

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VANESSA NEVES HÖPNER

MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DA ISOLAÇÃO DO FIO
ESMALTADO EM ESTADORES DE MOTORES ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR
INVERSORES DE FREQUÊNCIA

CURITIBA

2021

VANESSA NEVES HÖPNER

MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DA ISOLAÇÃO DO FIO
ESMALTADO EM ESTADORES DE MOTORES ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR
INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Ciências Exatas e Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Volmir Eugênio Wilhelm

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

H793m Höpner, Vanessa Neves
Modelo para determinação do tempo de vida da isolação do fio
esmaltado em estatores de motores elétricos alimentados por inversores
de frequência [recurso eletrônico] / Vanessa Neves Höpner – Curitiba,
2021.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Volmir Eugênio Wilhelm
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

1. Lógica Fuzzy. 2. Isoladores e isolamentos elétricos. 3. Fios
elétricos (esmaltados) I. Universidade Federal do Paraná. II.
Wilhelm, Volmir Eugênio. III. Aoki, Alexandre Rasi. IV. Título.

CDD: 621.46

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MÉTODOS NUMÉRICOS
EM ENGENHARIA - 40001016030P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **VANESSA NEVES HOPNER** intitulada: **Modelo para determinação do tempo de vida da isolamento do fio esmaltado em estatores motores elétricos alimentados por inversores de frequência.**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica
26/08/2021 20:51:14.0
ALEXANDRE RASI AOKI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
03/09/2021 10:37:49.0
GERMANO LAMBERT TORRES
Avaliador Externo (INSTITUTO GNARUS)

Assinatura Eletrônica
08/09/2021 19:01:01.0
ANSELMO CHAVES NETO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
27/08/2021 17:16:00.0
SÉRGIO HENRIQUE LOPES CABRAL
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde e força, guiando meu caminho.

Sou grata aos meus pais, Sônia e Maurício, pelo dom da vida e por acreditarem que sou capaz de superar os obstáculos que a vida apresenta e ao meu irmão Felipe, pela amizade sincera e por comemorar minhas realizações.

Em especial, ao meu marido Emerson e aos meus filhos Artur, Vitor e André, que estão ao meu lado em todos os momentos, seu carinho, sua confiança, seu esforço e seu reconhecimento tornam minha vida completa e realizada.

Ao professor e coorientador, Alexandre Rasi Aoki e ao amigo, Waldiberto de Lima Pires, pela paciência, dedicação e disponibilidade. Obrigada por aceitarem o desafio, por todos os momentos de discussão e por compartilharem seus valiosos conhecimentos.

Ao técnico de laboratório, Edson Spezia, pelo auxílio na preparação das amostras, organização dos equipamentos e desenvolvimento dos ensaios. Sua participação foi fundamental para realização do trabalho.

Aos engenheiros, Rodrigo Souza Aguiar e Cezar Armando Cunha Varnier, pela experiência e suporte técnicos compartilhados para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador, professor Volmir Eugênio Wilhelm, por aceitar e confiar na proposta de trabalho de pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, por sua participação, avaliação e pelas valiosas contribuições.

Aos professores e servidores da Universidade Federal do Paraná, que auxiliaram no desenvolvimento das atividades do curso de doutorado.

Ao Instituto Federal Catarinense e ao povo brasileiro, pela oportunidade de afastamento integral das atividades.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água
no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

(MADRE TERESA DE CALCUTÁ)

RESUMO

Os motores de indução acionados por inversores de frequência são usados em transporte, bombas, compressores, ventiladores, máquinas-ferramentas, robótica, veículos híbridos ou elétricos, máquinas de lavar, entre outras aplicações. A maioria destas aplicações é alimentada por baixa tensão e, sendo os motores robustos e com custos moderados, explica-se sua popularidade. Os inversores de frequência apresentam curto tempo de elevação e alta taxa de variação da tensão no tempo, muito diferente da onda senoidal. Como os motores elétricos abordados possuem bobinas montadas aleatoriamente, a primeira e a última volta da bobina podem ser adjacentes, sendo que isolação deve suportar a tensão total da fase, acrescentada pela sobretensão. Se a tensão de início da descarga parcial for atingida, a isolação pode ser degradada prematuramente, devido à atividade de descarga parcial. Neste contexto, uma estimativa para o tempo de vida útil torna-se uma questão fundamental para a avaliação da confiabilidade do motor, principalmente porque considera-se que muitas falhas tem origem na degradação da isolação do enrolamento do estator. Esta degradação é influenciada pelo estresse térmico e elétrico, investigados e caracterizados neste trabalho, com o objetivo de construção de um modelo que quantifica o tempo de vida do fio esmaltado, utilizado em estatores de motores elétricos alimentados por inversor de frequência. Com a utilização do sistema de inferência *fuzzy* foi possível identificar e implementar os conhecimentos dos especialistas, que acumularam observações práticas sobre o fenômeno e puderam auxiliar na formulação e validação do modelo proposto. A seleção das variáveis de entrada foi realizada a partir da análise de dados experimentais e avaliação de artigos científicos que abordaram o problema. Foi desenvolvido um ensaio de degradação acelerada, baseado em normas e literatura, para validação dos resultados do modelo proposto. Os resultados obtidos demonstraram os efeitos sinérgicos da temperatura, tempo de subida, tensão e frequência de chaveamento, fornecendo informações sobre o tempo de vida da isolação, ao testar o fio sob uma série de condições de ensaio de envelhecimento acelerado. Efetivou-se a principal contribuição da tese, com o desenvolvimento de um modelo que considera fatores particularmente relevantes na estimativa do tempo de vida da isolação do fio esmaltado, indicando uma metodologia de validação que poderá ser estendida para diferentes tipos de fio. Isto fornecerá subsídios para desenvolver novas tecnologias de esmaltes utilizados nos fios e na impregnação de motores e, testar comparativamente a qualidade de fios esmaltados disponíveis atualmente no mercado.

Palavras-chave: isolação do fio esmaltado; descarga parcial; estresse elétrico; envelhecimento térmico; inversor de frequência; sistema *fuzzy*.

ABSTRACT

Induction motors driven by variable speed devices are used in transport, pumps, compressors, fans, machine tools, robotics, hybrid or electric vehicles, washing machines, etc. Most of these applications are powered by low voltage and, as the motors are robust and cost-effective, this explains their popularity. Frequency inverters have a short rise time and a high rate of change in voltage over time, very different from the classic sine wave. As the electric motors discussed are built with a random coil, the first and last turns of the coil can be adjacent, and the insulation must support the total phase voltage, enhanced by the overvoltage. If the partial discharge onset voltage is reached, the insulation may be degraded prematurely due to partial discharge activity. In this context, an estimate for the useful life time becomes a fundamental issue for the reliability evaluation, mainly because it is considered that many failures originate in the degradation of the stator winding insulation. This degradation is influenced by thermal and electrical stress, investigated and characterized in this work, with the aim of building a model that quantifies the lifetime of the enameled wire used in electric motors powered by a frequency inverter. Using the fuzzy inference system, it was possible to identify and implement the knowledge of experts, who accumulated practical observations on the phenomenon and could help in the formulation and validation of the proposed model. The selection of input variables was carried out from the analysis of experimental data and evaluation of scientific articles that addressed the problem. An accelerated degradation test was developed, based on norms and suggestions from the literature, to validate the results of the proposed model. The results obtained were very promising and will serve as a reference to encourage investments in the continuation of these researches seeking to deepen the study of the synergistic effects of temperature, rise time, voltage and switching frequency, providing information on the lifetime of the insulation, when testing the wire under a series of sets of various conditions. The main contribution of the thesis was made, with the development of a model that considers particularly relevant factors in estimating the lifetime of the enameled wire insulation, indicating a validation methodology that can be extended to different types of wire. This will provide subsidies to develop new enamel technologies used in wires and motor impregnation, and to comparatively test the quality of enameled wire currently available on the market.

Keywords: enameled wire insulation; partial discharge; electrical stress; thermal aging; frequency inverter; fuzzy system.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTATOR BOBINADO.....	21
FIGURA 2 – FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE NOS TERMINAIS DO MOTOR SOB ALIMENTAÇÃO PWM.....	23
FIGURA 3 – DEGRADAÇÃO OCASIONADA POR DESCARGAS PARCIAIS.....	25
FIGURA 4 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TRIANGULAR (A) E TRAPEZOIDAL (B)	30
FIGURA 5 – ESQUEMA DO SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	32
FIGURA 6 – SELEÇÃO DOS ARTIGOS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO.....	37
FIGURA 7 – PAR TORCIDO (CORPO DE PROVA).....	53
FIGURA 8 – DIAGRAMA DO ENSAIO.....	54
FIGURA 9 – MODELO PROPOSTO.....	55
FIGURA 10 – ENSAIO TGA.....	58
FIGURA 11 – TEMPO DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA <i>SOFTWARE</i> PYRIS®.....	59
FIGURA 12 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA ET.....	60
FIGURA 13 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA TENSÃO	63
FIGURA 14 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA FC.....	65
FIGURA 15 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE SAÍDA VidaFio.....	67
FIGURA 16 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	71
FIGURA 17 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS PROBABILÍSTICOS PARA A CONDIÇÃO DE 1,25 kHz – 750 V – 180 °C.....	75
FIGURA 18 – TEMPO DE VIDA PARA TENSÃO BAIXA.....	78
FIGURA 19 – TEMPO DE VIDA PARA TENSÃO MÉDIA.....	79
FIGURA 20 – TEMPO DE VIDA PARA TENSÃO ALTA.....	80
FIGURA 21 – TEMPO DE VIDA PARA ENVELHECIMENTO TÉRMICO.....	82
FIGURA 22 – TEMPO DE VIDA PARA FREQUÊNCIAS DE CHAVEAMENTO.....	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TENSÃO DE INÍCIO DE DESCARGA PARCIAL (PDIV).....	61
TABELA 2 – CATEGORIAS DE ESTRESSE ELÉTRICO.....	62
TABELA 3 – TEMPOS DE VIDA RESULTANTES DO ENSAIO DE DEGRADAÇÃO.....	73
TABELA 4 – AIC _c DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE PARA AS CONDIÇÕES DE TESTE.....	74
TABELA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO ENSAIO E MODELO PROPOSTO.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AICc	- <i>Akaike Information Criterion</i> corrigido
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
ANSI	- <i>American National Standards Institute</i>
CA	- Corrente alternada
CC	- Corrente contínua
CDA	- Centro de Área
CLP	- Controle eletrônico de proteção
CR	- Método de Coats-Redfern
d.d.p.	- diferença de potencial
DoE	- <i>Design of Experiments</i>
DP	- Descargas parciais
ET	- Envelhecimento térmico
FC	- Frequência de chaveamento
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	- <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
NEMA	- <i>National Electrical Manufacturers Association</i>
MW	- Magnet wire
PDIV	- Valores limiares de tensão para início das descargas parciais ou <i>inception partial discharge voltage</i>
PWM	- Modulação por Largura de Pulso ou <i>Pulse Width Modulation</i>
TGA	- Método de termogravimetria
TSC	- Corrente estimulada termicamente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA E CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS.....	18
1.4 ESTRUTURA DA TESE.....	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO OU ASSÍNCRONO COM ESTATOR DE ENROLAMENTO ALEATÓRIO.....	20
2.2 ACIONAMENTO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	22
2.3 DESCARGAS PARCIAIS E FATORES DE INTERESSE.....	24
2.3.1 Tempo de subida.....	25
2.3.2 Frequência de chaveamento.....	26
2.3.3 Temperatura e envelhecimento térmico.....	26
2.4 SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	28
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	33
3.1 METODOLOGIA.....	33
3.1.1 Termos de busca e bases de dados.....	33
3.1.2 Exclusão dos duplicados.....	34
3.1.3 Relevância temática.....	34
3.2 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO.....	36
3.3 CONTRIBUIÇÕES DOS ARTIGOS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO.....	38
3.3.1 Sobre revisões e normas.....	39
3.3.2 Sobre descargas parciais.....	40
3.3.3 Sobre os fatores que causam envelhecimento do isolamento.....	42
3.3.4 Sobre modelos.....	44
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	45
4 MATERIAIS E MÉTODO.....	48
4.1 MATERIAIS.....	48
4.1.1 Softwares.....	48
4.1.2 Normas técnicas.....	49

4.1.3 Ensaio de degradação acelerada da isolação dos fios esmaltados.....	52
4.2 MODELO PROPOSTO.....	54
4.2.1 Fuzzificação.....	55
4.2.1.1 Variável de Entrada: Envelhecimento Térmico (ET).....	55
4.2.1.2 Variável de Entrada: Tensão.....	60
4.2.1.3 Variável de Entrada: Frequência de Chaveamento (FC).....	64
4.2.1.4 Variável de Saída: Tempo de Vida.....	65
4.2.2 Base de regras e inferência.....	67
4.2.3 Defuzzificação.....	70
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1 MODELOS PROBABILÍSTICOS PARA AJUSTE AOS DADOS DO ENSAIO DE DEGRADAÇÃO.....	73
5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO <i>FUZZY</i> PROPOSTO.....	75
5.3 TEMPO DE VIDA ESTIMADO PELO MODELO PROPOSTO.....	76
5.3.1 Perspectiva da tensão e envelhecimento térmico.....	77
5.3.2 Perspectiva da frequência de chaveamento.....	83
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	85
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE 1 – METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DO FIO ESMALTADO UTILIZADO EM ESTADORES DE MOTORES ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	98

1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são essenciais para o processo produtivo e perfazem uma quantia expressiva de custos à indústria brasileira. Em 2018, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) estimou que os mesmos são responsáveis por 68% do consumo de energia elétrica nas empresas e que 27% de toda a energia consumida no Brasil está relacionada aos motores elétricos. Muitas vezes os motores elétricos acabam por ultrapassar décadas de uso sendo que, aproximadamente 20% deles, chegam a 25 anos, conforme aponta a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN). A modernização da indústria, tendo o motor elétrico como um dos seus protagonistas, permite a redução de custos operacionais e uma economia de até 60% no consumo de energia elétrica. Uma renovação da indústria gera ganhos ambientais e sociais, sabendo que existem 537 mil unidades industriais em funcionamento no país e o setor industrial consome cerca de 41% da energia elétrica no Brasil (GRUPO WEG, 2020, não p.)

A evolução tecnológica e a redução de custos das fontes eletrônicas chaveadas dos inversores estáticos de frequência permitem melhorias na forma de onda modulada de saída e geram aumento considerável no rendimento dos motores elétricos de baixa tensão que são acionados por estes dispositivos amplamente utilizados no setor elétrico. Os inversores atuam como uma interface entre a fonte de energia (rede) e o motor de indução gerando nos enrolamentos do estator do motor, em cada segundo, milhares de pulsos de tensão com tempos de subida extremamente curtos. Para Wheeler (2005), dependendo das características de controle (resistores de gate, capacitores, tensões de comando, etc.) e da modulação adotada, estes pulsos repetitivos em combinação com as impedâncias do cabo e do motor, podem gerar sobretensões nos terminais do motor, reduzindo seu tempo de vida pela degradação acelerada do seu sistema de isolamento. É de suma importância que seja investigada a capacidade do isolamento do motor, de modo a suportar o estresse provocado pelos efeitos da utilização do inversor.

O impacto da temperatura é considerado o principal fator operacional, causando a degradação das propriedades de isolamento de baixa tensão. O aquecimento prolongado durante a operação da máquina elétrica é inevitavelmente acompanhado pelo envelhecimento térmico do sistema de isolamento do

enrolamento. Segundo Kaufhold *et al.* (2000), o estresse elétrico era considerado insignificante, porque a magnitude e a elevação da tensão eram muito inferiores à tensão de ruptura mesmo para um isolamento envelhecido, assim como a tensão de início da ionização. Após a introdução do método de eficiência energética para regular a velocidade dos acionamentos elétricos, com base na modulação por largura de pulso, a natureza e magnitude das tensões elétricas que atuam nos enrolamentos de baixa tensão foram alteradas (FENGER, CAMPBELL e PEDERSEN, 2003, p. 22, tradução nossa).

Os avanços na qualidade dos vernizes utilizados na isolação impactaram nas características térmicas, mecânicas e dielétricas, logo o motor de indução padrão operando em baixa tensão, geralmente é capaz de suportar as formas de onda de tensões encontradas na maioria dos inversores. Porém, o tipo de estresse elétrico anormal ao qual o isolamento fica sujeito é maior em relação a distribuição da tensão senoidal, principalmente nas primeiras espiras, ou na última, dependendo do projeto do enrolamento (FENGER, CAMPBELL e PEDERSEN, 2003, p. 23, tradução nossa). Como resultado, o aumento da tensão local pode ser suficiente para a ocorrência de estresse no campo elétrico iniciando a atividade de descarga parcial (DP) que ocasionam a deterioração do isolamento do fio (HAYAKAWA *et al.*, 2008). Os diversos aspectos de geração e impacto da DP devem ser avaliados quando se estuda a vida útil do isolamento de fios magnéticos.

Sendo o motor de indução uma máquina robusta e de construção simples, o contexto operacional e numerosos estudos indicam que o sistema de isolamento de máquinas elétricas de baixa tensão é o elemento mais fraco em termos de confiabilidade e sua vida útil depende quase exclusivamente do tempo de vida da isolação do enrolamento do estator (*Association for Instrumentation, Control, Automation e Rotating Electrical Machines Association*, 2016). A modelagem do tempo de vida é uma tarefa complexa devido ao grande número de fenômenos e fatores envolvidos. Segundo Maussion *et al.* (2015), o desenvolvimento de um modelo de vida útil baseado na física não é uma tarefa fácil e geralmente se concentra em um único fator e diferentes expressões têm sido propostas na literatura, como a lei de Arrhenius para um fator (STONE, 1993), utilizada pelos autores Gao *et al.* (2009), que destacaram a perda dielétrica como resultado do

aprofundamento do grau de estresse térmico. O Modelo de Eyring foi proposto no caso de múltiplos fatores (MAZZANTI, 2009).

Modelos empíricos e físicos foram desenvolvidos para relacionar o mecanismo de envelhecimento do isolamento ou vida útil com fatores de estresse aplicados apresentados nos trabalhos dos autores Mazzanti (2009), Escobar e Meeker (2006) e Li *et al.* (2013). Estes modelos são restritivos, pois levam em consideração apenas um ou dois fatores como no caso do modelo proposto pelos autores Cavallini, Fabiani e Montanari (2010). De acordo com Gjaerde (1995, tradução nossa), na prática a vida útil do isolamento do fio esmaltado é sensível a inúmeros fatores e suas interações e os modelos propostos deveriam incluir vários parâmetros relacionados ao material estudado. No entanto, estes modelos geralmente requerem configurações experimentais complexas para determinar as propriedades físicas dos materiais estudados e as constantes de ajuste necessárias. Uma forma alternativa de resolver esse problema é desenvolver modelos de expectativa de vida com base em medições experimentais, ou seja, modelos matemáticos que se ajustem aos dados experimentais. O conhecimento físico dos fenômenos envolvidos pode ajudar a escolher a forma e os fatores apropriados. Um exemplo de modelo para estimar a vida útil dos fios magnéticos na presença de multiestresse foi desenvolvido por Grzybowski *et al.* (2004) que utiliza os dados de falha dos testes de envelhecimento para obter parâmetros elétrico-térmico e da frequência.

Em outros três trabalhos escritos pelos autores Szczepanski *et al* (2017, 2018, 2020) foi adotada uma metodologia para investigar e analisar o processo de envelhecimento variando frequência e tensão para um tipo de fio esmaltado e depois para três tipos. No trabalho mais recente, também foram avaliados os efeitos da temperatura para os três tipos de fios esmaltados. As previsões realizadas para o tempo de vida foram obtidas por Planejamento de Experimentos ou, do inglês, *Design of Experiments* (DoE) e na distribuição estatística de Weibull. Divljakovic *et al.* (1994) também utilizam Planejamento de Experimentos (DoE) para avaliar os resultados do efeito de multiestresse (alta temperatura, alta frequência e alta-tensão) nas características de vida útil de fios magnéticos de calibre fino.

Uma premissa considerada na maioria dos modelos desenvolvidos foi que o caráter eletro-térmico promove o envelhecimento sob a ação dos pulsos de

sobretensão gerados pela fonte de tensão baseada em inversor PWM, verificando-se que a tensão, a temperatura e a frequência de chaveamento são os fatores mais utilizados na modelagem de tempo de vida do isolamento do fio esmaltado. A complexidade na determinação das interações entre estes fatores exige a escolha de um delineamento capaz de simular diversas condições para as variáveis selecionadas e contemplar a necessidade de considerar as imprecisões ou incertezas na quantificação das informações.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca pela eficiência energética e melhoria no controle e desempenho operacional demanda a utilização dos inversores estáticos de frequência, comercialmente conhecidos também como inversores de frequência, para o acionamento e controle da rotação de motores elétricos. Estes motores possuem papel fundamental no controle de processos, automação de fábrica, robótica, veículos autônomos, mobilidade e conservação de energia.

A utilização de inversores de frequência com Modulação por Largura de Pulso ou *Pulse Width Modulation* (PWM), como fonte de alimentação de motores elétricos surge acompanhada de alguns fenômenos indesejáveis, entre eles destaca-se que os enrolamentos do estator do motor ficam sujeitos, em cada segundo, à milhares de impulsos de tensão com tempos de subida extremamente curtos, que ocorrem especialmente com longas linhas de alimentação entre o inversor e o motor. Uma alta taxa de variação da tensão no tempo (dV/dt) gera aumento no campo elétrico e exceder uma intensidade de campo mínima se aplica como pré-requisito para existência de descargas entre condutores nas bolhas de ar onde o material impregnante não preencheu, chamadas de descargas parciais. Neste contexto de estresse elétrico, em combinação com os demais efeitos da aplicação devido à temperatura, vibração ou condições ambientais influenciam na redução da vida útil do sistema de isolamento dos motores elétricos (STONE E CULBERT, 2014).

O entendimento das interações existentes e o desenvolvimento de um modelo que determine o tempo de vida do isolamento do fio esmaltado, para aplicações de uso geral, é extremamente importante para que as indústrias invistam

na inovação e tecnologia que permitam às empresas melhorar seus resultados e reduzir os altos custos operacionais, especialmente ligados à energia elétrica e manutenção. Bem como, quando se investe em equipamentos duráveis e eficientes, isto reflete em menor consumo energético por parte da sociedade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Contribuir para o desenvolvimento de modelos de vida útil de motores elétricos acionados por inversores de frequência.

1.2.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os fatores que influenciam no tempo de vida da isolamento do fio utilizado nos motores elétricos alimentados por inversores de frequência.
- Realizar e analisar experimentos para levantamento de informações sobre os fatores citados acima.
- Avaliar a aplicação do sistema de inferência *fuzzy* em modelos de vida útil de motores elétricos acionados por inversor de frequência.
- Elaborar um modelo para determinação do tempo de vida da isolamento do fio esmaltado empregado em estatores com bobinas enroladas aleatoriamente de motores elétricos de baixa tensão utilizando um sistema de inferência *fuzzy*.
- Validar o modelo desenvolvido através de resultados experimentais.

1.3 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA E CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

A presente tese apresenta uma abordagem para estimar o tempo de vida da isolamento do fio esmaltado utilizado em estatores com bobinas enroladas aleatoriamente de motores elétricos de baixa tensão que sofrem efeitos térmicos e elétricos devido ao aparecimento das descargas parciais, quando o motor é acionado pelo inversor de frequência. Estes efeitos são estudados de acordo com as

variáveis tensão, frequência de chaveamento e envelhecimento térmico através de um modelo que utiliza um sistema de inferência *fuzzy*.

