rotating Machine Conference. 2003. p. 1-13.

YOKOGAWA. **Megohmetro a Manivela – 2404**. [S. l.]: s.d.. Disponível em: <http://www.yokogawa.com.br/tm/produtos/portateis/megohmetro-manivela-2404.html>. Acesso em: 23 jun. 2022.

ZAMBRANO, José Miguel. **Análisis Estático Nivel – 1**, SKF Venezolana S.A, SKF – DPC Fort Collins Líder de Desarrollo de Negocios Baker, LAM Trainer SKF Fort Collins, 2015.