Assim, a principal contribuição do presente trabalho caracteriza-se pela proposta de um modelo que, utiliza como fatores relevantes, a tensão, o envelhecimento térmico e a frequência de chaveamento para estimar o tempo de vida da isolação do fio esmaltado utilizado em bobinas de motores elétricos acionados por inversores de frequência. Sendo que a metodologia adotada para a validação desse modelo poderá ser estendida para diferentes tipos de fio. Além disso, foi considerado o conhecimento de padrões e normas que caracterizam os fatores que levam a deterioração da isolação. Outra contribuição foi a seleção de uma ferramenta inédita para o problema de pesquisa proposto, permitindo comparar os resultados de outros modelos desenvolvidos na literatura.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em seis capítulos. Nesta introdução, são apresentados: o contexto em que a pesquisa está inserida, o problema abordado, os objetivos e justificou-se a importância do estudo realizado. No capítulo 2, são revisados os conceitos, informações, técnicas e métodos utilizadas no desenvolvimento da pesquisa. Realiza-se a revisão de literatura no capítulo 3, através da apresentação dos artigos que discorrem sobre o tema e exposição das diferentes abordagens propostas para o problema. O capítulo 4 apresenta a descrição das variáveis e as etapas de aplicação do sistema de inferência *fuzzy*. Também no capítulo 4 tem-se uma breve descrição dos procedimentos para validação do modelo proposto. No capítulo 5, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados e compara-se com os resultados do modelo proposto. Realiza-se a discussão sobre os valores estimados para tempo de vida do fio esmaltado, avaliando se o modelo proposto incorpora são os resultados apresentados na revisão da literatura. As considerações finais e propostas de trabalhos futuros são descritas no capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No acionamento de cargas mecânicas utilizam-se motores elétricos, pois são dispositivos capazes de promover uma transformação de energia elétrica em energia mecânica com baixa perda, o que resulta em um rendimento elevado. Existem vários tipos de motores elétricos e, de uma maneira geral, são classificados conforme as características de sua alimentação: os de corrente alternada (CA) e os de corrente contínua (CC). Os motores de corrente alternada podem ser classificados em Síncronos e de Indução (Assíncronos), esta classificação está relacionada à velocidade de rotação do seu eixo. O motor CA de indução é a máquina elétrica mais utilizada em acionamentos elétricos, sendo que as principais razões para isto são sua construção simples e robusta e sua conversão de energia bastante eficiente. Além disso, nos últimos 30 anos, cresceu a operação de velocidade variável de máquinas de indução usando inversores eletrônicos de potência (MELKEBEEK, 2018).

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO OU ASSÍNCRONO COM ESTATOR DE ENROLAMENTO ALEATÓRIO

No motor de indução ou assíncrono a corrente alternada é fornecida ao enrolamento do estator diretamente. Os enrolamentos que constituem o estator são espaçados à mesma distância, uns dos outros, cada um cria um campo magnético e todos criam um campo girante que induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo magnético) e, conseqüentemente, um campo girante de polaridade oposta. Assim, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo e desenvolve-se então um conjugado motor que faz com que ele gire, acionando a carga.

Como citado, uma corrente é introduzida no estator, criando um campo magnético girante que força o rotor a se mover, sendo construído com três componentes principais: os condutores de cobre (raramente é usado o alumínio), o núcleo do estator e o isolamento. O cobre é um condutor para a corrente do enrolamento do estator, cada bobina consiste em um número de voltas de condutores de cobre formados em um *loop*. Os condutores de cobre devem ter uma seção transversal grande o suficiente para transportar toda a corrente necessária

sem superaquecimento. O núcleo do estator consiste em folhas finas de aço magnético (conhecidas como estampas). Ao contrário dos condutores de cobre e do aço magnético, que são componentes ativos para fazer um motor funcionar, o isolamento elétrico é passivo; isto é, não ajuda produzir um campo magnético ou guiar seu caminho (STONE *et al.*, 2014, p. 10).

Os estatores com enrolamento aleatório consistem em condutores de cobre com isolamento pré-aplicado associados chamados de fios esmaltados que são enrolados continuamente (à mão ou por uma máquina) através de fendas no núcleo do estator para formar uma bobina. As voltas nas bobinas podem ser facilmente vistas na FIGURA 1. O isolamento do fio deve ser capaz de suportar a diferença de tensão entre o início e o final de cada bobina, pois cada volta do fio esmaltado poderia, em princípio, ser colocado aleatoriamente contra qualquer outra na bobina, daí o termo "aleatório".

FIGURA 1 – ESTATOR BOBINADO



FONTE: A autora (2021).

Do ponto de vista elétrico, existem algumas razões para isolar os fios uns dos outros. A principal delas é a conhecida Teoria Eletromagnética que explica que se um condutor de cobre possuir uma área de seção transversal grande o suficiente, a corrente CA tenderá a fluir na superfície do condutor, conhecida como efeito

pelicular. Segundo Stone *et al.* (2014), ao isolar os fios uns dos outros, todas as seções transversais de cobre são usadas para o fluxo de corrente, ou seja, o efeito pelicular é impedido e as perdas são reduzidas.

Os tipos de fios esmaltados foram definidos nas normas ANSI/NEMA MW 1000 (2015) e IEC 60317 (2013), sendo cada um deles caracterizado por dimensão, aderência, flexibilidade, alongamento, classe térmica, tensão elétrica de ruptura da camada de esmalte, fator de dissipação, entre outros. A escolha de um determinado tipo de fio depende dos métodos de processo de fabricação, da compatibilidade química entre os materiais que serão utilizados, a temperatura e tensão elétrica que o fio será submetido, entre outras necessidades de projeto do motor elétrico. Estas características selecionadas influenciam na boa qualidade do equipamento, afetando seu custo, peso, desempenho e vida útil.

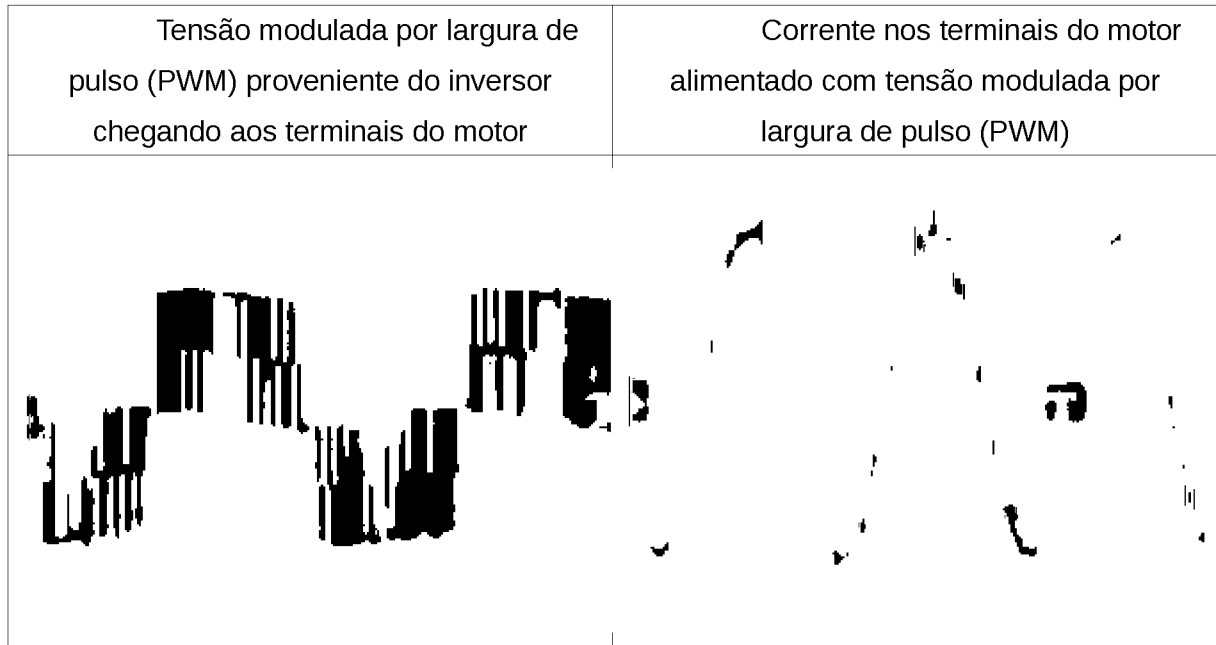
2.2 ACIONAMENTO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A utilização de inversores estáticos de frequência (inversores) compreende o método mais eficiente e atrativo em termos de custo para controlar a rotação dos motores elétricos. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e, conseqüentemente, a velocidade mecânica de rotação da máquina.

O sistema (motor + inversor de frequência) é visto pela fonte de alimentação como uma carga não linear, cuja corrente possui harmônicas (componentes de frequências múltiplas da frequência da rede). O motor de indução submetido a uma tensão modulada por largura de pulso (PWM), proveniente de um inversor de frequência, estará sujeito a tensões harmônicas (componentes de frequência acima da frequência fundamental). Dependendo da modulação PWM empregada, da frequência de chaveamento e de outras particularidades do controle, o motor poderá apresentar aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração e ruído e perda de rendimento. Na FIGURA 2, percebe-se a representação de que o motor “enxerga” uma tensão pulsada e uma corrente praticamente senoidal,

portanto, as harmônicas de maior amplitude no motor são de tensão (WEG, 2016, p. 10).

FIGURA 2 – FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE NOS TERMINAIS DO MOTOR SOB ALIMENTAÇÃO PWM



FONTE: Adaptado de WEG SA (2016, p. 10)

A grande demanda de energia elétrica para a alimentação de motores; a necessidade crescente de obtenção de equipamentos ambientalmente amigáveis, neste caso com a redução do consumo de energia elétrica; a acentuada evolução da eletrônica de potência, com o consequente decréscimo dos custos dos equipamentos com tal tecnologia, aliada às sensíveis melhorias no controle e desempenho operacional têm fomentado a utilização dos inversores de frequência para o acionamento de motores elétricos. No entanto, os inversores de frequência modernos utilizam transistores (atualmente IGBTs) de potência cujos chaveamentos (kHz) são muito elevados. Para atingirem tais chaveamentos, os transistores possuem tempos de início de condução muito rápidos, o que resulta em pulsos de tensão com elevado dV/dt (taxa de variação da tensão no tempo) que, em combinação com as impedâncias do cabo e do motor, geram sobretensões (*overshoots*) nos terminais do motor, que são repetitivos e ocorrem continuamente. Para Karavasilis (2008), a deterioração da isolação do motor devido aos *overshoots*

de tensão ocorre por meio das descargas parciais (DP), fenômeno complexo decorrente do efeito corona.

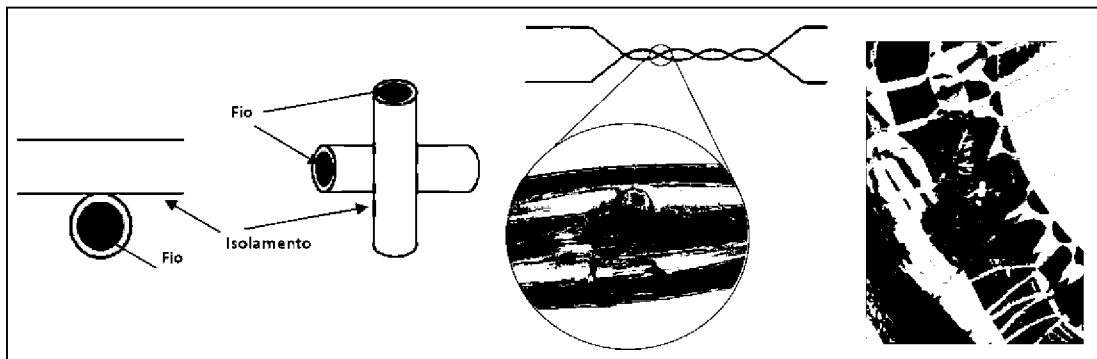
Enrolamentos que foram originalmente projetados e fabricados para operar com uma alimentação senoidal em 60 Hz, terão a vida do dielétrico significativamente reduzida quando forem alimentados por uma tensão PWM. Desde que a tecnologia dos IGBTs foi introduzida, há um aumento de registros de falhas na isolação de motores elétricos, normalmente causado por um curto entre espiras ou uma fuga para a massa. Uma inspeção rigorosa nestes tipos de falhas indica como sendo a mais comum, uma avaria no isolamento entre espiras adjacentes. Em alguns casos, era evidente que o efeito corona estava presente na forma de descargas parciais, o qual causou a falha no isolamento (BONNETT, 1997, p. 1335).

A ocorrência de DP num sistema isolante não significa a falha imediata da isolação do fio esmaltado. Longas exposições às descargas parciais causarão deterioração nos materiais isolantes, sendo que o tempo necessário para ocorrer uma falha catastrófica é uma função de cada material em particular.

2.3 DESCARGAS PARCIAIS E FATORES DE INTERESSE

Nas cavidades de ar existentes entre condutores energizados adjacentes existe uma diferença de potencial relativa, que resulta na formação de um campo elétrico. A diferença na permissividade elétrica do ar, relativa aos materiais sólidos, facilita a formação de altos gradientes de potencial sobre estes espaços de ar, os quais podem ultrapassar os valores limiares e conduzir ao aparecimento de descargas de baixa energia, conhecidas como descargas parciais. Isto promove a formação de ozônio e óxido nítrico, que criam caminhos condutivos (*tracking*) na superfície dos materiais isolantes. Segundo Kaufhold *et al.* (1996), tanto os cálculos como as medições experimentais demonstram que os valores limiares de tensão para início das descargas parciais ou *inception partial discharge voltage* (PDIV) tornam-se maiores quanto maiores forem as espessuras dos materiais isolantes sólidos. A FIGURA 3 ilustra a degradação ocasionada por descargas parciais na isolação do fio esmaltado.

FIGURA 3 – DEGRADAÇÃO OCASIONADA POR DESCARGAS PARCIAIS



FONTE: A autora (2021).

Basicamente, a ocorrência de picos elevados de tensão gera descargas parciais entre condutores que causam desgaste no esmalte isolante dos fios (isolação), semelhante a um processo de erosão. Esta degradação se agrava a cada descarga parcial ocorrida, até que a ausência do esmalte isolante permita a condução de corrente elétrica entre os fios. Ou seja, a isolação dos motores é gravemente afetada quando submetida a tensões superiores ao PDIV, este nível de tensão depende não só do tipo de fio, mas também da temperatura. Assim, os principais fatores relacionados com o aparecimento e as características das descargas parciais devem ser utilizados na estimativa do tempo de vida da isolação.

2.3.1 Tempo de subida

Devido ao elevado crescimento da taxa dos impulsos de tensão no tempo ou tempo de subida (dV/dt), do inglês *rise time*, do inversor ao motor, as primeiras espiras da primeira bobina de uma dada fase ficam submetidas a um alto valor de tensão. De acordo com Melfi (1998), quanto menor o tempo de subida e maior a indutância maiores serão os picos de tensão gerados, e estes picos de tensão podem dar início as descargas parciais, mesmo nos motores alimentados com baixa tensão, este efeito é agravado quando utilizam-se cabos de longo comprimento entre os inversores e o motor.

A taxa de crescimento frente de onda do pulso (tempo de subida), enviado pelo inversor de frequência, que penetra no enrolamento do motor, determina o valor da d.d.p. (diferença de potencial) que atua nas primeiras espiras. O circuito elétrico equivalente, por onde esta onda penetra, é constituído de indutâncias e

capacitâncias distribuídas, formadas por trechos respectivamente do enrolamento e sistema isolante do motor. Esta rapidez no crescimento da frente de onda se deve a alta frequência de chaveamento dos inversores. Com isto, em função do tempo de subida, o sistema de isolamento fica submetido a altos gradientes de potencial elétrico, exigindo dos isolantes características dielétricas superiores.

2.3.2 Frequência de chaveamento

Associada aos efeitos originados pelo rápido crescimento dos pulsos está a frequência com que estes pulsos são produzidos. Ao contrário dos impulsos provenientes de manobras de rede, os quais são eventuais, neste caso trata-se pulsos repetitivos que são mantidos numa frequência determinada. Esta frequência nos dias atuais, em função da rápida evolução da eletrônica de potência, atinge valores da ordem de 20 kHz. Quanto maior a frequência de pulsação do inversor mais rápida será a degradação do sistema isolante. A dependência do tempo de vida útil da isolação em função da frequência de pulsação, não é uma relação simples, conforme pode ser obtido de pesquisas experimentais (YIN, 1997, p. 21).

2.3.3 Temperatura e envelhecimento térmico

Em temperaturas acima da classe térmica da isolação, a resistência aos esforços entre espiras é grandemente reduzida e a rigidez dielétrica do ar diminui devido a redução de sua densidade de massa. Com isto, a tensão limiar para início de descargas parciais diminui cerca de 15 a 20%, comparada com seu valor à temperatura ambiente (KAUFHOLD *et al*, 2000). Portanto, temperaturas mais altas podem provocar um envelhecimento mais rápido do sistema de isolamento dos motores.

A origem de temperaturas elevadas, superior à sua classe térmica, está associada a condições operacionais, fatores ambientais, defeitos no sistema de proteção e problemas de qualidade na alimentação do motor. Algumas destas causas foram citadas em Stone *et al*. (2014, tradução nossa):

- sobrecargas mecânicas: elevação da temperatura devido ao aumento da carga no eixo do motor. Associado a esse fato, normalmente, a proteção térmica ou de sobrecarga está com o ajuste superior ao recomendado;
- defeitos em relés térmicos: perda da calibração permitindo que o motor opere com sobrecarga;
- deficiência ou perda do sistema de refrigeração do motor: quebra de ventoinhas, obstrução dos trocadores de calor, baixa vazão dos fluidos de resfriamento (água, ar), etc;
- ciclos de partidas excessivas: o motor opera em regime de trabalho diferente da sua especificação, sendo demandadas várias partidas em curtos intervalos de tempo, acarretando ciclos de aquecimento e resfriamento que ocasionam a degradação acelerada da isolação;
- desequilíbrio de tensões: aumentam a magnitude das correntes de sequência negativa no estator, contribuindo para a elevação de temperatura e torque pulsante na carga;
- distorção harmônica na tensão de alimentação: harmônicas de sequência negativa na tensão de alimentação também ocasionam a circulação de correntes de sequência negativa no enrolamento do estator.

Quando a isolação é submetido a temperaturas acima da sua classe térmica, ocorre uma reação de oxidação no material dielétrico, ocasionando degradações como o ressecamento, a formação de fissuras (rachaduras) e um processo de separação do material em camadas devido à perda da força de coesão da resina de impregnação (GUEDES, 2018, p. 80).

A degradação de um polímero (material usado na isolação) é um fenômeno muito complexo e a modelagem matemática baseado em dados cinéticos torna-se essencial para projetar qualquer tipo de dispositivo, no qual o ocorre envelhecimento térmico pois, a cinética está intrinsecamente relacionada com mecanismos de decomposição. O conhecimento destes mecanismos permite a postulação de equações cinéticas ou vice-versa, sendo o ponto de partida para conclusão sobre decomposição térmica. Pois, o envelhecimento térmico é um efeito da temperatura sobre processos químicos e físicos, ou seja, ocorrendo exposição em temperaturas acima do limite da classe térmica de cada material, pode-se verificar perda de integridade física, que fica caracterizada pela craquelação do material isolante. O

envelhecimento térmico do enrolamento confere vulnerabilidade ao sistema de isolamento referente outros fatores que podem causar curto-circuito entre espiras, como o estresse mecânico e ambiental.

2.4 SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* foi concebida pelo professor Lotfi A. Zadeh com o objetivo de fornecer procedimentos matemáticos para o tratamento de informações de caráter impreciso ou subjetivo. Zadeh (1965) formalizou a ideia de quantificar informações transmitidas linguisticamente por meio de conjuntos e suas respectivas funções de pertinência, sendo necessário definir uma relação de associativismo do elemento ao conjunto. Assim, seja X um espaço de pontos (objetos) e x um elemento genérico. Um conjunto *fuzzy* A contido em X é um conjunto caracterizado por uma função de associatividade μ_A , que associa a cada ponto x em X um número real $\mu_A(x)$ pertencente ao intervalo $[0,1]$. O valor de $\mu_A(x)$ é o grau de associatividade de x em A . Este grau de associatividade é tal que: $\mu_A=1$ se $\mu_A \in A$ e $\mu_A=0$ se $\mu_A \notin A$; e se $0 < \mu_A < 1$, diz-se que x não pertence totalmente ao conjunto. Quanto mais próximo de 1 for o valor de $\mu_A(x)$, maior será o grau de associativismo de x com A (ZADEH, 1965, p. 229).

Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência (ou associatividade) onde a transição de não-pertinência para pertinência é gradual, não abrupta dentro de um intervalo entre zero e um. A noção de união intersecção, complementar, relação, convexidade, etc, é estendida para tais conjuntos e várias propriedades no contexto dos conjuntos *fuzzy* estão estabelecidas. (Zadeh, 1965, p.338)

Zadeh (1965, p. 340-341) estabelece relações entre os conjuntos difusos correspondentes à Teoria Clássica de Conjuntos, por meio da função de associativismo (pertinência):

1. Um conjunto difuso (*fuzzy*) X é vazio, se e somente se sua função de pertinência é identicamente zero em X .

2. Dois conjuntos difusos A e B são iguais, escrevendo $A = B$, se e somente se $f_A(x) = f_B(x), \forall x \in X$.

3. O complementar de um conjunto *fuzzy* é denotado por A' , e definido por $f_{A'} = 1 - f_A$.

4. A é um subconjunto *fuzzy* de B , então: $A \subset B \Leftrightarrow f_A \leq f_B$.

5. A união de dois conjuntos difusos A e B com respeito as funções de pertinência $f_A(x)$ e $f_B(x)$ é definida por: $f_{A \cup B}(x) = \max[f_A(x), f_B(x)]$ se $x \in X$, ou de maneira abreviada: $f_{A \cup B}(x) = f_A(x) \vee f_B(x)$.

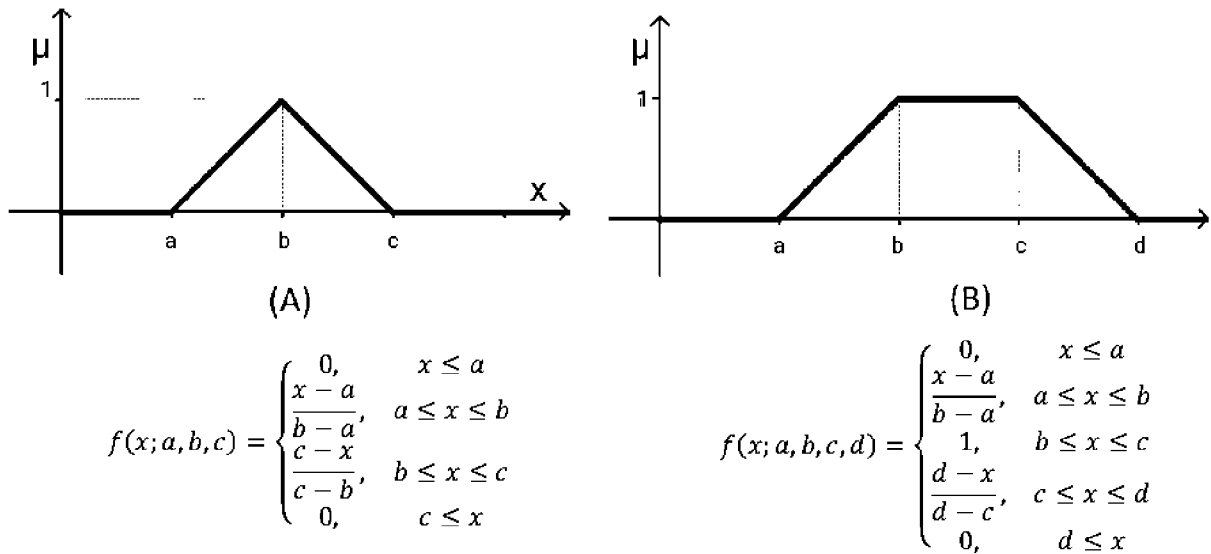
6. A intersecção entre dois conjuntos difusos A e B com respeito as funções de pertinência $f_A(x)$ e $f_B(x)$ é definida por: $f_{A \cap B}(x) = \min[f_A(x), f_B(x)]$ se $x \in X$, ou de maneira abreviada: $f_{A \cap B}(x) = f_A(x) \wedge f_B(x)$.

De acordo com a teoria dos conjuntos *fuzzy*, uma informação pode pertencer apenas parcialmente a um conjunto ou ainda pertencer a mais de um conjunto simultaneamente. A classificação é feita de acordo com uma ponderação entre os conjuntos a que esta informação pertence. A pertinência indica o quanto um elemento pertence a um determinado conjunto. Para medir esse grau são utilizadas as funções de pertinência. As definições do conjunto *fuzzy*, função de pertinência e suas relações são utilizadas no desenvolvimento dos conceitos da Lógica *Fuzzy* (ZADEH, 1973).

Os conjuntos *fuzzy* para as variáveis de entradas (*inputs*) e saídas (*output*), considerando a hipótese de trabalho, podem ser representados de várias maneiras, por funções de pertinência do tipo: triangular, trapezoidal, gaussiana, forma de sino e forma de Z, entre outras. Na FIGURA 4 são apresentadas apenas as funções triangular e trapezoidal.

A Lógica *Fuzzy* foi inicialmente construída a partir dos conceitos já estabelecidos de Lógica Clássica; operadores foram definidos à semelhança dos tradicionalmente utilizados e outros foram introduzidos ao longo do tempo, muitas vezes por necessidades de carácter eminentemente prático. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma se/então, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído.

FIGURA 4 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TRIANGULAR (A) E TRAPEZOIDAL (B)



FONTE: A autora (2021).

O objetivo é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e Lógica *Fuzzy* fornecem o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas. Neste sistema de inferência, uma variável linguística é uma variável cujos valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, selecionadas dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de mecanismos matemáticos convencionais (ZADEH, 1973).

Em 1974, o professor Ebrahim Mamdani conseguiu comprovar a utilização do sistema de inferência *fuzzy* no controle de uma máquina a vapor. A partir deste trabalho pioneiro, outras aplicações surgiram mostrando a eficiência desta metodologia e, como consequência, vários produtos de consumo acabaram por incorporar tais sistemas de controle.

O processo de implementação do sistema de inferência *fuzzy* é desenvolvido basicamente em três etapas (FIGURA 5):

- **Fuzzificação:** é o processo pelo qual as variáveis de entrada de um sistema são convertidas em termos linguísticos, descrevendo valores para os conjuntos *Fuzzy*. Para realizar as atribuições são necessárias realizações de experimentos, discussões técnicas, utilizações de normas e guias técnicos, entre outros. Nesta etapa também são selecionadas as funções de pertinência com aspectos geométricos específicos.

- **Inferência *Fuzzy*:** é um procedimento lógico de um sistema *fuzzy*, no qual é definido o conjunto de regras, que será mais explorado posteriormente. Basicamente a inferência é uma conjunção entre causa (informações de entrada do seu sistema) e efeito (respostas que se espera). Dois métodos particulares de inferência são mais utilizados: Método de Mamdani e Método de Takagi-Sugeno.

O método de Mamdani utiliza conjuntos *fuzzy* nos “consequentes” das regras *fuzzy*. Sendo que a saída da etapa de inferência é representada por um conjunto *fuzzy*, que é o resultado da agregação das saídas inferida por cada uma das regras, a qual na seguinte etapa gera uma saída numérica. A característica básica deste método é o fato que tanto os antecedentes como os consequentes são mapeados com conjuntos *fuzzy*.

No método de Takagi-Sugeno, o consequente de cada regra é representado em função das variáveis de entrada; e a saída final de todas as regras é determinada pela média ponderada das saídas geradas por cada um das regras. Neste caso, os coeficientes de ponderação são definidos pelos graus de ativação das respectivas regras. A fuzzificação das entradas com a aplicação dos operadores *fuzzy* (operação dos antecedentes) é feita de igual forma que no método Mamdani, com a diferença que a saída é uma função linear ou constante.

- **Defuzzificação:** nesta etapa ocorre a conversão da saída dos termos *fuzzy* obtidos como resultado das operações realizadas na etapa de inferência em valores numéricos. Os métodos de defuzzificação e a escolha deles não pode ser aleatória, pois afeta diretamente a saída obtida e, por conseguinte, os passos seguintes que são: defuzzificação por centro-de-área, centro-do-máximo e média-do-máximo. O processamento considera as variáveis linguísticas de saída e suas funções de pertinência gerando áreas como resposta que devem ser traduzidos para valores reais novamente.

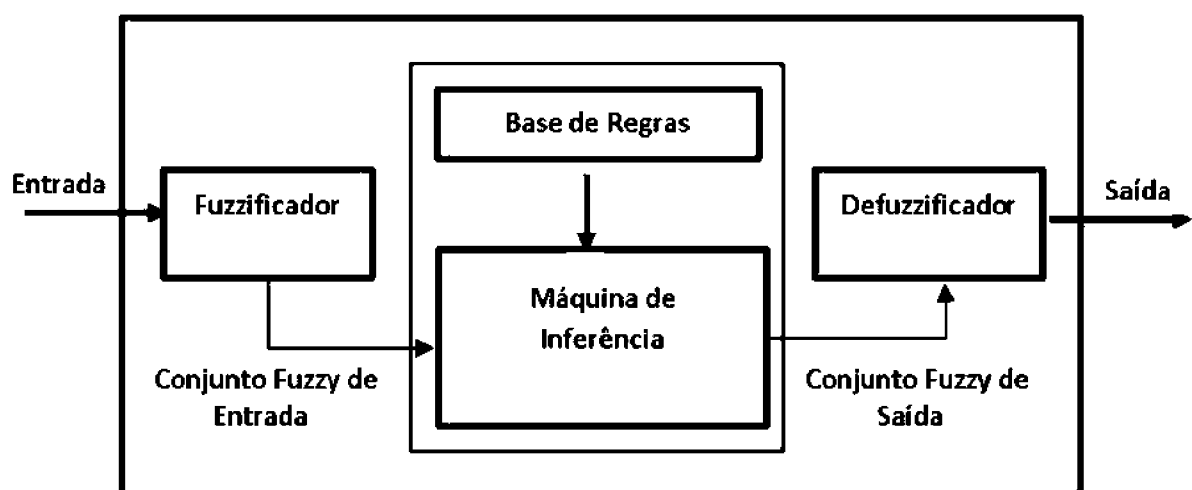
A construção da base de regras pressupõe um conhecimento do contexto que se pretende modelar. As variáveis linguísticas são naturalmente representadas por conjuntos *fuzzy* e conectivos lógicos e modificadores destes conjuntos. Ao usar as propriedades básicas e as operações definidas para conjuntos *fuzzy*, as restrições de modo geral são modeladas por conjuntos e relações *fuzzy*. Estas instruções de restrição geralmente são integradas por conectivos linguísticos, como “ou”, “e” ou “então”. Em modelos que envolvem lógica *fuzzy*, buscar técnicas que se aproximam do raciocínio de especialistas é a fase de construção da base de regras que interfere diretamente no resultado. De modo geral, as regras podem ser construídas da seguinte maneira:

Se x_1 é A e x_2 é B e x_3 é C e $\dots$ e x_n é Z então y é W

onde A, B, C,..., Z indicam conjuntos *fuzzy* para as variáveis de entrada e W conjunto *fuzzy* para variável de saída. Logo, o conjunto de regras do tipo se-então forma um sistema *fuzzy* que mapeia entradas e saídas, no qual as regras podem ser entendidas como dispositivos que definem regiões do espaço “entrada x saída”.

De acordo com Gomide, Gudwin e Tanscheit (1995), em um sistema *fuzzy* cada regra é representada por uma relação *fuzzy*. O comportamento do sistema é caracterizado pelo conjunto de relações *fuzzy* associada as regras. Para combinação de todas as relações oriundas de cada regra faz se necessário um operador de agregação que é interpretado como um operador de união ou média.

FIGURA 5 – ESQUEMA DO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY



FONTE: A autora (2021).

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão expostos os resultados de um levantamento realizado para identificar os artigos científicos que discutem os fatores que influenciam a degradação do sistema de isolamento de motores elétricos alimentados por inversores de frequência. Também foi construído um portfólio bibliográfico com artigos científicos que apresentassem resultados e informações relevantes sobre os principais fatores e metodologias utilizados na estimativa da vida útil do isolamento de motores elétricos. Buscou-se a evolução histórica das informações coletadas, os grupos de autores que mais pesquisaram sobre o tema e a relevância do conhecimento apresentado nos trabalhos, para motores elétricos de baixa tensão com estator de enrolamento aleatório.

3.1 METODOLOGIA

A metodologia adotada na triagem, processo de seleção dos artigos e construção do portfólio bibliográfico segue descrita nas próximas seções terciárias.

3.1.1 Termos de busca e bases de dados

Definido o tema que determina a pesquisa, se faz necessário estipular quais são os termos de busca utilizados nos mecanismos das bases de dados dos repositórios selecionados para se obter os artigos científicos relacionados ao tema desejado. Esta tarefa estabelece quais artigos serão selecionados para entrada no processo e quais serão excluídos deste processo.

Os termos de busca e operadores utilizados foram: *electric AND motor* AND insulation AND (inverter OR converter)*, contidos nos metadados que incluem o resumo, termos de indexação e dados de citação bibliográfica (como título do documento, título da publicação, autor, etc.). O símbolo (*) permitiu considerar a palavra motor tanto no singular quanto no plural. E foram utilizadas as palavras *inverter* ou *converter* porque ambas são utilizadas para representar o inversor ou inversor de frequência. Como filtro, foram selecionados apenas artigos publicados em conferências, periódicos e revistas.

Foram escolhidas bases de dados dos três repositórios a seguir: Scopus (Elsevier), IEEE Xplore e Web of Science – WoS (Clarivate) acessadas na data de 20 de outubro de 2020. A definição destas bases de dados foi considerada devido a melhor consistência e representatividade em relação ao tema de pesquisa. Com isso, foram obtidos 1915 artigos mais seis artigos recomendados por especialistas conforme FIGURA 6.

3.1.2 Exclusão dos duplicados

Como a pesquisa por artigos foi realizada em diversas bases, é comum que o conjunto de artigos reunido pelo pesquisador contenha artigos repetidos. Inicialmente, foi realizada a exclusão dos artigos em cada base de dados separadamente, através da leitura dos títulos dos artigos. Com esta filtragem foi possível observar que um erro de digitação, durante a indexação, poderia duplicar o artigo assim, foi realizada uma verificação minuciosa. Além disso, o mesmo artigo pode ser tanto apresentado em uma conferência quanto publicado em um periódico ou revista, o que duplica sua ocorrência, esta comparação foi realizada para excluir estes artigos.

Outra etapa de exclusão foi realizar um cruzamento entre as bases, identificando quais artigos apareceram em somente uma das três bases de dados, em cada duas delas e os que pertenciam as três bases de dados simultaneamente. Com isso, restaram 1069 artigos conforme FIGURA 6.

3.1.3 Relevância temática

Nesta etapa foi realizada a leitura dos títulos e resumos, possibilitando avaliar se cada artigo está realmente alinhado ao tema de pesquisa para indicar sua permanência ou exclusão do portfólio bibliográfico prévio, definindo sua relevância temática.

Basicamente, uma pergunta foi respondida: o artigo indica no título ou resumo que serão discutidos os fatores que influenciam no tempo de vida e as causas da degradação no isolamento dos motores elétricos, alimentados por inversores de frequência? Se a resposta for *sim*, permanece no portfólio bibliográfico

prévio. Se for *não*, é excluído. Esta etapa se justifica pelo fato de que frequentemente a busca das palavras-chave, feita nos títulos e resumos, possibilita que sejam incorporados trabalhos que, apesar de apresentarem a presença das palavras-chave procuradas, não tratem especificamente do tema de pesquisa.

Outro aspecto considerado na seleção foi que os autores deveriam abordar nos seus artigos os sistemas de isolamento do estator de motores elétricos de baixa tensão, devido à diferença que existe na configuração do isolamento entre estes motores e os de alta-tensão.

Também foi feita, nesta etapa, uma subdivisão em categorias dos artigos excluídos, que são apresentadas no QUADRO 1, com os critérios adotados. Com isso, foram excluídos 588 artigos, resultando em 481 artigos no portfólio bibliográfico, conforme FIGURA 6.

QUADRO 1 - CATEGORIAS DOS ARTIGOS EXCLUÍDOS E CRITÉRIO ADOTADO

Categoria	Critérios para exclusão
Aeronaves	Projetos de isolamento para ambientes controlados e demais especificidades de aplicações em aeronaves.
Conversores/ Inversores	Sugestões de melhorias na utilização e projeto dos inversores (ou conversores). Estudos sobre as características e diferentes tipos de inversores (ou conversores).
Ensaio/ Testes/ Sensores	Metodologias de ensaios e testes para avaliação de diversas condições do motor e da influência do inversor (ou conversores). Desenvolvimento de sensores para detecção de falhas no motor.
Filtro/ Amortecedor	Desenvolvimento e avaliação de filtros e amortecedores para o conjunto inversor (conversor) - motor.
Perdas	Estudos do desempenho do motor em relação aos diversos tipos de perdas ocasionadas pelo uso do inversor (conversor).
Tipos de isolamento	Avaliação das diferentes configurações de isolamento e seu desempenho, que não apresentaram resultados alinhados com o tema de pesquisa.
Outros	Demais artigos que não encaixaram nas categorias anteriores e não estão alinhados com o tema de pesquisa, tais como: configurações de uso do cabo de alimentação, estudos com motores de ímã permanente, de alta-tensão ou para aplicações em ambientes controlados, efeito do uso do inversor (conversor) nos rolamentos, aspectos de falhas do mancal, utilização de fios retangulares, aplicações com bombas subaquáticas, avaliação de cargas superficiais e demais conteúdos.

FONTE: A autora (2020).

Para o grupo de artigos em que a relevância temática ainda não pôde ser confirmada, os mesmos não foram descartados pois, uma análise mais completa

dos artigos deve ser realizada. Caso o artigo não esteja disponível integralmente deve ser descartado.

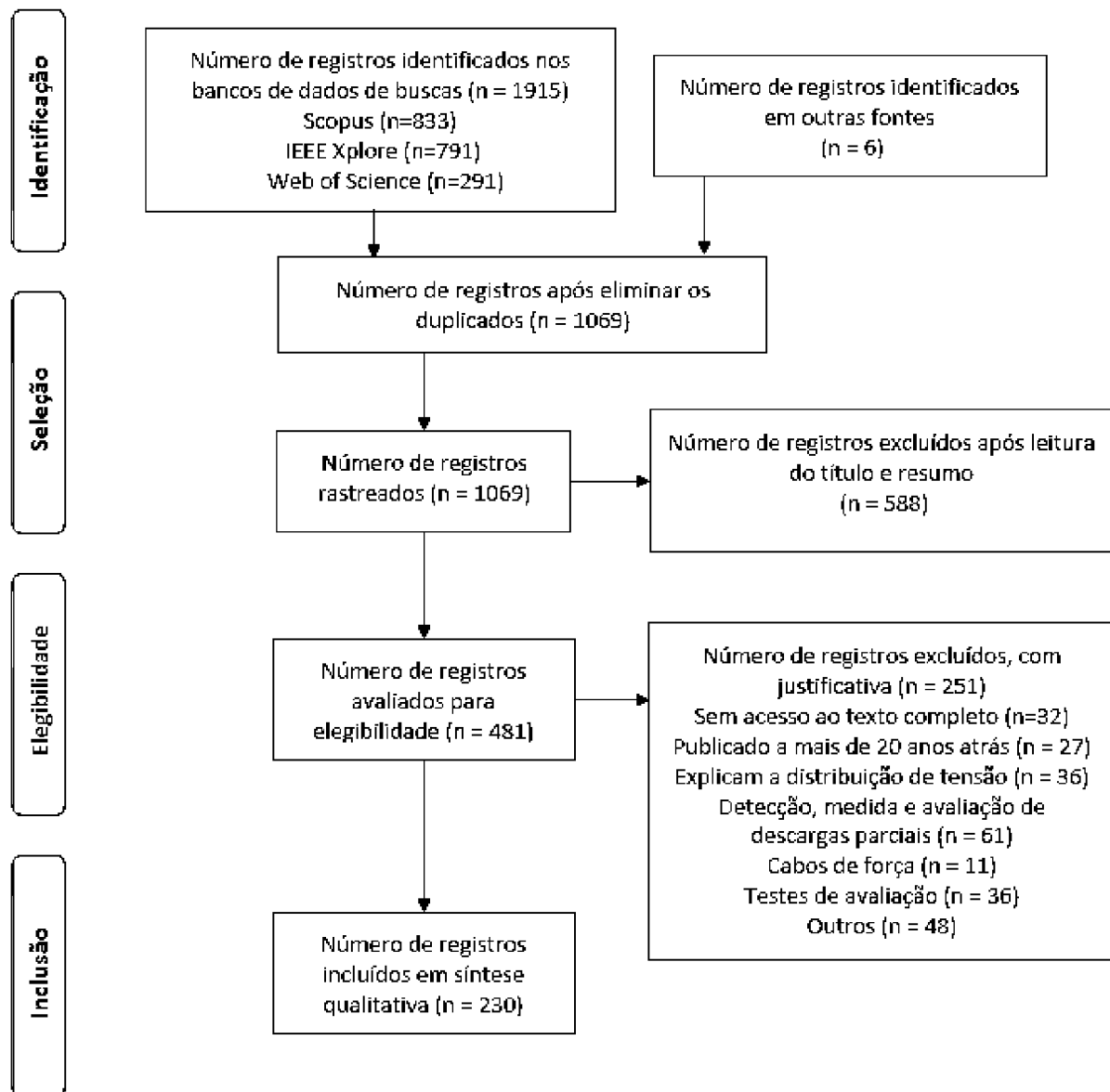
Para realização de uma análise mais completa, os artigos selecionados foram avaliados através da leitura das conclusões para determinar a relevância dos conhecimentos apresentados nos trabalhos, consideração da evolução histórica das informações coletadas e pertencer ao banco de autores que mais estudaram o tema pesquisado. Um artigo deve ser selecionado se apresentar resultados e informações relevantes sobre os fatores que podem ser utilizados na estimativa do tempo de vida do isolamento dos motores elétricos, alimentados por inversores de frequência. Aqueles artigos considerados alinhados permanecem na relação e passam a compor o portfólio bibliográfico do pesquisador sobre o tema de pesquisa. Com isso, o portfólio bibliográfico totalizou 230 artigos conforme FIGURA 6.

3.2 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO

Uma apresentação completa dos resultados obtidos após a aplicação da metodologia descrita pode ser acompanhada em Höpner e Wilhelm (2021), sendo que o diagrama da FIGURA 6 resume o desfecho da seleção dos artigos para compor o portfólio bibliográfico.

A definição dos 230 artigos que constituem o portfólio bibliográfico não representou uma tarefa simples, envolvendo uma análise crítica do pesquisador sobre os artigos reunidos. Dos 251 artigos excluídos na etapa de elegibilidade (FIGURA 6), 32 foram excluídos por não estarem acessíveis no formato de texto completo. Em relação aos demais 219 arquivos descartados por não apresentarem contribuição significativa para a construção do portfólio bibliográfico, os mesmos discutiam sobre os fatores que influenciam o tempo de vida do isolamento dos motores elétricos porém, nas suas conclusões (e em alguns casos foi necessário uma leitura mais completa do corpo do artigo) não apresentavam resultados sobre os fatores que podem ser utilizados na estimativa do tempo de vida do isolamento dos motores elétricos, alimentados por inversores de frequência. Em Höpner e Wilhelm (2021) seguem descritos detalhadamente os motivos para estas exclusões.

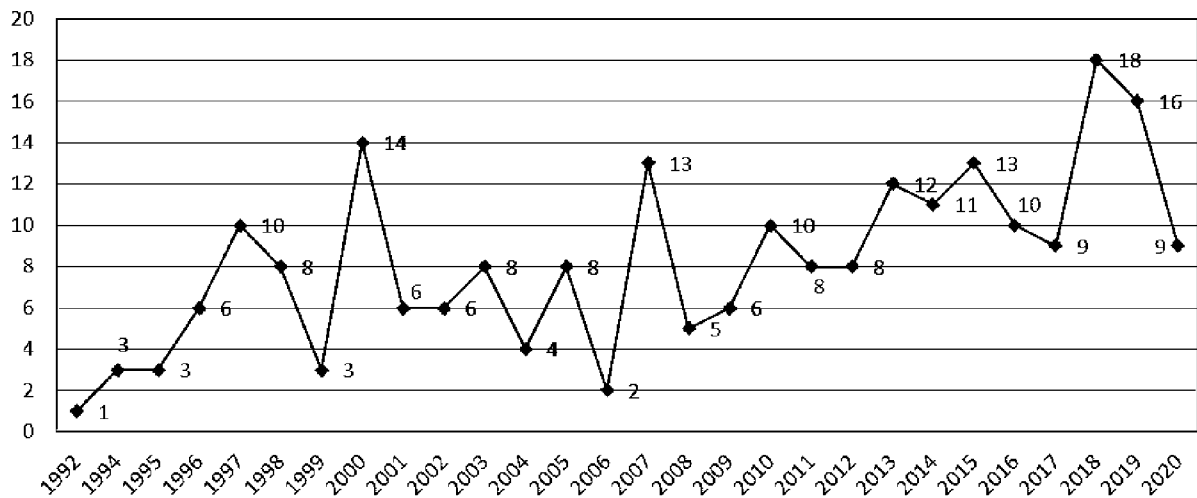
FIGURA 6 – SELEÇÃO DOS ARTIGOS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO



FONTE: A autora (2020).

Os artigos do portfólio bibliográfico foram publicados entre os anos de 1992 e 2020 (até outubro). A distribuição do número de artigos em cada ano é mostrada no GRÁFICO 1. Se dividirmos este período na metade, tem-se 36% até o ano de 2006 e 64% a partir deste ano. E ainda, 27% dos artigos foram publicados nos últimos 5 anos, confirmando o crescimento das pesquisas sobre o tema estudado.

GRÁFICO 1 - NÚMERO DE ARTIGOS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO EM RELAÇÃO AO ANO DE PUBLICAÇÃO



FONTE: A autora (2020).

A maioria dos artigos do portfólio bibliográfico foi apresentada e publicada em anais de conferências ou simpósios, destacando-se a IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) com 20% do total de 152 artigos. Outros 78 artigos foram publicados em periódicos ou revistas, destacando-se IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Electrical Insulation Magazine e IEEE Transactions on Industry Applications somando 63% dos registros.

Os autores que mais possuem registros no portfólio bibliográfico são Wang, P., Cavallini, A. e Montanari, G. C. todos com mais de 20 artigos publicados, tem-se também os autores Guastavino, F. e Wu, G. com 18 artigos cada e o autor Stone, G. C. com 14 artigos publicados. Estes autores, normalmente, publicam em grupos de pesquisadores. Outros nomes de autores que publicaram os artigos do portfólio bibliográfico podem ser encontrados Höpner e Wilhelm (2021).

3.3 CONTRIBUIÇÕES DOS ARTIGOS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Os artigos do portfólio bibliográfico foram agrupados para facilitar o entendimento e discussão de suas contribuições na construção do conhecimento acerca do tema de pesquisa. Para que estes agrupamentos fossem realizados de maneira eficiente foi realizada a leitura completa da maioria dos artigos. Em Höpner

e Wilhelm (2021) descreve-se com mais detalhes sobre estes agrupamentos e cada artigo considerado.

Nesta subseção não foram apresentadas as contribuições de todos os trabalhos que compõe o portfólio bibliográficos, somente dos que se destacaram em relação ao estudo dos fatores considerados importantes para estimar a vida útil do isolamento, ou ainda, os fatores que podem gerar o envelhecimento do isolamento como consequência da atividade de descarga parcial. Principalmente os artigos que consideraram uma metodologia para estimativa do tempo de vida do isolamento do fio esmaltado utilizado nos motores de baixa tensão.

3.3.1 Sobre revisões e normas

Foram encontrados sete artigos que discutem os aspectos normativos que estabelecem os conceitos dos fenômenos que se fazem presentes, os requisitos mínimos a serem atendidos em projetos, testes e desempenho em operação de materiais isolantes utilizados em motores elétricos acionados por inversores de frequência. Destacando-se o trabalho de Culbert (2009) que descreve as especificações técnicas das normas IEC 60034-18-41 (2014) e IEC 60034-18-42 (2017), principalmente identificando a capacidade de vários projetos de sistemas de isolamento para resistir a esses processos adicionais de deterioração. E o trabalho de Montanari (2015) que enfoca as questões das descargas parciais descritas nas mesmas normas técnicas.

O autor Cavallini (2017) apresenta um breve resumo dos problemas de isolamento associados ao uso de acionamentos elétricos, indicando que altas frequências de chaveamento aumentam a probabilidade de sobretensões em até três vezes a tensão do barramento e conclui que seria aconselhável estabelecer uma colaboração internacional para investigar, de forma sistemática o impacto do envelhecimento multifatorial no PDIV para refinar o padrão IEC e melhorar a qualidade do isolamento.

Outros quatro artigos apresentam revisões sobre os seguintes temas: projetos de motores de tração (sistemas de isolamento primário e secundário); máquinas de alta velocidade (tipologias, padrões e operação sob fornecimento PWM); falha acumulativa do isolamento do enrolamento sujeito a tensões de impulso

repetitivas e os problemas de isolamento do estator em motores alimentados por fonte de tensão PWM.

3.3.2 Sobre descargas parciais

O conteúdo dos artigos revisados e resumidos nesta subseção demonstra que, o envelhecimento do isolamento de motores elétricos ocorre com a presença de descargas parciais (DP), sendo que sua atuação acelera o processo de degradação do meio isolante. Neste grupo de trabalhos foi construído um panorama com os principais aspectos (picos de tempo de subida curtos, altas magnitudes de tensão e tensão de impulso quadrático bipolar repetitivo, etc.) que influenciam o aparecimento de DP e estudam suas características, através de testes experimentais. Com base em testes de DP realizados em diferentes condições de tensão de impulso, mostram a influência dos parâmetros de forma de onda de impulso, ou seja, tempo de subida, frequência, ciclo de trabalho, nas características estatísticas de DP. Os resultados mais importantes são que, tempos de subida curtos disparam DP de grande magnitude, que são capazes de erodir o sistema de isolamento mais rápido do que as descargas parciais iniciadas usando formas de onda com tempos de subida mais longos. Em particular, os tempos de falha estimados por testes em tensões sinusoidais podem ser excessivamente otimistas na avaliação do comportamento de longo prazo do sistema de isolamento, sujeito a formas de onda de tensão de impulso (FENGER, CAMPBELL e PEDERSEN, 2003).

Nos artigos de Hayakawa e Okubo (2005), Takino *et al.* (2010), Stone e Culbert (2009), Kimura *et al.* (2007), Hayakawa, Morikawa e Okubo (2007), Hayakawa, Shimizu e Okubo (2012), He (2007) foram realizadas estimativas da tensão inicial de descarga parcial (PDIV), avaliadas as características de propagação da DP após seu início e seus mecanismos em termos de probabilidade de geração de elétrons iniciais, comportamento da carga espacial no entreferro, carregamento na superfície do esmalte, entre outros. E ainda foi apresentado que, com base na análise de perda dielétrica e mecânica dos pulsos de onda quadrada, o PDIV está aumentando com o aumento da amplitude da tensão no estágio inicial de envelhecimento. Em Montanari *et al.* (2019) são abordados os problemas associados a medição e detecção de descarga parcial que é uma ferramenta

fundamental para o projeto e diagnóstico de sistemas de isolamento porque, durante seu tempo de vida útil, eles deveriam operar sem apresentar degradação, mas sabe-se que isto não ocorre na prática. Neste sentido, também é importante calcular a tensão inicial de descarga parcial (PDIV) pois, a estimativa do tempo de vida isolamento dos motores também depende deste seu valor.

Os autores Wang *et al.* (2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e, 2017, 2018a, 2018b, 2019) pesquisaram sobre as estatísticas de DP e resistência de fios esmaltados visam avaliar o desempenho dos sistemas de isolamento dos motores de baixa tensão Tipo I. Foram discutidos os diversos aspectos de geração e impacto da DP, que devem ser avaliados quando se estuda a vida do isolamento de fios magnéticos. Resumidamente, os principais resultados foram:

i. a amplitude de DP, sob tensão de onda quadrada repetitiva, é sete vezes maior do que na tensão senoidal logo, é mais recomendada para reproduzir o estresse de tensão como a saída do inversor;

ii. a resistência obtida em tensões senoidais mostra-se três vezes maior do que em tensões de onda quadrada repetitiva com tempo de subida de 200 ns. Portanto, a tensão senoidal com o mesmo valor de pico e frequência que as tensões impulsivas repetitivas não pode ser usada para avaliar o desempenho da resistência de corona de sistemas de isolamento para motores alimentados por inversor;

iii. o efeito da temperatura na magnitude e nos tempos de atraso de DP é mais significativo em baixa frequência, ou seja, uma temperatura mais alta dará origem a eventos de DP com magnitude e tempo de atraso mais longo.

iv. ao realizar testes de PDIV e de resistência em sistemas de isolamento de máquinas rotativas alimentadas por eletrônica de potência de acordo com as normas IEC, não apenas o tempo de subida, mas também o tempo de queda das tensões impulsivas devem ser cuidadosamente considerados;

v. pequenos ciclos de trabalho de tensão quadrada (com ciclo de trabalho igual a 50%) podem induzir padrões DP assimétricos e estender a vida do isolamento devido a uma redução substancial da magnitude de DP no flanco descendente da tensão aplicada;

vi. a resistência da poliimida diminui com o aumento da frequência de comutação e tende a aumentar com a frequência fundamental no PWM com as mesmas frequências de comutação.

Destacando-se em Florkowski *et al.* (2019) e La Calle *et al.* (2020) que são atuais e fazem um estudo bem completo, com resultados experimentais e contribuições teóricas. Ambos devem ser usados como referência, quando se trata de compreender os fatores (tempos de subida muito curtos e presença de sobretensões que ocorrem repetidamente) que sobrecarregam significativamente o isolamento de cabos de alimentação e motores, lembrando que estes fatores influenciam o início e a dinâmica do DP e os processos de acumulação de carga espacial.

3.3.3 Sobre os fatores que causam envelhecimento do isolamento

As pesquisas apresentadas nos artigos deste grupo descrevem e estudam os fatores considerados importantes para estimar a vida útil do isolamento, ou ainda, que podem gerar o envelhecimento do isolamento como consequência da atividade de descarga parcial, da formação de carga espacial, entre outros mecanismos. Os principais resultados apresentados em alguns dos referidos artigos foram identificados nesta subseção.

A corrente estimulada termicamente (TSC) prova que o pulso de onda quadrada traz mais defeitos do que a CA aos materiais de isolamento. Na condição de pulso de onda quadrada, não apenas a ação de dano de descargas parciais é intensificada com o aumento da tensão, frequência e temperatura, mas também a ação de dano de aumento de cargas espaciais (GAO *et al.*, 2007). A geração de calor resistivo pode ser aumentada pelo tempo de subida dos pulsos, mas o incremento pode ser consideravelmente maior com um aumento na frequência fundamental. A geração de calor resistivo também é mais afetada pela frequência de chaveamento (ESPINO-CORTES; ZAMORANO; ROSARIO, 2007).

A degradação da estrutura em poliimida se propaga da superfície para o interior com envelhecimento contínuo, criando três camadas em seção. No espectro TSC, dois picos principais bem resolvidos existem na faixa de 20 e 200 °C e a degradação é acelerada com o aumento da frequência (WU *et al.*, 2010).

O mecanismo, a intensidade e a dinâmica da degradação do isolamento dos polímeros na tensão tipo PWM são a consequência dos fatores: forma de onda de tensão de pulso, principalmente com curto tempo de subida, sobretensões e a alta

frequência de repetição dos pulsos. E o campo elétrico local está causando mudanças estruturais no isolamento dos polímeros durante a exposição de DP (FLORKOWSKA *et al.*, 2010).

Os fatores que afetaram a DP na tensão de impulso são: tensão, frequência e tempo de aumento / queda de pulso. O tempo de subida da tensão tem impacto especial nas condições de iniciação e na tensão de início de descargas parciais. O diâmetro dos fios magnéticos e suas localizações no enrolamento determinam a distribuição do campo elétrico e influenciam na vida útil do isolamento (FLORKOWSKA *et al.*, 2011).

Entre os anos de 2001 até 2015 um grupo de pesquisa publicou diversos artigos que compuseram um estudo amplo sobre o desempenho do isolamento de motores elétricos que fazem parte de acionamentos modernos (equipados com inversores / inversores rápidos). Em particular, os efeitos de degradação de descargas parciais foram estudados experimentalmente, avaliando os efeitos das formas de onda de voltagem diferentes (voltagem pico a pico para níveis maiores do que a voltagem inicial de DP e frequência fundamental igual a 300 Hz), das tensões quase quadradas e do tempo de subida da tensão. Todos os testes, realizados em presença de atividade de descargas parciais, foram realizados com os corpos de prova dentro de uma estufa, de forma a aplicar o efeito sinérgico do estresse térmico à degradação do esmalte. A condição de ruptura do esmalte isolante foi selecionada como critério de ponto final. Alguns tipos de esmalte foram considerados (convencional de referência não resistente a corona e esmaltes nano-preenchidos). Os principais resultados confirmam a dependência das características do esmalte nano-preenchido para evitar sua degradação acelerada.

Em Florkowska *et al.* (2016), foram apresentados os resultados da investigação do isolamento de fios magnéticos com diferentes diâmetros em um modelo de amostra padronizado para avaliar sua resistência à exposição em tensões de pulso.

Para finalizar, os artigos de Cavallini *et al* (2011), Melfi (2006) e Stone *et al.* (2007) representam perfeitamente o grupo de trabalhos desta subseção pois, descrevem os fatores que degradam o isolamento, o papel das descargas parciais, as causas e efeitos básicos do ambiente de alto crescimento do pulso de tensão, entre outros aspectos. Além disso, fazem uma breve revisão dos padrões NEMA e

IEC que tentaram resolver parcialmente os problemas. Testes de sistemas de isolamento de motores para verificar a conformidade com os requisitos propostos também são explicados.

3.3.4 Sobre modelos

Os artigos deste grupo visam avaliar o processo de envelhecimento e propor modelos que permitam estimar o tempo de vida dos materiais que compõe o isolamento dos motores elétricos. Foram realizados testes de envelhecimento acelerado e os dados experimentais são utilizados tanto para elaboração dos modelos quanto para comparação com os resultados dos mesmos. No QUADRO 2 são apresentadas as ferramentas estatísticas (ou matemáticas), os fatores avaliados e os materiais utilizados nos testes.

QUADRO 2 - MÉTODOS, FATORES DE ESTRESSE E TIPO DE AMOSTRAS
ABORDADOS NOS MODELOS DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Autores (Ano)	Métodos	Fatores de estresse abordados	Tipo de amostra
Divljakovic <i>et al.</i> (1994)	Potência inversa e <i>Design of Experiment</i> (DoE)	Tensão, temperatura (separadas) Tensão, temperatura e frequência (juntas)	Fio esmaltado
Grzybowski <i>et al.</i> (2004)	Weibull	Tensão, temperatura e frequência (juntas)	Fio esmaltado
Bocek <i>et al.</i> (2005)	Potência inversa	Tensão	Fita de isolamento e material de impregnação
Qiang <i>et al.</i> (2008)	Weibull	Tensão e frequência (juntas)	Filme de poli-imida
Gao <i>et al.</i> (2009)	Arrhenius	Temperatura	Fio esmaltado
Koltunowicz <i>et al.</i> (2010)	Potência inversa	Frequência	Papel de isolamento
Lahoud <i>et al.</i> (2013)	Potência inversa e <i>Design of Experiment</i> (DoE)	Tensão, temperatura e frequência (separadas) Tensão, temperatura e frequência (juntas)	Placa de aço revestida
Lahoud <i>et al.</i> (2015)	Potência inversa e <i>Design of Experiment</i> (DoE)	Tensão, temperatura e frequência (separadas) Tensão e temperatura Tensão e frequência Temperatura e frequência Tensão, temperatura e frequência (juntas)	Placa de aço revestida
Kaijiang <i>et al.</i> (2009)	Weibull	Amplitude de impulso e temperatura Frequência de impulso e temperatura Frequência e amplitude de impulso	Filme de poli-imida

Autores (Ano)	Métodos	Fatores de estresse abordados	Tipo de amostra
Cui <i>et al.</i> (2011)	Weibull	Tensão, temperatura e frequência (separadas) Tensão e temperatura Tensão e frequência Temperatura e frequência	Filme de poli-imida
Arora <i>et al.</i> (2015)	Lógica <i>fuzzy</i>	Fator de estresse de tensão, fator de frequência de pico e fator de estresse da forma de onda	Filme de poli-imida
Arora <i>et al.</i> (2019)	Lógica <i>fuzzy</i> e <i>Design of Experiment</i> (DoE)	Fator de estresse de tensão, fator de frequência de pico e fator de estresse da forma de onda	Filme de poli-imida
Szczepanski <i>et al.</i> (2017)	<i>Weibull, Design of Experiment</i> (DoE)	Tensão e frequência	Fio esmaltado
Szczepanski <i>et al.</i> (2018)	<i>Weibull, Design of Experiment</i> (DoE)	Tensão e frequência (3 tipos de fios)	Fio esmaltado
Szczepanski <i>et al.</i> (2020)	<i>Weibull, Design of Experiment</i> (DoE)	Tensão, temperatura e frequência (3 tipos de fios)	Fio esmaltado
Cavallini <i>et al.</i> (2010)	Potência inversa	Tensão e frequência	Fio esmaltado

FONTE: A autora (2020).

O artigo dos autores Maussion *et al.* (2015) é um destaque deste grupo pois, aborda uma revisão para o problema da modelagem de tempo de vida para sistemas de isolamento de máquinas elétricas, sendo que três diferentes materiais de isolamento foram testados (filmes kapton, filmes de poliesterimida e pares trançados esmaltados). Foi mostrado que vários métodos de regressão são capazes de fornecer modelos multirestrição satisfatórios. Design of experiments and Response Surface são os mais precisos com um custo experimental limitado, enquanto a regressão multilinear é mais flexível.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesta seção foram apresentados os principais resultados da revisão da literatura publicada em Höpner e Wilhelm (2021) que buscou construir uma visão geral sobre as causas da degradação do isolamento dos motores elétricos, alimentados por inversores de frequência. Os inúmeros resultados que surgem nas bases de dados precisaram ser filtrados de maneira objetiva e foi necessário avaliar pontualmente cada artigo pois, em vários casos, seu título ou resumo apresentavam uma ideia ampla e no texto eram discutidos resultados muito específicos.

Acredita-se que qualquer estudo sobre a degradação e tempo de vida do isolamento deve considerar os aspectos normativos que estabelecem os conceitos

dos fenômenos que se fazem presentes, os requisitos mínimos a serem atendidos em projetos, testes e desempenho em operação de materiais isolantes, isto foi reunido nos trabalhos descritos em 3.3.1. Também em 3.3.1 foi resumido o conteúdo dos artigos de revisão que abordaram o tema da pesquisa.

O estresse elétrico e a diferença na permissividade elétrica do ar, facilitam a formação de altos gradientes de potencial, os quais podem ultrapassar a PDIV e conduzir às descargas parciais. Os diversos aspectos relacionados com o aparecimento e as características das descargas parciais foram reunidos nos trabalhos apresentados em 3.3.2 e devem ser estudados para compreender os aspectos da estimativa do tempo de vida do isolamento.

Os autores dos artigos apresentados em 3.3.3 discutiram os principais fatores que devem ser considerados para estimar o tempo de vida do isolamento dos motores elétricos que, de forma geral, são os mesmo já pesquisados nos últimos vinte anos. Porém, houve evolução nas publicações e atualizações de especificações técnicas (normas), principalmente identificando a capacidade de vários projetos de sistemas de isolamento para resistir aos processos adicionais de deterioração e auxiliando na melhoria dos projetos os motores elétricos. E ainda, a partir dos resultados experimentais apresentados nos trabalhos, ficou evidente que as características e espessuras dos materiais isolantes e da resistência de cada material em particular, podem melhorar a resistência à erosão e o revestimento com preenchimento de nanocompósitos (como camada secundária ou não) foram avaliados e testados em diversos artigos, como sugestão para evitar a degradação do isolamento de motores elétricos acionados por inversores de frequência.

A estimativa do tempo de vida efetiva do isolamento, em função da multiplicidade de fatores, é uma tarefa altamente complexa, onde interagem os efeitos das variações nos processos construtivos, das reações físico-químicas dos materiais isolantes envolvidos, da temperatura e do estresse elétrico. Nos artigos da subseção 3.3.4, são apresentados os diversos modelos desenvolvidos, que relacionam os diversos fatores estressantes. Os mesmos permitiram avaliar as tendências esperadas para cada caso, além de testes experimentais que forneceram dados úteis na previsão do tempo de vida do isolamento dos motores elétricos.

Como foi possível observar nas conclusões dos trabalhos avaliados, a degradação do sistema de isolamento (incluindo a isolação do fio) ocorre pelo efeito

de diversos fatores porém, o principal fator de estresse considerado nos estudos foi a exposição aos altos picos de tensão, provocados pela rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor (tempo de subida), bem como pela frequência com que estes picos são produzidos.

4 MATERIAIS E MÉTODO

A crescente demanda de motores elétricos acionados por inversores de frequência, gera a necessidade de avaliação da suportabilidade do isolamento dos fios utilizados em estatores com bobinas enroladas aleatoriamente que experimenta estresses maiores relacionados a variação da tensão, da frequência de chaveamento e da temperatura. A determinação do tempo de vida deste isolamento é uma atividade complexa e não foi encontrado na literatura um modelo matemático bem definido para realização desta tarefa.

Com o intuito de apresentar uma metodologia para estimar o tempo de vida do fio esmaltado utilizado na construção de bobinas enroladas aleatoriamente foi desenvolvido um modelo baseado em sistemas *fuzzy*. O fio recebe duas camadas de vernizes a base de poliéster-imida e poliamida-imida e são utilizados em aplicações com diversas bitolas, classes térmicas e diversos tipos de motores elétricos.

4.1 MATERIAIS

Nesta subseção apresentam-se os dois softwares utilizados para o desenvolvimento do sistema de inferência *fuzzy* e para o tratamento dos dados resultantes do ensaio de degradação. Também identificam-se as normas técnicas citadas que foram consultadas na elaboração do trabalho e descreve-se o ensaio de degradação que foi concebido.

4.1.1 Softwares

Devido as suas funcionalidades o *software* MATLAB®, da empresa americana MathWorks, foi selecionado como plataforma para conduzir as simulações necessárias para implementação do modelo proposto. O mesmo oferece a *toolbox fuzzy* que é uma interface específica que permite ao usuário ter acesso à edição da estrutura e dos parâmetros, permitindo o desenvolvimento e configuração do sistema de inferência. Estão disponíveis diversos métodos de inferência, bem como grande facilidade no manuseio das regras e representações gráficas das

entradas e saída, além de possuir uma flexibilidade de alteração dos diversos aspectos do modelo para alcançar os resultados desejados.

Resumindo as funcionalidades do toolbox fuzzy, tem-se três janelas utilizadas para parametrização do sistema:

- a principal (*FIS Editor*) **exibe-se a** estrutura do sistema fuzzy (suas entradas e saídas) e permite configurar todos os métodos de cálculo lógico, implicação, agregação e defuzzificação.
- na janela denominada “*membership function editor*” definem-se as funções de pertinências para as variáveis de entrada e saída. São diversas opções: triangulares, trapezoidais, gaussiana, entre outras, que devem ser parametrizadas pelo usuário preenchendo todo o domínio possível das variáveis.
- já a janela “*rule editor*” é utilizada para definir as regras, permite selecionar e relacionar as pertinências das entradas e saídas (ou sua negação), fazer conexões com conectivos lógicos (E/OU) e definir pesos para cada regra.

Tem-se a janela “*surface viewer*” que permite visualização espacial das regras de decisão que está limitada a três dimensões exigindo que o usuário selecione três das variáveis se o modelador tiver maior dimensão. Finalmente, existe a janela “*rule viewer*” que permite visualização gráfica das regras e do processo de inferência, gerando também os resultados de saída após a defuzzificação.

No presente trabalho, surgiu a necessidade de ajustar as distribuições de probabilidade aos dados resultantes do ensaio de degradação acelerada realizado. Para isto, foi escolhida a biblioteca *reliability* do software Python que também apresenta opções de critérios para realização da escolha da distribuição que apresenta o melhor ajuste. A referida biblioteca dispõe das funções mais utilizadas no campo da engenharia de confiabilidade, o que incentivou sua escolha, além de ser gratuita e, como baseia-se na linguagem de programação Python, possui uma documentação extensa para consulta, facilitando seu uso.

4.1.2 Normas técnicas

Nesta subseção apresenta-se as normas internacionais que auxiliaram no desenvolvimento dos estudos realizados, são elas:

- IEC 60851-5 (2011): esta parte da IEC 60851 forma um elemento de uma série de normas que tratam de fios isolados usados para enrolamentos em equipamentos elétricos. São discutidos e descritos os seguintes testes: de resistência elétrica; de tensão de ruptura; de continuidade de isolamento; de fator de dissipação dielétrica e de orifício de pino.
- IEC 60034-25 (2014): o objetivo desta especificação técnica é explicar, na medida do possível, o desempenho e dados operacionais para máquinas elétricas alimentadas por inversor de frequência, que são influenciadas pelo sistema de acionamento completo, incluindo sistema de alimentação, cabeamento, máquina elétrica, eixos mecânicos e equipamentos de controle. Para cada um destes componentes existem inúmeras variantes técnicas assim, quaisquer valores citados nesta especificação técnica são, portanto, apenas indicativos.
- IEC 60270 (2015): esta norma é aplicável à medição de descargas parciais que ocorrem em aparelhos, componentes ou sistemas elétricos quando testados com tensões alternadas de até 400 Hz ou com tensão contínua. As principais contribuições são: definição dos termos usados e grandezas a serem medidas; descrição dos circuitos de teste e medição que podem ser usados; definição dos métodos de medição analógica e digital necessários para aplicações comuns; especificação dos métodos e requisitos dos instrumentos usados para a calibração; orientação sobre os procedimentos de teste; assistência com relação à discriminação de descargas parciais de interferência externa. São abordadas medições elétricas de descargas parciais impulsivas (de curta duração) e feita referência a métodos não elétricos, usados principalmente para localização de descargas parciais.
- IEC 60034-18-41 (2014): Os sistemas de isolamento que não devem experimentar atividade de descarga parcial dentro das condições especificadas em suas vidas úteis (Tipo I) são tratados nesta norma, são geralmente usados em máquinas rotativas classificadas em 700 Vr.m.s. ou menos e tendem a ter enrolamentos aleatórios. Os procedimentos descritos

são direcionados para: qualificação do sistema de isolamento; tipo e teste de rotina dos enrolamentos completos das máquinas de serviço, sabendo que antes de realizar qualquer teste, deve-se decidir sobre o nível de gravidade que o sistema deverá suportar. A severidade é baseada em quão grande será o *overshoot* de tensão e quão curto será o tempo de subida nos terminais da máquina. Em testes de qualificação, o sistema de isolamento é usado para construir vários objetos de teste representativo. Se o objeto de teste estiver livre de descarga parcial nas condições de teste especificadas no final da sequência de teste, o sistema de isolamento é qualificado para a severidade que foi selecionada. Testes de tipo e de rotina opcionais são realizados em enrolamentos completos para demonstrar que eles estão livres de descarga parcial sob condições de onda senoidal ou de impulso (conforme apropriado) para a severidade que o fabricante escolheu. Uma classe de isolamento de tensão de impulso é então atribuída à máquina.

- IEC 60034-18-42 (2017): Os testes para qualificação e aceitação de sistemas de isolamento elétrico escolhidos para máquinas elétricas rotativas que devem suportar a atividade de descarga parcial em qualquer parte do sistema de isolamento ao longo de suas vidas úteis (Tipo II) são descritos nesta especificação técnica, são geralmente usados em máquinas rotativas e tendem a ter bobinas enroladas, geralmente com classificação acima de 700 Vr.m.s. O procedimento de qualificação é completamente diferente daquele usado para sistemas de isolamento Tipo I e envolve o envelhecimento destrutivo de objetos de teste isolados em condições aceleradas. Exige-se uma curva de vida do sistema de isolamento que pode ser interpretada para fornecer uma estimativa da vida nas condições de serviço com o conversor. Grande importância é atribuída à qualificação de qualquer sistema de gradação de tensão que é usado e os testes aqui devem ser realizados sob condições de impulso repetitivo. Se for comprovado que o sistema de isolamento fornece uma vida útil aceitável sob as condições de envelhecimento adequadas, ele está qualificado para uso. O teste de aceitação é realizado em bobinas feitas usando este sistema de isolamento quando submetidas a um teste de resistência de tensão.

- ASTM E1641 (2016): descreve-se o método de teste para determinação dos parâmetros cinéticos, energia de ativação de Arrhenius e pré-fator exponencial por termogravimetria, com base no pressuposto de que a decomposição obedece à cinética de primeira ordem usando o Método Isoconversional de Ozawa / Flynn / Wall. Este método de teste é geralmente aplicável a materiais com perfis de decomposição bem definidos, ou seja, uma suave, mudança contínua de massa com uma única taxa máxima, normalmente para decomposição ocorrendo na faixa de 400 a 1300 K (nominalmente 100 a 1000 ° C). O referido método é semelhante ao ISO 11358-2, mas difere em seu tratamento matemático.
- ASTM E1877 (2017): nesta norma ocorre uma metodologia para determinação da resistência térmica, índice térmico e índice térmico relativo para materiais orgânicos usando o gerador de energia de ativação de Arrhenius por termogravimetria. Esta prática é geralmente aplicável a materiais com um perfil de decomposição térmica bem definido, ou seja, um perfil suave, mudança contínua de massa. Não existe um padrão ISO equivalente a esta prática. Este padrão internacional foi desenvolvido de acordo com princípios internacionalmente reconhecidos e estabelecida na Decisão de Princípios para o Desenvolvimento de normas, guias e recomendações internacionais emitidas pela Organização Mundial do Comércio Técnico Comitê de Barreiras ao Comércio (TBT).

4.1.3 Ensaio de degradação acelerada da isolação dos fios esmaltados

Os ensaios de degradação acelerada da isolação de fios esmaltados são executados utilizando uma fonte de tensão que pode ser senoidal ou pulsada. Esta tensão é aplicada em amostras do tipo Par Torcido (FIGURA 7), preparadas com o fio esmaltado que se deseja avaliar.

FIGURA 7 – PAR TORCIDO (CORPO DE PROVA)



FONTE: A autora (2021).

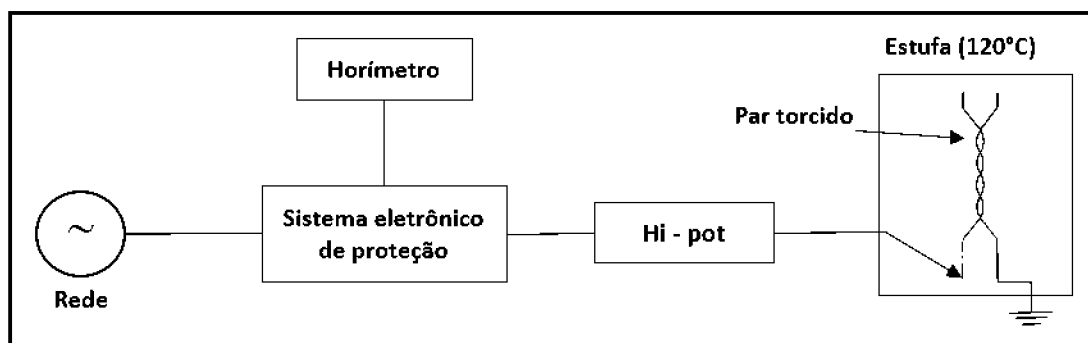
A degradação das amostras ocorre através da ocorrência de descargas parciais até que a tensão aplicada consiga ionizar o meio isolante e inicie a condução de uma corrente elétrica elevada (corrente de convecção). A tensão aplicada não pode ultrapassar a tensão de ruptura do dielétrico das amostras, para que a falha não ocorra instantaneamente. As etapas para execução do referido ensaio são:

1. Corta-se dez amostras do fio esmaltado com comprimento de aproximadamente 75 cm;
2. O fio de cobre é torcido em aparelho calibrado respeitando a tensão mecânica e o número de voltas para cada bitola de acordo com a norma IEC 60851-5 (2011).
3. Com o sistema desligado coloca-se as dez amostras na estufa na temperatura de 120 °C por um tempo suficiente para eliminação da umidade (aproximadamente 2 horas);
4. Liga-se o sistema de exaustão para eliminar os gases gerados no ensaio;
5. Aciona-se o seletor habilitando o comando e liga-se o *Hi-pot* em tensão e frequência de chaveamento pré-determinadas, lembrando que não é possível atingir frequências de chaveamento mais elevadas (acima de 5kHz) devido a alta capacitância característica dos IGBT's utilizados.
6. Com as amostras estabilizadas na estufa (120 °C) inicia-se o ensaio pressionando o botão de início. Quando o *Hi-pot* informar a falha, durante esta verificação, o controle eletrônico de proteção (CLP) reconhece qual amostra falhou, registra o tempo em minutos e desabilita o acionamento desta amostra. O ensaio

continua automaticamente sem a(s) amostra(s) excluída(s). Na FIGURA 8 pode-se observar o diagrama do ensaio.

Após a falha da última amostra, os tempos de queima das amostras são registrados para posterior tratamento dos dados, com o objetivo de se avaliar o tempo de vida dos fios esmaltados.

FIGURA 8 – DIAGRAMA DO ENSAIO



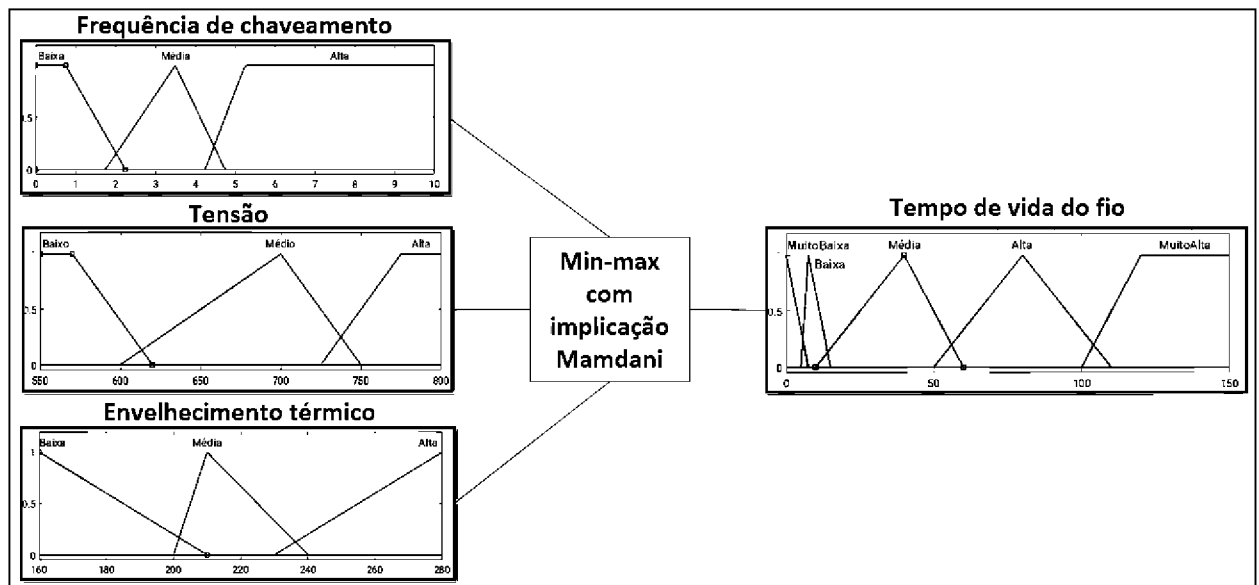
FONTE: A autora (2021).

4.2 MODELO PROPOSTO

Para projetar o sistema *fuzzy* é necessário selecionar as variáveis linguísticas, ajustar as funções de pertinência (pela quantidade, forma, posição), propor regras de inferência, construir relações lógicas, determinar as fórmulas para operações de união e intersecção (função de implicação) e selecionar a melhor técnica de defuzzificação. A base de regras e as funções de pertinência que estão associadas aos termos linguísticos e ao mecanismo de inferência formam a base do conhecimento. A participação dos especialistas proporcionou o acesso as informações relevantes para o problema de pesquisa, descrevendo experiências práticas e viabilizando a realização de ensaios para levantamento de dados, que foram utilizados na elaboração do sistema *fuzzy* desenvolvido. A FIGURA 9 ilustra os aspectos do modelo proposto baseado no sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido e nas subseções desta seção serão apresentados os critérios adotados em cada uma das etapas da construção deste modelo.

No Apêndice 1, apresenta-se a metodologia generalizada para quantificação do tempo de vida do fio esmaltado utilizado em estatores de motores elétricos alimentados por inversor de frequência.

FIGURA 9 – MODELO PROPOSTO



FONTE: A autora (2021).

4.2.1 Fuzzificação

Na etapa de fuzzificação, os valores numéricos de entrada e de saída são convertidos para o domínio *fuzzy*, definindo as funções de pertinência e atribuindo termos linguísticos.

4.2.1.1 Variável de Entrada: Envelhecimento Térmico (ET)

Foi selecionado envelhecimento térmico do fio ao invés de simplesmente considerar a temperatura de exposição do equipamento, para posteriormente realizar ensaios e validar o modelo. O envelhecimento térmico é um efeito da temperatura sobre processos químicos e físicos. Ou seja, ocorrendo exposição em temperaturas acima do limite da classe térmica de cada material, pode-se verificar perda de integridade física, que fica caracterizada pela craquelção do material isolante. O envelhecimento térmico do enrolamento confere vulnerabilidade ao sistema de isolamento referente outros fatores que podem causar curto-circuito entre espiras, como o estresse mecânico e ambiental (WEG, 2016). A determinação das faixas de temperatura que promovem este envelhecimento ocorreu pela avaliação dos dados da análise térmica dos polímeros usados no isolamento do fio.

Carrasco (1993) propôs uma metodologia para estudo cinético de decomposição térmica de materiais poliméricos através da termogravimetria dinâmica, empregando rampa de aquecimento. Desenvolveu-se soluções analíticas genéricas, relacionando a conversão com temperatura por métodos integrais. O procedimento é matematicamente rigoroso e determina a energia de ativação e o fator pré-exponencial. O cálculo destes parâmetros cinéticos é baseado na equação geral (1) que relaciona variação de massa em relação a temperatura, para taxas de aquecimento no tempo. A equação (1) foi desenvolvida considerando a equação de Arrhenius $k = Z e^{\frac{E_a}{RT}}$ que relaciona o efeito da mudança de temperatura na taxa da reação, esta relação domina os fenômenos físicos e químicos.

$$\frac{d\alpha}{dt} = (1-\alpha)^n \frac{Z}{\beta} e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

em que:

α = fração de decomposição

t = tempo reacional (s)

T = temperatura absoluta (K)

β = rampa de aquecimento $K s^{-1}$

Z = fator pré-exponencial (s^{-1})

E_a = energia de ativação de Arrhenius ($J mol^{-1}$)

R = constante dos gases ($8,314 J mol^{-1} K^{-1}$)

n = ordem da reação

Desenvolvendo a equação (1) é possível determinar os parâmetros cinéticos a partir dos dados cinéticos resultantes da região de decomposição pois, a massa da amostra é registrada continuamente em função da temperatura pelo método de termogravimetria (TGA).

A aquisição dos dados cinéticos pelo TGA se baseia no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo e da temperatura. Esta técnica é muito utilizada na caracterização do perfil de degradação de polímeros e de vários outros materiais. A exposição à temperatura elevada pode, algumas vezes, alterar a estrutura química e, por consequência, as propriedades físicas dos materiais. Portanto, a curva de degradação térmica, em condições não isotérmicas, mostra o perfil da resistência ou

estabilidade térmica que o material apresenta quando submetido a uma variação de temperatura, sendo a amostra aquecida a três ou mais taxas diferentes, quanto mais rápida a taxa de aquecimento aplicada, mais alta se torna a temperatura de decomposição (MOTHÉ; AZEVEDO, 2009).

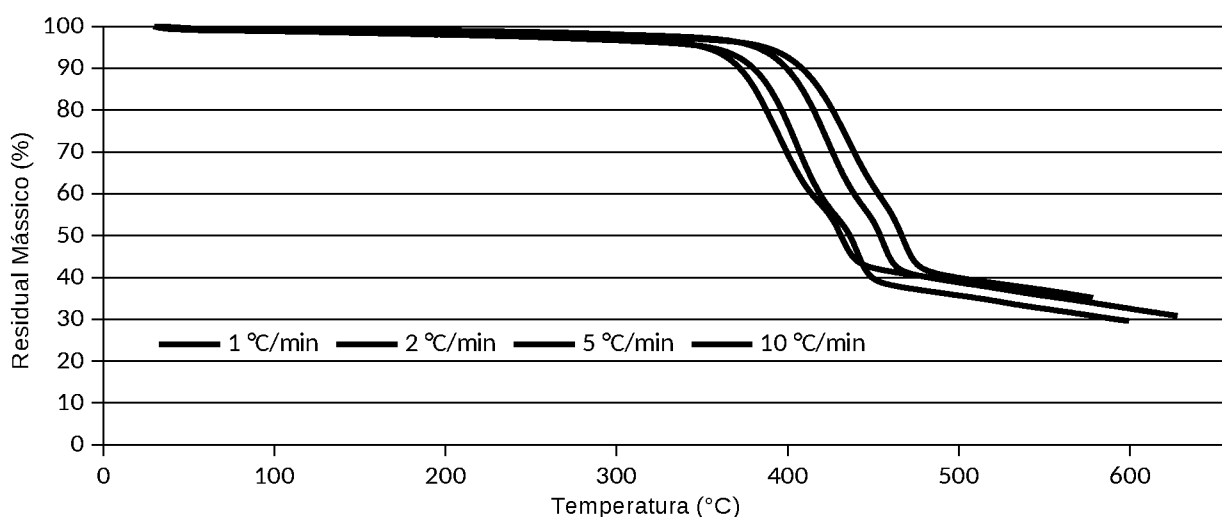
A partir dos valores obtidos na análise da curva de degradação térmica, resultante do ensaio de TGA, é possível obter a energia de ativação (E_a) que é usada para construir a curva de resistência térmica de um material orgânico com o objetivo de estimar sua vida útil, em temperaturas selecionadas. Esta prática contribui para o controle de qualidade, aceitação de especificações e pesquisas técnicas. A resistência térmica estimada (tempo) de um material pode ser calculada a partir de um índice térmico selecionado (temperatura). Além disso, a resistência térmica estimada de um material, no tempo e temperatura de falha selecionados, pode ser estimada quando comparada a um valor de referência para resistência térmica e índice térmico obtido a partir de testes de envelhecimento em fornos elétricos ou mecânicos. Cabe definir alguns conceitos específicos: falha - alteração em algumas propriedades químicas, físicas, mecânicas, elétricas ou outras de magnitude suficiente para torná-la inadequada para um uso específico; resistência térmica - o tempo até a falha correspondente a uma temperatura selecionada. Também conhecido como vida útil térmica ou tempo até a falha e índice térmico - a temperatura correspondente a um tempo até a falha selecionado (MOTHÉ; AZEVEDO, 2009).

As normas técnicas ASTM E1641 (2016) e ASTM E1877 (2017) consideram ordem reacional unitária ($n = 1$) e o Método de Coats-Redfern (CR) foi delimitado para calcular os parâmetros cinéticos. Porém, o método CR para a análise cinética de dados não isotérmicos de TGA mostra-se inadequado e existem inconsistências nos valores cinéticos publicados obtidos usando essa abordagem. Isto foi comprovado através dos resultados apresentados pelos autores Ebrahimi-Kahrizsangi e Abbasi (2008), indicando que o gráfico resultante será linear para todos os modelos cinéticos de reação e o mecanismo não pode ser reconhecido pelo método CR. No entanto, para reações com mecanismos complexos, o gráfico não deveria ser linear e o método CR não é válido nas análises cinéticas para encontrar o modelo de reação e os parâmetros cinéticos. No estudo cinético de decomposição térmica das poliamidas avaliadas no artigo, também foi verificado a

inviabilidade da metodologia apresentada nas normas técnicas citadas. Logo, foi selecionada a estrutura de cálculo do *software* Pyris® que emprega modelos de ordem variável, visto que esse parâmetro também é estimado, para determinar os parâmetros cinéticos.

Assim, primeiramente realizou-se a degradação térmica dos vernizes de impregnação no equipamento termogravimétrico da seguinte maneira: estabilização por um minuto a 30 °C e aquecimento de 30 a 660 °C, na rampa de aquecimento desejada. Em atmosfera inerte, empregando N₂ a uma vazão de 20 mL min⁻¹, as rampas de aquecimento empregadas foram de 1, 2, 5 e 10°C min⁻¹.

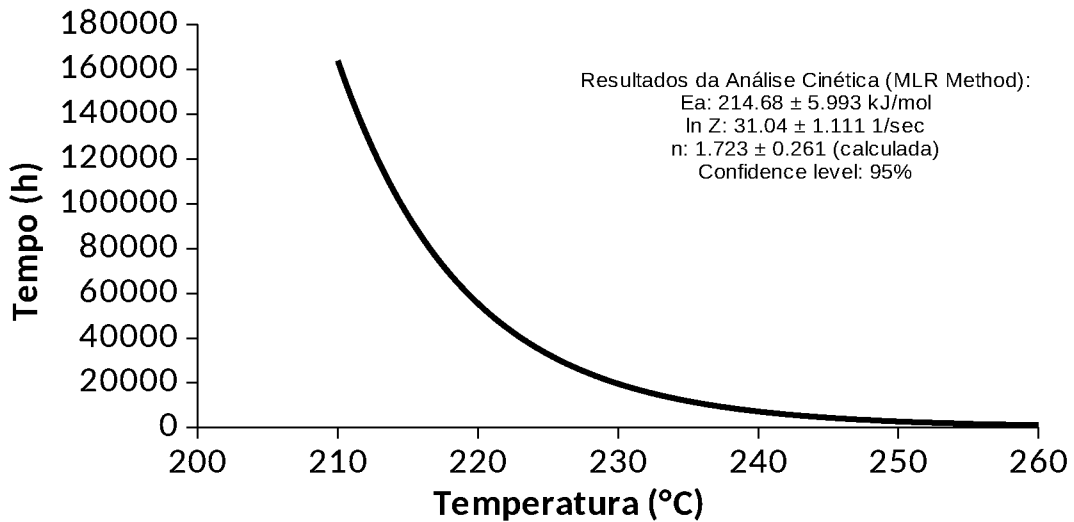
FIGURA 10 – ENSAIO TGA



FONTE: A autora (2021).

A partir dos resultados do ensaio TGA apresentados na FIGURA 10 foi possível determinar os parâmetros cinéticos para gerar o gráfico de tempo de degradação versus temperatura (FIGURA 11), via *software* Pyris®, para perda mássica fixada em 10%.

FIGURA 11 – TEMPO DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA SOFTWARE PYRIS®



FONTE: A autora (2021).

Avaliando os dados expostos na FIGURA 11 foram determinadas faixas de resistência térmica (vida útil em horas) para os vernizes utilizados na isolação do fio e determinados os intervalos relacionados, lembrando que considera-se o envelhecimento apenas como um efeito da temperatura. As equações (2), (3) e (4) são as funções que indicam os graus de pertinência para os termos linguísticos Baixo, Médio e Alto, respectivamente, da variável linguística de entrada Envelhecimento Térmico, considerando perda mássica real de 10% (perda de sua integridade física). Na FIGURA 12 são apresentadas estas funções de pertinência.

- Baixo (tempo de degradação acima de 160000 horas):

$$f(x) = \frac{210 - x}{50} \quad \text{quando } 160 \leq x \leq 210 \quad (2)$$

- Médio (tempo de degradação entre 20000 e 160000 horas):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-200}{10} & \text{se } 200 \leq x < 210 \\ \frac{240-x}{30} & \text{se } 210 \leq x \leq 240 \end{cases} \quad (3)$$

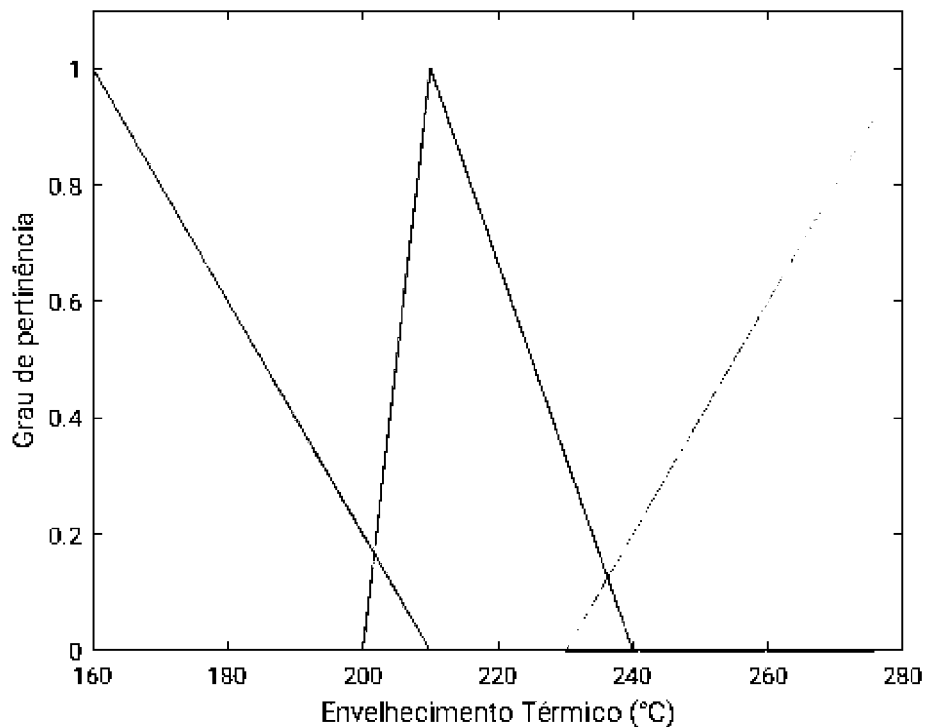
- Alto, fixado tempo de degradação abaixo de 20000 horas:

$$f(x) = \frac{x-230}{50} \quad \text{se } 230 \leq x \leq 280 \quad (4)$$

sendo $f(x)$ o grau de pertinência e x a temperatura de envelhecimento térmico que o fio foi submetido.

Conforme IEC 60085 (2007), as classes térmicas da isolação são: Classe Y (90°C), Classe A (105°C), Classe B (130°C), Classe F (155°C) e Classe H (180°C). Para cada classificação, estas são as temperaturas máximas que o material de que é feito o isolamento deve suportar sem perder as suas propriedades em condições normais de operação durante a sua vida útil. Foi considerado que, se os fios esmaltados abordados se enquadram na classe térmica da isolação, para as aplicações projetadas, o envelhecimento térmico exerce pouca influência na degradação da isolação assim, os valores das classes térmicas foram considerados no termo linguístico Baixo.

FIGURA 12 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA ET



FONTE: A autora (2021).

4.2.1.2 Variável de Entrada: Tensão

O envelhecimento acelerado do isolamento do fio é causado principalmente pela ocorrência de descargas parciais (DP). Devido a sobretensões geradas nos sistemas de alimentação de motores de indução e alta frequência de repetição dos pulsos de tensão PWM, a intensidade do DP pode ser muito grande, mesmo nos enrolamentos do estator de motores de baixa tensão que deveriam operar sem

apresentar degradação, mas sabe-se que isto não ocorre na prática. Com o objetivo de simular este efeito, os valores que compõe a variável linguística Tensão foram delimitados para representar o quanto da tensão que aparece nos terminais de alimentação do motor recai sobre o fio.

Os autores Montanari *et al.* (2019) indicam que, uma estimativa do tempo de vida do isolamento depende do valor da PDIV (tensão de início de descarga parcial) para isto, foram realizados ensaios que indiquem estes valores com pares torcidos produzidos com os fios esmaltados examinados. Os procedimentos para condução dos ensaios foram baseados nas orientações e diretrizes das Normas IEC 60270 (2015) e IEC 60034-18-42 (2017). A média aritmética, desvio padrão, valores máximo e mínimo das medições de dez corpos de prova seguem descritos na TABELA 1 para duas diferentes bitolas do fio ANSI MW35.

TABELA 1 – TENSÃO DE INÍCIO DE DESCARGA PARCIAL (PDIV)

Parâmetros da Tensão (V)	Bitolas	
	0,8 mm	1,32 mm
Mínima	580	560
Máxima	650	640
Média aritmética	617	617
Desvio padrão	20,03	21,63

FONTE: A autora (2021).

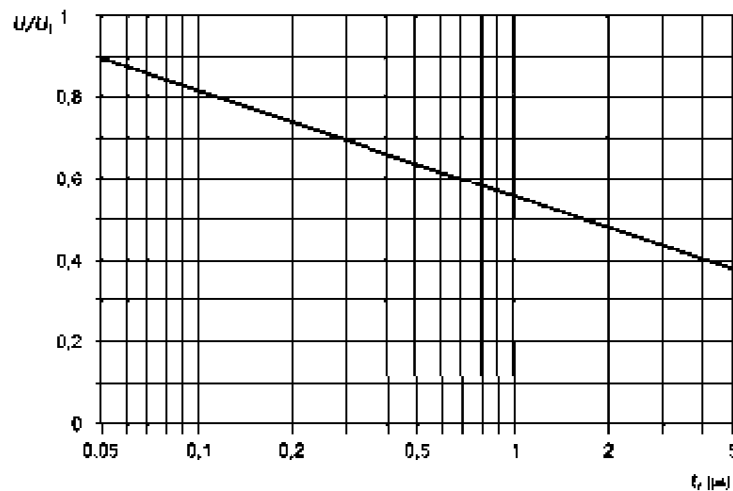
Para que o Modelo elaborado seja válido para fios de bitola entre 0,8 mm até 1,32 mm, utilizando os resultados do ensaio e considerando que, sem ocorrência de descargas parciais, não existe a deterioração no isolamento, desenvolveu-se a função $f(x)$ para calcular os graus de pertinência do termo linguístico “Baixa”, sendo x a tensão que recai sobre o fio.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq 560 \\ \frac{617-x}{57} & \text{se } 560 < x \leq 617 \end{cases} \quad (5)$$

Os motores podem ser mais ou menos estressados dependendo da combinação do *overshoot* da tensão nos terminais do motor e do tempo de subida ou *rise time* de impulso. Para simplificar a avaliação de todas as combinações possíveis destes dois parâmetros, a norma IEC 60034-18-41 (2014) indica algumas combinações que, na prática, simulam o uso o inversor na maioria das aplicações. Para isto, especifica-se quatro categorias de estresse elétrico para motores elétricos

(A-benigno, B-moderado, C-severo e D-extremo) que auxiliam na qualificação da isolação frente a aplicação dos níveis de tensão de entrada (TABELA 2). Se a distribuição da tensão dentro das bobinas, como uma ação do *rise-time* é conhecida pelo fabricante, para um projeto específico de máquina rotativa, os dados podem ser usados para calcular a fração da tensão de pulso (U/U_j) que estressa o isolamento. Para diversos valores de tempo de subida (*rise time*) foi gerado o GRÁFICO 2. Como foi considerado apenas um valor padrão de $0,3 \mu s$ para o *rise time*, o valor correspondente de U/U_j retirado do gráfico é de 0,70.

GRÁFICO 2 - TENSÃO ESTRESSANDO O ISOLAMENTO PARA ESTADORES ENROLADOS ALEATORIAMENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SUBIDA DO IMPULSO



FONTE: IEC 60034-18-41 (2014, p. 19).

TABELA 2 – CATEGORIAS DE ESTRESSE ELÉTRICO

Categorias de estresse	Fator de <i>overshoot</i> (OF)	Impulso rise time (μs)
A – Benigno	$OF \leq 1,1$	0,3
B – Moderado	$1,1 \leq OF \leq 1,5$	
C – Severo	$1,5 \leq OF \leq 2$	
D – Extremo	$2 \leq OF \leq 2,5$	

FONTE: IEC 60034-18-41 (2014, p. 21, tradução nossa).

Foi utilizada a fórmula (6) para calcular os valores de tensão que representam os extremos de cada categoria:

$$U_f = \sqrt{2} \cdot V_r \cdot OF \cdot \frac{U}{U_j} \quad (6)$$

Sendo:

U_f : tensão que recai sobre o isolamento do fio (V)

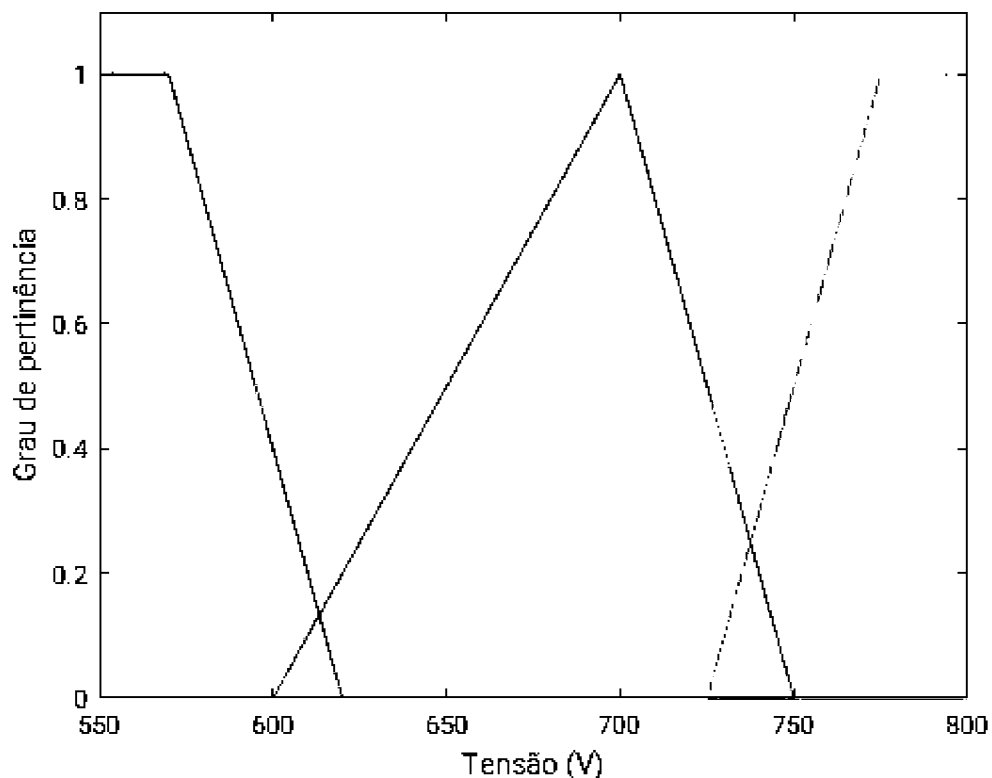
V_r : tensão da rede (entrada)

OF: fator de *Overshoot*, depende da categoria de estresse

$\frac{U}{U_j}$: fração da tensão de pulso que estressa o isolamento

Na fórmula (6) a tensão da rede deve ser multiplicada por $\sqrt{2}$ para que seja considerado uma tensão de pico da onda de entrada, ou seja, ocorre a retificação da amplitude dos pulsos que o inversor aplica no motor.

FIGURA 13 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA TENSÃO



FONTE: A autora (2021).

Os valores de U_f para os extremos dos intervalos das categorias de estresse Benigno e Moderado da TABELA 2, considerando tensão da rede 380 V, já foram utilizados no termo linguístico Baixa pois, representaram as faixas da PDIV. Também foi definido que o termo linguístico Média refere-se a categoria de estresse Severo (considerando o valor inicial acima da PDIV) e Alta para a categoria de estresse

Extremo. Logo, as funções $f(x)$ para cálculo dos graus de pertinência, sendo x a tensão que recai sobre o fio, foram desenvolvidas com base nestes valores. Na FIGURA 13 são apresentadas estas funções de pertinência.

$$\text{Média: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-600}{100} & \text{se } 600 \leq x < 700 \\ \frac{750-x}{50} & \text{se } 700 \leq x \leq 750 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Alta: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-730}{40} & \text{se } 730 < x < 770 \\ 1, & \text{se } x \geq 770 \end{cases} \quad (8)$$

4.2.1.3 Variável de Entrada: Frequência de Chaveamento (FC)

Em função da rápida evolução da eletrônica de potência, essa frequência atualmente atinge valores da ordem de 20 kHz e, quanto maior for a frequência de chaveamento (pulsção) do inversor, mais rápida será a degradação do sistema isolante, experimentos realizadas nesse sentido mostram dados interessantes: para frequências de chaveamento menor ou igual a 5 kHz a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional à frequência de chaveamento, ao passo que para frequências de chaveamento maior que 5 kHz a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional ao quadrado da frequência de chaveamento YIN (1997, p. 21).

Varnier (2016) apresentou resultados que demonstraram claramente a influência da frequência na degradação da isolação do dielétrico das amostras e construiu uma curva de tempo de falha das amostras por influência da frequência para o fio MW 16-C. Ressaltou também que o fio MW 35-C apresenta maior resistência aos efeitos causados pelos pulsos de tensão em alta frequência, indicando que para cada tipo de fio e cada nível de tensão, haverá uma curva característica que represente os valores com comportamento exponencial ou linear.

O dispositivo criado para realização dos ensaios gera tensão retangular pulsada e frequência de chaveamento que pode ser ajustada de acordo com o inversor industrial padronizado utilizado em: 1,25 kHz; 2 kHz; 2,50 kHz; 5 kHz e 10kHz; estes valores foram considerados para elaboração dos termos linguísticos e funções de pertinência $f(x)$, sendo x a frequência de chaveamento fixada pelo

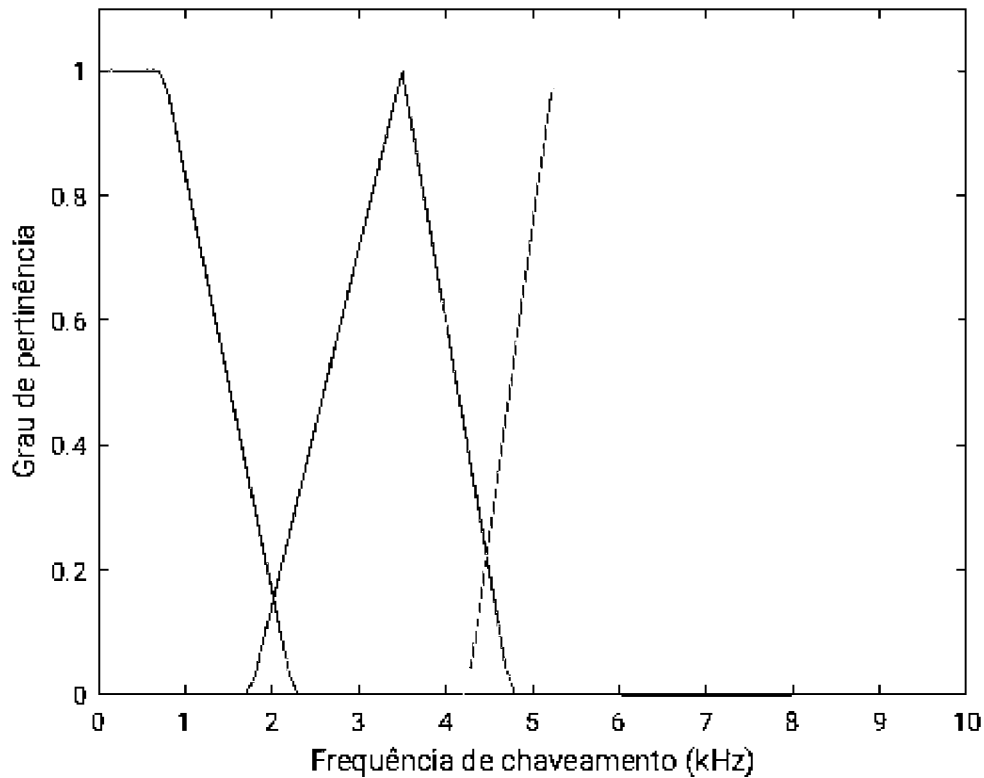
inversor, para cada termo linguístico. Na FIGURA 14 são apresentadas estas funções de pertinência.

$$\text{Baixa: } f(x) = \frac{2,25-x}{2,25} \text{ se } 0 \leq x \leq 2,25 \quad (9)$$

$$\text{Média: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-1,75}{1,75} & \text{se } 1,75 < x \leq 3,5 \\ \frac{4,75-x}{1,75} & \text{se } 3,5 < x \leq 4,75 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Alto: } f(x) = \begin{cases} x-4,25 & \text{se } 4,25 \leq x < 5,25 \\ 1, & \text{se } x \geq 5,25 \end{cases} \quad (11)$$

FIGURA 14 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE ENTRADA FC



FONTE: A autora (2021).

4.2.1.4 Variável de Saída: Tempo de Vida

Foram definidas as funções $f(x)$ para o cálculo dos graus de pertinência da variável linguística de saída “VidaFio”, considerando a mesma unidade de medida resultante dos ensaios para validação do modelo proposto viabilizando a

comparação destes, no intervalo de 0 até 150 horas. Este máximo de 150 horas foi fixado porque haviam no banco de dados da empresa parceira os resultados experimentais de um ensaio de tempo de vida sem considerar frequência de chaveamento, apenas tensão senoidal e, para nenhuma condição do ensaio, o tempo de vida foi maior que 150 horas. Na construção e representação destas funções de pertinência, podem ser consideradas uma variedade de formas; entretanto, foi escolhida a forma triangular e trapezoidal que frequentemente fornecem uma representação adequada do conhecimento especialista e, ao mesmo tempo, simplifica significativamente o processo de computação. A interseção entre os intervalos para os cinco termos linguísticos adjacentes foi mantida, mesmo existindo variação significativa dos valores. Sendo x o tempo de vida em horas, foram delimitados os intervalos para cada nível (termo linguístico) e as respectivas funções:

$$\text{Muito Baixa: } f(x) = \frac{7,5-x}{7,5} \quad \text{quando } 0 \leq x < 7,5 \quad (12)$$

$$\text{Baixa: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-5}{2,5} & \text{se } 5 < x < 7,5 \\ \frac{15-x}{5} & \text{se } 7,5 \leq x < 15 \end{cases} \quad (13)$$

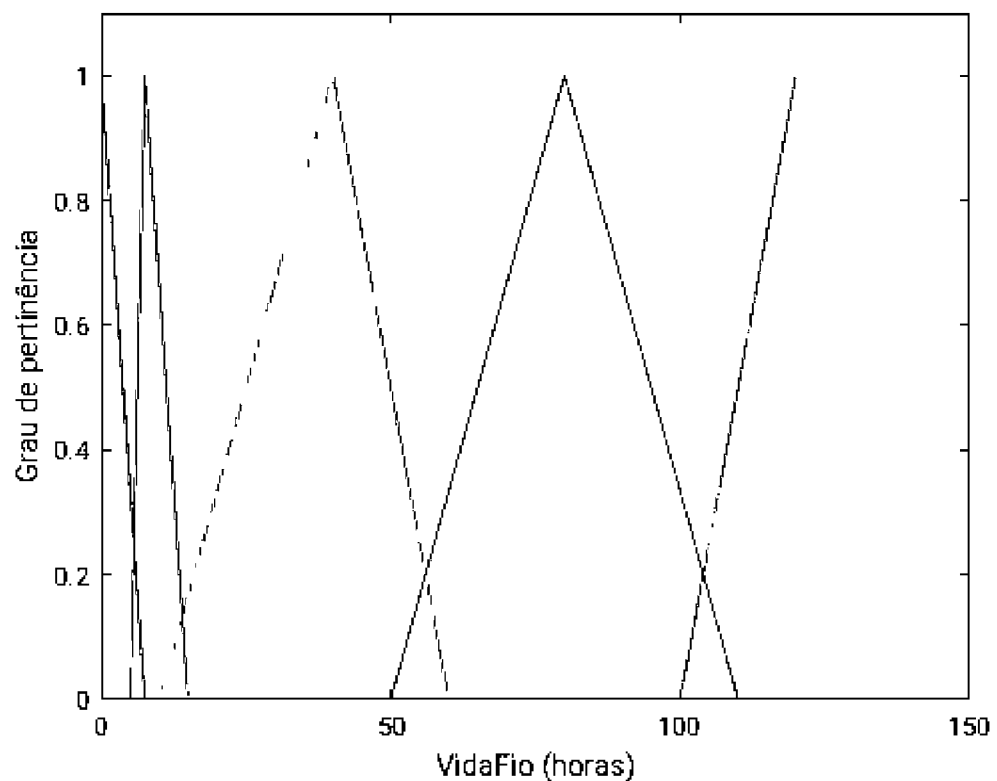
$$\text{Média: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-10}{30} & \text{se } 10 \leq x < 40 \\ \frac{60-x}{20} & \text{se } 40 \leq x < 60 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Alta: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-50}{30} & \text{se } 50 \leq x < 80 \\ \frac{110-x}{30} & \text{se } 80 \leq x < 110 \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Muito Alta: } f(x) = \begin{cases} \frac{x-100}{20} & \text{se } 100 \leq x < 120 \\ 1, & \text{se } x \geq 120 \end{cases} \quad (16)$$

Na FIGURA 15 tem-se representado o conjunto *fuzzy* de saída para o tempo de vida do fio esmaltado.

FIGURA 15 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE SAÍDA VidaFio



FONTE: A autora (2021).

4.2.2 Base de regras e inferência

Devido à complexidade na determinação das causas dos estresses térmico e elétrico, a construção da base de regras foi possível com o auxílio de dois especialistas: um deles possui experiência na área de Engenharia de Processos, com ênfase em tecnologia de materiais, graduado e mestre em Engenharia Química, possuindo experiência em Projetos Internacionais de Pesquisa & Desenvolvimento. O outro especialista é graduado e mestre em Engenharia Elétrica, desenvolve projetos na área de tecnologia de produto com 20 anos de atuação na empresa parceira fabricante de motores elétricos.

A base de regras no modelo proposto combina as variáveis de entrada de acordo com seus atributos, considerando a agregação dos antecedentes com a função mínimo e a agregação das regras com a função máximo. O QUADRO 3 apresenta as 27 regras formuladas. Todos os consequentes das regras foram discutidos e analisados pelos especialistas envolvidos na pesquisa e devido a

limitação de tempo, foram selecionadas 14 regras para realização dos ensaios que serão utilizados na validação do modelo proposto, as demais regras foram comparadas com estas regras e classificadas em contidas ou estimadas. Na coluna “categoria” tem-se a identificação de cada uma delas, sendo que as regras consideradas estimadas ou contidas não foram utilizadas no modelo proposto.

Foi considerado que combinações dos termos linguísticos das variáveis de entrada que não diminuem o tempo de vida (consequente) poderiam ser explicadas pelas 14 regras ensaiadas. Ou seja, as regras 3, 12 e 21 em relação as regras 6, 15 e 24, respectivamente, possuem diferenças apenas na variável de entrada tensão que apresenta o termo linguístico Baixa nas primeiras e Média nas segundas regras. Já as regras 4, 10, 13, 19 e 22 possuem diferença apenas na variável de entrada envelhecimento térmico com termo linguístico Baixo comparativamente com Médio das regras 5, 11, 14, 20 e 23 respectivamente. E a regra 8 diferencia-se da regra 17 somente em relação a variável de entrada frequência de chaveamento apresentando termo linguístico Baixa para a primeira e Média para a segunda. Cabe ressaltar que, as nove regras estimadas citadas possuíam termo linguístico Baixa (o), para uma das variáveis de entrada utilizadas para comparação, o que deve exercer pouca influência na diminuição no tempo de vida.

Nas regras 9 e 26 tem-se os termos linguísticos denominados Alta (o) em duas das três variáveis de entrada assim, acredita-se que o tempo de vida deve ser estimado em Muito Baixo. Por fim, as regras 1 e 27 são incorporadas para realização da delimitação lógica do problema, mesmo assim, a regra 27 foi testada, ajustando as condições máximas para cada variável, resultando em tempo de vida próximo a zero. Ressalta-se que a regra 27 é a única com operador OU, isto foi escolhido porque a operação de união (maior grau de pertinência) foi considerada mais adequada.

Uma vez definidos os conjuntos e as regras *fuzzy* da base de conhecimento, os mesmos devem ser codificados, empregando uma ferramenta que utiliza o sistema de inferência *fuzzy* logo, utilizou-se o *toolbox fuzzy* do software MATLAB® para realização da implementação.

QUADRO 3 - BASE DE REGRAS

Regra	Variáveis de entrada				Variável de saída		Categoria
	Se frequência de chaveamento	E	Se tensão	E	Se envelhecimento térmico	Então	VidaFio
1	Baixa	e	Baixa		Baixo	então	Muito Alta
2	Baixa	e	Baixa		Médio	então	Muito Alta
3	Baixa	e	Baixa		Alto	então	Baixa
4	Baixa	e	Média		Baixo	então	Média
5	Baixa	e	Média		Médio	então	Média
6	Baixa	e	Média		Alto	então	Baixa
7	Baixa	e	Alta		Baixo	então	Média
8	Baixa	e	Alta		Médio	então	Baixa
9	Baixa	e	Alta		Alto	então	Muito Baixa
10	Média	e	Baixa		Baixo	então	Alta
11	Média	e	Baixa		Médio	então	Alta
12	Média	e	Baixa		Alto	então	Muito Baixa
13	Média	e	Média		Baixo	então	Média
14	Média	e	Média		Médio	então	Média
15	Média	e	Média		Alto	então	Muito Baixa
16	Média	e	Alta		Baixo	então	Baixa
17	Média	e	Alta		Médio	então	Baixa
18	Média	e	Alta		Alto	então	Muito Baixa
19	Alta	e	Baixa		Baixo	então	Alta
20	Alta	e	Baixa		Médio	então	Alta
21	Alta	e	Baixa		Alto	então	Muito Baixa
22	Alta	e	Média		Baixo	então	Baixa
23	Alta	e	Média		Médio	então	Baixa
24	Alta	e	Média		Alto	então	Muito Baixa
25	Alta	e	Alta		Baixo	então	Baixa
26	Alta	e	Alta		Médio	então	Muito Baixa
27	Alta	e	Alta		Alto	então	Muito Baixa

FONTE: A autora (2021).

Lembrando que, deseja-se definir o tempo de vida do isolamento considerando os efeitos térmicos e capacidade de resistência elétrica dos materiais utilizados, possibilitando a avaliação, interligação e verificação de consequências dos entrelaçamentos propostos. Por exemplo, observa-se que, ao listar os antecedentes FC é alto, Tensão é alta e ET é alto com o termo qualificante alta, este termo linguístico é representado por um conjunto *fuzzy* para cada uma das variáveis de entrada e considera-se que TempoVida é o conjunto *fuzzy* que representa cada intervalo da variável de saída.

Assim, na relação *fuzzy* FC e Tensão e ET $\rightarrow$ TempoVida usa-se o operador “e” como intersecção para relacionar as variáveis de entrada (exceto na regra 27) e união para agregar o resultado de cada uma das regras, o símbolo “ $\rightarrow$ ” denota o operador *fuzzy* de implicação, em que foi escolhido o implicador Mamdani. E assim por diante, para todas as regras listadas no QUADRO 3.

4.2.3 Defuzzificação

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída, resultante do processo de inferência, é necessário efetuar a transformação desta informação num valor discreto através do processo de defuzzificação. Para o modelo proposto foi selecionado o método de Centro de Área (CDA) que determina como saída o tempo de vida do isolamento do fio resultante dos respectivos valores simulados para tensão (em V), frequência de chaveamento (em kHz) e envelhecimento térmico (em °C).

O método de defuzzificação CDA é considerada no intervalo $[a, b]$, no caso, o alcance da cobertura das funções de pertinência considerando $[0, 150]$, para o modelo proposto, em horas. A área formada pela contribuição de todas as regras será ponderada na equação (17), na qual o grau de pertinência (peso) de cada ponto inserido no modelo é considerado, obtendo-se como resultado um número real, que é a coordenada x do ponto que representa o centro de área.

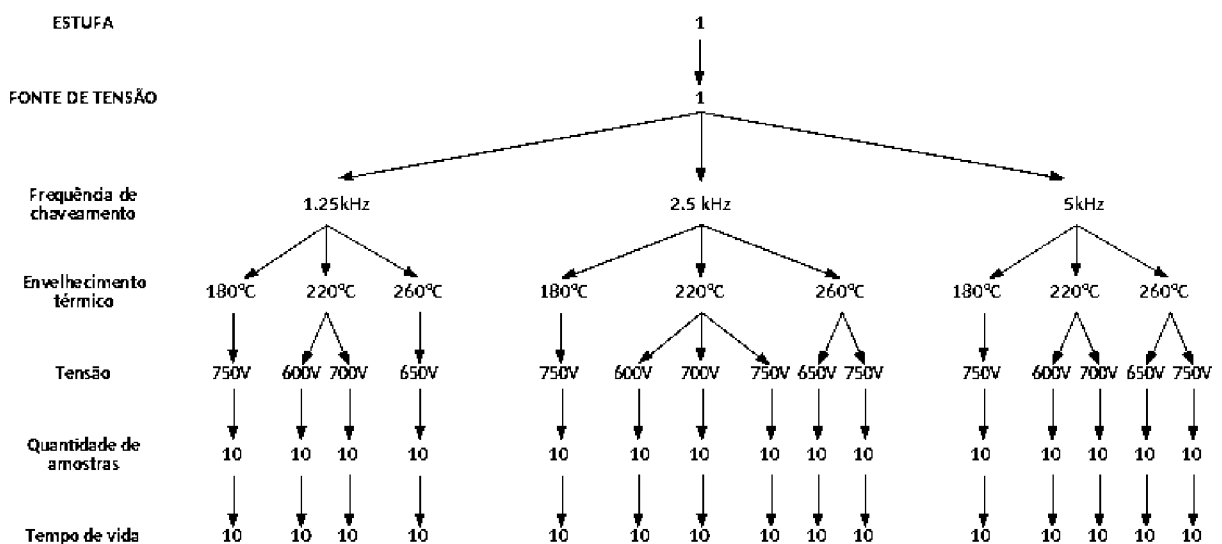
$$CDA = \frac{\int_a^a x \cdot \mu(x) dx}{\int_a^a \mu(x) dx} \quad (17)$$

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

O levantamento dos dados que relacionam os diversos cenários de configuração entre os fatores de estresse, considerados no modelo proposto, exige demasiado tempo e construção de dispositivos. Porém, com o intuito de desenvolver um modelo eficiente deve-se realizar a validação dos resultados, considerando o conjunto de regras. Para isto, foram realizados ensaios de degradação do isolamento de fios esmaltados que consistiu em “envelhecer” termicamente dez pares torcidos dos fios esmaltados por 168 horas (uma semana) em uma estufa que regula a temperatura em um valor selecionado. Na sequência foram impostas frequência (através de uma fonte chaveada) e tensão pré-determinadas. Gerando assim, o trio de entrada (condição de teste) para medir o tempo de vida até que cada par torcido apresente um curto-circuito (falha). Na subseção 2.4 foram descritos os procedimentos utilizados na realização do ensaio.

Foram escolhidas 15 condições de teste, sendo os valores pertencentes aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e representassem 15 regras do conjunto elaborado para o modelo proposto. Estes valores são descritos no esquema do planejamento experimental apresentado na FIGURA 16 onde foram testadas dez amostras para cada uma das condições de teste do ensaio planejado, totalizando 150 amostras de pares torcidos. Por razões econômicas e de flexibilidade, os experimentos foram conduzidos em pares torcidos (cordões de cobre entrelaçados, revestidos por um verniz isolante), visto que se espera que eles se comportem de maneira semelhante ao isolador do enrolamento do estator no que diz respeito aos esforços térmicos e elétricos.

FIGURA 16 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO



FONTE: A autora (2021).

Os dez tempos de vida resultantes foram organizados em ordem crescente de 1 até 10 e considerados para determinar um modelo probabilístico contínuo, com 90% de nível de confiança, que apresente melhor ajuste em relação aos dados de cada condição de teste específica. Para isto, foi utilizada a biblioteca *reliability* do software Python para engenharia de confiabilidade e análise de sobrevivência. Existem distribuições de probabilidade padrão disponíveis nesta biblioteca que são: exponencial, gama, Gumbel, lognormal, normal e Weibull. Todas podem ser utilizadas, devido sua comprovada adequação na caracterização do tempo de vida de produtos e materiais. O critério adotado para verificação da qualidade de ajuste

foi o AICc (*Akaike Information Criterion* corrigido) desenvolvido por Hurvich e Tsai (1989) para pequenas amostras. As funções dos modelos probabilísticos contínuos e demais características podem ser consultados em WALPOLE (2009) ou no site da biblioteca *reliability* (2021).

Assim, definidas as regras que devem ser validadas, realizados os ensaios e determinado o modelo probabilístico que melhor se ajusta aos dados, obtêm-se o valor de tempo de vida que representa cada ensaio considerando o valor esperado (esperança) da variável aleatória. Este valor será comparado com as saídas do sistema de inferência *fuzzy* proposto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se os resultados do ensaio de degradação acelerada, utilizados para validação do modelo proposto através do valor esperado da função de probabilidade que melhor se ajusta aos dados, dentre seis modelos probabilísticos clássicos selecionando-se o que obteve menor valor de *Akaike Information Criterion* corrigido (AICc). Considerando-se o modelo proposto validado, discute-se os valores de saída para avaliar se o mesmo incorpora os resultados da literatura sobre os fatores que degradam a isolação do fio.

5.1 MODELOS PROBABILÍSTICOS PARA AJUSTE AOS DADOS DO ENSAIO DE DEGRADAÇÃO

Os valores dos tempos de vida resultantes do ensaio de degradação descrito na subseção 2.4, para cada condição de teste, podem ser observados na TABELA 3.

TABELA 3 – TEMPOS DE VIDA RESULTANTES DO ENSAIO DE DEGRADAÇÃO

1,25 kHz				2,5 kHz						5 kHz			
750 V	600 V	700 V	650 V	750 V	600 V	700 V	750 V	650 V	750 V	750 V	600 V	700 V	650 V
180°C	220°C	220°C	260°C	180°C	220°C	220°C	220°C	260°C	260°C	180°C	220°C	220°C	260°C
418	2917	397	264	178	706	274	218	100	80	183	429	124	65
679	3963	402	304	214	958	442	238	109	93	195	1027	187	77
749	4191	750	349	234	994	506	250	112	104	225	1676	197	81
849	4446	771	354	249	4021	690	256	114	108	232	1786	206	82
1489	6810	1015	357	279	4778	744	262	127	123	276	2570	276	96
2028	7783	2007	593	299	4835	1012	266	134	133	287	3981	286	103
2332	7927	2211	616	360	4861	3319	285	179	146	399	4816	357	141
3703	9231	3822	686	367	5983	3830	390	193	151	426	4998	495	159
4434	10248	4619	836	378	6332	4148	429	201	162	428	6137	968	196
4689	11875	5652	957	435	7831	4499	573	256	167	440	7008	1121	267

FONTE: A autora (2021).

Conforme descrito em 4.4 para cada condição de teste foram ajustadas distribuições de probabilidades disponíveis na biblioteca *reliability* do *software* Python e considerado o AICc para selecionar a distribuição que melhor se ajusta aos dados dos ensaios, destaca-se em negrito na TABELA 4, a distribuição que apresenta menor valor para este critério selecionado.

TABELA 4 – AICc DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE PARA AS CONDIÇÕES DE TESTE

Distribuições	1,25 kHz				2,5 kHz						5 kHz			
	750 V	600 V	700 V	650 V	750 V	600 V	700 V	750 V	650 V	750 V	750 V	600 V	700 V	650 V
	180°C	220°C	220°C	260°C	180°C	220°C	220°C	220°C	260°C	260°C	180°C	220°C	220°C	260°C
Exponencial	175,8	199,5	176,1	148,1	138,6	189,0	174,0	137,7	123,1	119,3	137,2	185,1	143,4	119,4
Gamma	178,3	192,7	178,7	141,2	123,1	190,0	178,3	124,9	110,4	101,2	125,3	186,1	143,9	113,3
Gumbel	182,8	194,5	186,8	144,9	125,8	189,1	184,1	132,1	115,1	101,1	126,6	187,6	154,9	120,4
Lognormal	177,3	193,0	178,3	140,9	122,9	191,9	176,4	123,8	109,9	101,5	125,2	186,9	142,3	112,3
Normal	180,7	193,2	184,0	142,8	123,7	189,3	182,5	127,5	112	101,0	125,8	186,4	149,9	116,4
Weibull	177,4	192,5	178,8	141,9	123,9	189,1	177,1	127,4	111,9	100,7	125,5	184,9	144,7	114,7

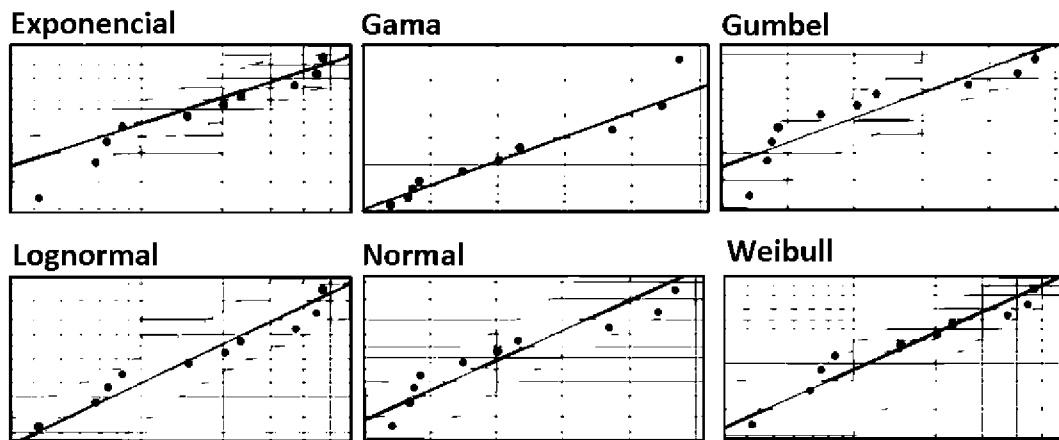
FONTE: A autora (2021).

De acordo com os valores de AICc, o modelo lognormal se ajustou aos resultados para sete condições de teste. Depois tem-se o modelo exponencial para quatro condições e Weibull para três condições de teste. Isto pode ter ocorrido porque os modelos probabilísticos lognormal e Weibull não tem um formato definido e podem assumir um formato que melhor se ajuste aos dados experimentais, de acordo com os parâmetros definidos. Logo, estas distribuições possuem um papel muito importante dentro do campo de análise estatística de dados experimentais e a sua grande adaptabilidade tem sido aproveitada para aplicação em diversos campos de estudo (ALLAN; BILLINTON, 1992, p. 187). Em relação ao modelo exponencial, este é muito utilizado quando se assume um caráter aleatório na ocorrência de falha e para os ensaios realizados isto pode ser aceito. Os autores GRZYBOWSKI *et al* (2004), BOCEK *et al* (2005), QIANG *et al* (2008), KAIJIANG *et al* (2009), CUI; WU; CAO E LUO (2009), KOLTUNOWICZ *et al* (2010) também utilizaram distribuições de probabilidade para ajustar os dados experimentais resultantes de teste de vida.

Na FIGURA 17 tem-se um exemplo para comparação do comportamento gráfico dos modelos probabilísticos para a condição de teste com frequência de chaveamento de 1,25 kHz, tensão de 750 V e envelhecimento térmico de 180 °C. Estes gráficos foram gerados para todas as condições de teste, apenas com o objetivo de visualizar as curvas das distribuições em relação aos dados resultantes dos ensaios.

Assim, após a determinação do modelo de probabilístico que melhor se ajustou aos dados resultantes do ensaio de degradação, o mesmo foi utilizado para cálculo do valor esperado (esperança) e desvio padrão. Isto foi realizado para identificar um único valor para ser comparado com a saída do modelo *fuzzy* proposto: o valor esperado para o tempo de vida do fio esmaltado.

FIGURA 17 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS PROBABILÍSTICOS PARA A CONDIÇÃO DE
1,25 kHz – 750 V – 180 °C



FONTE: A autora (2021).

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO FUZZY PROPOSTO

Na TABELA 5 são apresentados os valores esperados e desvio padrão resultantes dos ensaios para cada condição pré-determinada. Para todas as condições de teste, o grupo de resultados dos ensaios apresentou grande variabilidade, mesmo assim o valor esperado foi escolhido para representar este grupo. Também foram apresentados os valores de tempo de vida (em horas) estimados pelo modelo proposto e foi calculado o erro relativo da seguinte maneira:

$$ErroRelativo = \left| \frac{(x_m - x_e)}{x_e} \right| \times 100 \quad (18)$$

sendo:

x_m : valor do tempo de vida estimado pelo modelo proposto

x_e : valor esperado do tempo de vida resultante do ensaio

TABELA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO ENSAIO E MODELO PROPOSTO

	1,25 kHz				2,5 kHz						5 kHz			
	750 V	600 V	700 V	650 V	750 V	600 V	700 V	750 V	650 V	750 V	750 V	600 V	700 V	650 V
	180°C	220°C	220°C	260°C	180°C	220°C	220°C	220°C	260°C	260°C	180°C	220°C	220°C	260°C
CONDIÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Valor Esperado	35,39	130,6	36,08	8,86	6,1	68,56	32,44	5,26	2,54	2,29	5,16	57,22	6,89	2,10
Vida <i>Fuzzy</i> (estimativa)	31,3	106	31,4	9,32	5,53	67,2	29,8	5,64	2,61	2,5	5,62	66,4	5,88	2,19
Erro relativo	11%	19%	13%	5%	10%	2%	8%	7%	3%	9%	9%	16%	15%	4%
Desvio Padrão	35,39	46,6	36,08	4,01	1,49	67,2	32,44	1,58	0,79	0,47	1,72	57,22	5,3	0,96

FONTE: A autora (2021).

O modelo proposto foi validado, pois apresentou um erro relativo médio de 10%, aproximadamente. Para as condições de teste 1, 2 e 3 que apresentaram erro relativo acima de 10% foram com frequência de chaveamento baixa, sendo menos preocupantes nas situações práticas. A condição de teste 13 apresentou erro relativo maior que 10% porém, a estimativa realizada pelo modelo proposto ficou abaixo do resultado do ensaio, isto reflete em margem de segurança para o projeto. O erro relativo maior que 10% da condição de teste 12, não é negativo porque para esta condição ensaiada a tensão é baixa e envelhecimento térmico médio. Finalmente, considera-se que, as condições de teste com frequência de chaveamento média (5 até 10), acontecem com mais periodicidade em aplicações e, para estas condições, o erro relativo médio foi de 6,5%.

Também foi calculado o p-valor para testar a significância estatística das correlações estimadas, para as três variáveis de entrada, os p-valores ficaram abaixo de 0,05 que indicam correlações estatisticamente significativas, no nível de confiança de 95,0%, com a variável de saída para o tempo de vida.

5.3 TEMPO DE VIDA ESTIMADO PELO MODELO PROPOSTO

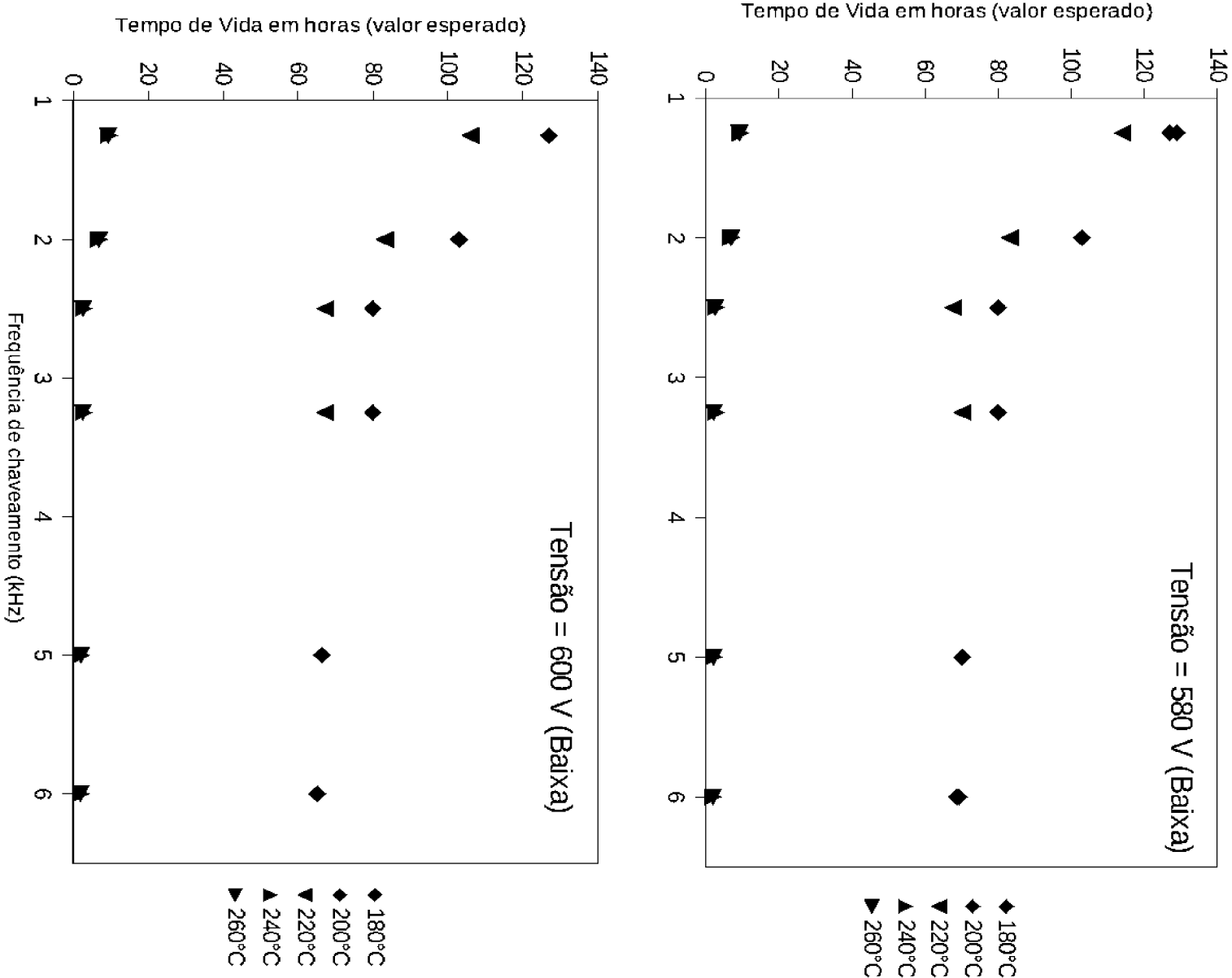
Foram geradas 180 saídas, utilizando o modelo proposto, cruzando os seguintes valores para as variáveis de entrada: frequência de chaveamento (FC) de 1,25 kHz e 2 kHz (Baixo); 2,5 kHz e 3,25 kHz (Médio); 5 kHz e 6 kHz (Alto); tensão de 580 V e 600 V (Baixo); 650 V e 725 V (Médio); 750 V e 760 V (Alto); envelhecimento térmico (ET): 180°C e 200°C (Baixo); 220°C (Médio); 240°C e 260°C (Alto). A partir destes valores, foram construídos gráficos para analisar as estimativas em relação aos diferentes valores para as três variáveis de entrada conjuntamente, lembrando que esta estimativa se refere ao valor esperado (em horas) do tempo de vida do fio esmaltado. Esta análise busca verificar se, o modelo proposto incorporou os principais resultados apresentados nos artigos do portfólio bibliográfico do Capítulo 3. E, deste ponto em diante, quando houver referência aos termos linguísticos de cada variável de entrada, apenas será utilizado Baixo (a), Médio (a) ou Alto (a). Por exemplo, quando for escrito tensão Baixa, refere-se ao intervalo numérico do termo linguístico Baixa da variável de entrada Tensão.

5.3.1 Perspectiva da tensão e envelhecimento térmico

Na tensão Baixa foi considerado que ainda não há ocorrência de descargas parciais provocadas pelos picos de tensão, ou seja, o intervalo de tensão Baixa foi definido para níveis abaixo do PDIV. Nos gráficos da FIGURA 18, foi possível observar que, com o aumento da frequência de chaveamento (FC) o tempo de vida diminui ou permanece inalterado para todos os valores simulados de envelhecimento térmico. Nota-se queda acentuada até 2,5 kHz e menos significativa após este valor, isto confirma as informações contidas na norma IEC 60034-25 (2014): se níveis de tensão forem considerados baixos, a frequência de chaveamento não interfere de maneira expressiva na degradação do isolamento. Assim, a redução do tempo de vida está relacionado com o envelhecimento térmico agravado na frequência de chaveamento Baixa, o que também foi demonstrado pelos autores Cui, Wu, Cao e Luo (2009) com a utilização da lei da potência inversa.

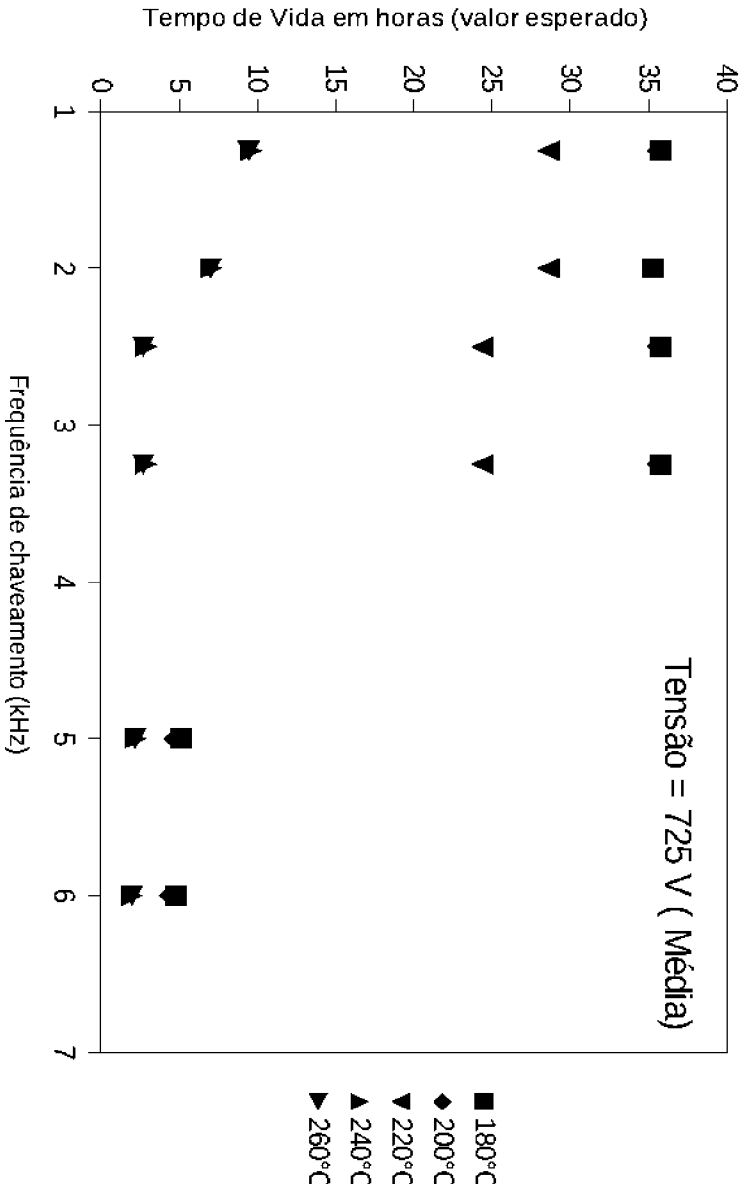
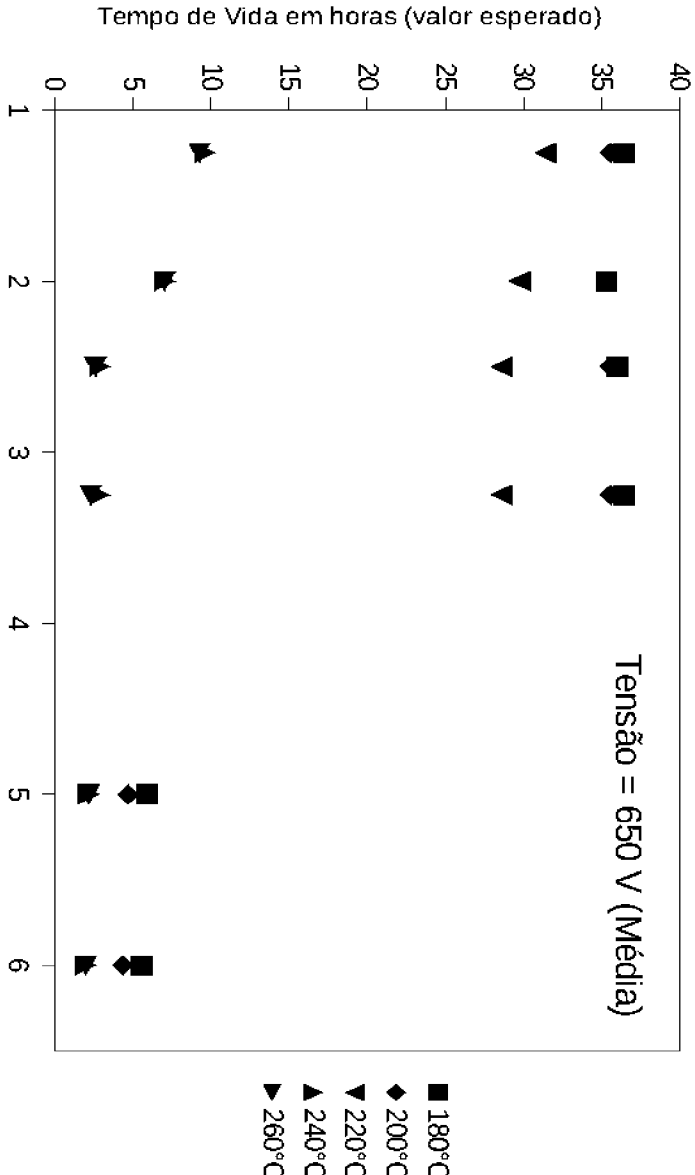
Foi definido que, na tensão Média, os valores estão acima do PDIV e a partir disto, a isolação do fio pode ser degradada devido à atividade de descarga parcial, ou seja, não é apenas o envelhecimento térmico que influencia a queda no tempo de vida estimado. Na FIGURA 19 observa-se que, para envelhecimento térmico Baixo e Médio, não ocorreram diferenças significativas no tempo de vida estimado para frequências de chaveamento Baixa e Média mas houve alteração acentuada quando a frequência de chaveamento é Alta. Estes resultados estão alinhados com a afirmação de YIN (1997, p. 22, tradução nossa), “nota-se que existe um ponto de transição em torno de 5 kHz, quando a frequência está acima deste ponto de transição, a taxa de degradação do fio aumenta. O número de ciclos de trabalho é quase constante quando a frequência de pulso está abaixo de 5 kHz, mas diminui acima de 5 kHz.” Para envelhecimento térmico Alto, em relação a frequência de chaveamento, o comportamento do tempo de vida estimado segue os mesmos padrões da tensão Baixa. Logo, para tensão Média, o envelhecimento térmico é a principal causa na redução do tempo de vida estimado apenas para frequência de chaveamento Alta.

FIGURA 18 – TEMPO DE VIDA PARA TENSÃO **BAIXA**



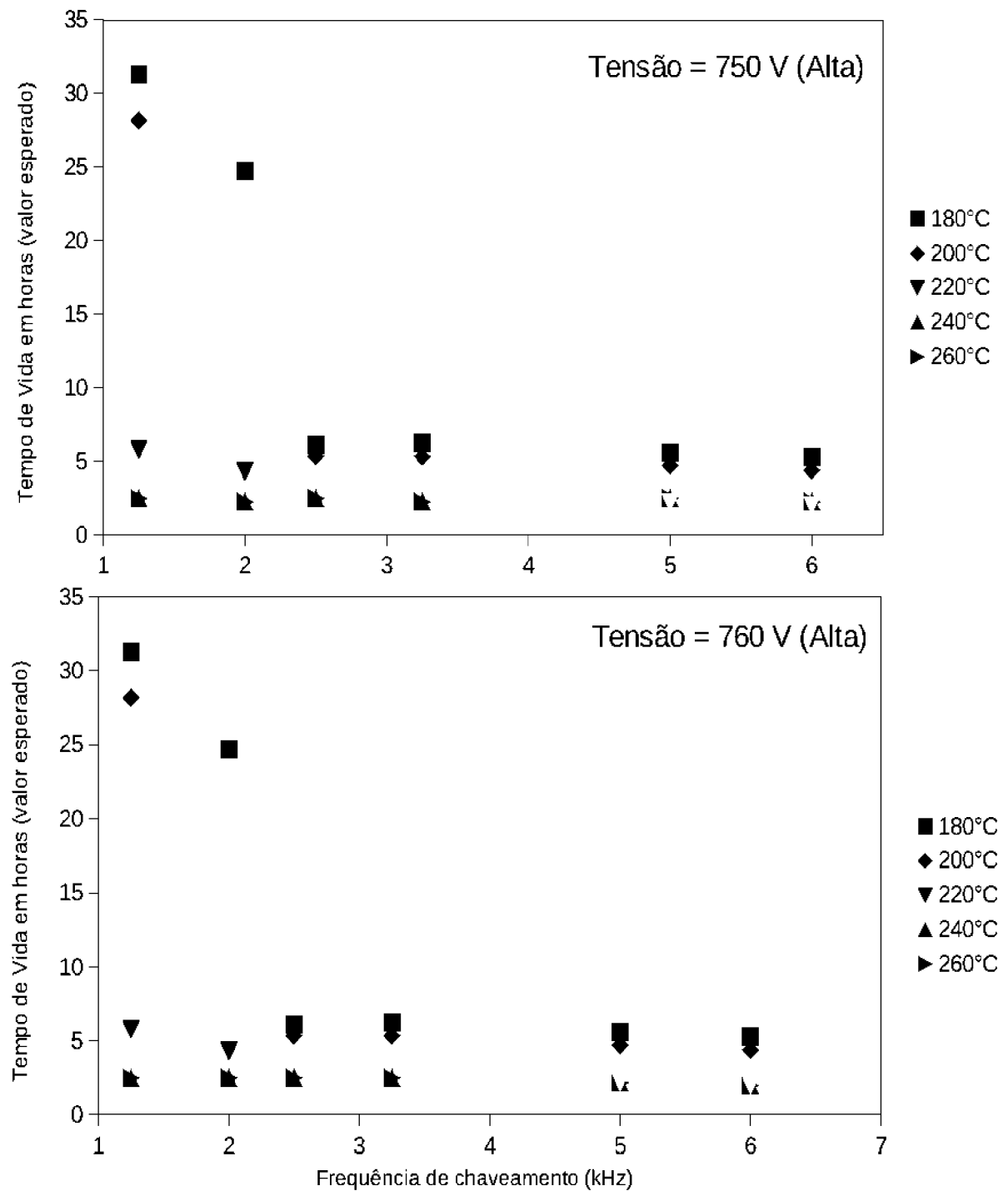
Fonte: A autora (2021).

FIGURA 19 – TEMPO DE VIDA PARA TENSÃO MÉDIA



Fonte: A autora (2021).

FIGURA 20 – TEMPO DE VIDA PARA TENSÃO ALTA



Fonte: A autora (2021).

Analisando os gráficos da FIGURA 20, para tensão Alta e envelhecimento térmico Baixo, ocorre redução acentuada nas estimativas do tempo de vida com frequência de chaveamento Média e Alta, isto não ocorreu nas tensões Baixa e Média. Além disso, para envelhecimento térmico Médio, o tempo de vida estimado

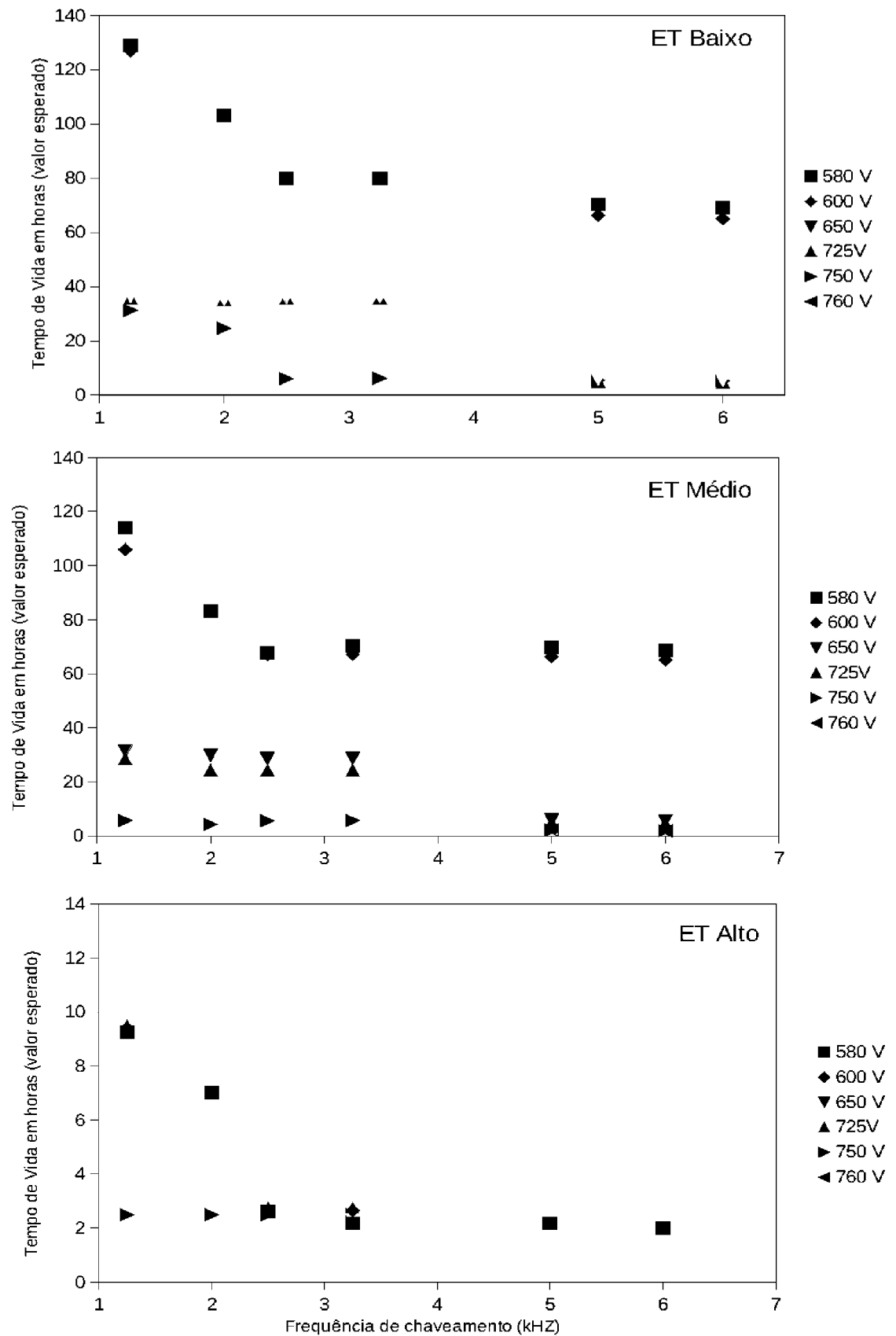
(valor já bem menor em relação as tensões Baixa e Média) foi reduzido pela metade com frequência de chaveamento Baixa e Média e acompanhou o comportamento do envelhecimento térmico Alto para frequência de chaveamento Alta. Quanto ao envelhecimento térmico Alto, manteve-se inalterado para todos os termos linguísticos da frequência de chaveamento.

O gráficos de dispersão foram escolhidos para apresentar as saídas do modelo *fuzzy* proposto devido sua facilidade de observação da tendência do comportamento assintótico dos dados, apesar de alguns valores sobrepostos.

Com o intuito de analisar os valores estimados para o tempo de vida do fio esmaltado comparando tensão e frequência de chaveamento, como os valores são os mesmos contidos nas FIGURAS 18, 19 e 20, foi apresentado na FIGURA 21 apenas um gráfico para cada termo linguístico do envelhecimento térmico (ET), considere que a escala do ET Alto é de 1:10. Quanto aos ET Baixo e Médio, a única diferença no comportamento dos valores ocorre nas frequências de chaveamento Baixa para tensão Alta. Observa-se grande redução no tempo de vida estimado, exceto para tensão Alta que já eram baixos mesmo com ET Baixo e Médio, para alguns valores a redução foi de 35 vezes. Para frequência de chaveamento e tensão Baixas a redução foi menor que para tensão Média e frequência de chaveamento Média. Isto torna os resultados do modelo proposto coerentes com os resultados do ensaio de degradação acelerada.

Como foi mencionado, a degradação da isolamento do fio esmaltado ocorre devido à exposição aos picos de tensão, provocados pela rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor (tempo de subida), bem como pela frequência com que estes picos são produzidos. No ensaio de degradação realizado, foram simulados alguns valores para estes picos de tensão e as respectivas frequências de chaveamento que acontecem em condições normais de uso dos motores elétricos porém, em relação ao envelhecimento térmico, foi necessário utilizar valores que representassem “estresse térmico acelerado” para que a falha na isolamento fosse induzida mais rapidamente, ou seja, apenas na dimensão da temperatura existe “aceleração” em relação às condições normais de uso.

FIGURA 21 – TEMPO DE VIDA PARA ENVELHECIMENTO TÉRMICO



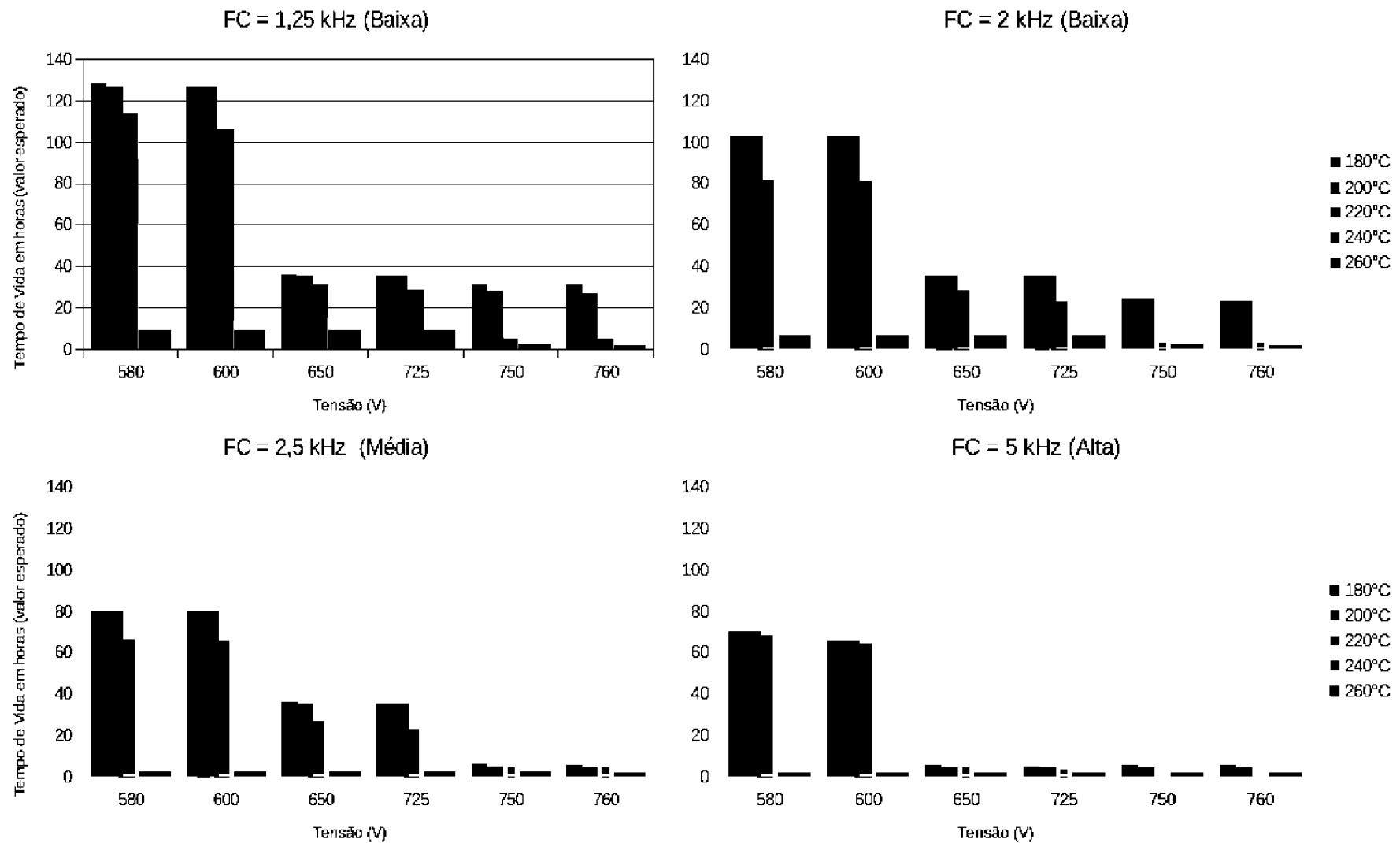
Fonte: A autora (2021).

5.3.2 Perspectiva da frequência de chaveamento

Nesta subseção, foram alterados os tipos de gráficos (de dispersão para colunas), para que possam ser observados todos os valores de saída estimados, sem sobreposição dos pontos. Ao analisar os gráficos das FIGURA 22 percebe-se que, quando tensão Baixa com ET Baixo e ET Médio, os tempos de vida são maiores, para todas as frequências de chaveamento. Quando a tensão é Média tem-se valores maiores quando FC Baixa/Média e ET Baixo/Médio em relação a tensão Alta. Comparando frequência de chaveamento Média com Alta, os valores na tensão Média diminuem e os valores na tensão Alta já estavam menores, para todos os termos linguísticos do envelhecimento térmico. Os gráficos da FIGURA 22 confirmaram as avaliações realizadas a partir dos gráficos das FIGURAS 18, 19 e 20.

De acordo com Rodrigues (2010, p. 18), “Pela lei de Arrhenius sabe-se que um aumento de 8 a 10 °C acima do limite da classe térmica de um isolante pode reduzir a metade a vida útil do isolamento”. Esta afirmação foi incorporada ao modelo, principalmente quando ET Alto para todos os termos linguísticos de FC e de tensão. Para ET Médio ocorre quando tensão é Alta e Média para FC Alta e quando FC Média apenas na tensão Alta.

FIGURA 22 – TEMPO DE VIDA PARA FREQUÊNCIAS DE CHAVEAMENTO



Fonte: A autora (2021).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Mais de um século depois da invenção, o motor elétrico de baixa tensão segue presente em todas as indústrias e residências em aplicações de velocidade constante e variável. Existem desafios quanto a avaliação e melhoria do desempenho sob PWM e seu enorme potencial de aplicação. Neste trabalho, foi utilizado o sistema de inferência *fuzzy* para desenvolver um modelo que quantifica o tempo de vida da isolação do fio esmaltado pois, quando se considera a utilização do inversor de frequência, a falha entre condutores adjacentes do enrolamento do estator (entre espiras) foi apontada como a causa mais provável devido à distribuição não uniforme de tensão ao longo dos enrolamentos do estator, associada aos curtos tempos de subida dos pulsos de tensão incidentes.

A identificação dos fatores que influenciam no tempo de vida, ocorreu através do estudo de diversos artigos que foram resumidos no Capítulo 3. Entendeu-se que o envelhecimento térmico e a ocorrência de picos elevados de tensão, provocados pela rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor (tempo de subida) e frequência com que estes picos são produzidos, gera descargas parciais entre condutores que causam a degradação da isolação. A partir disto, definiu-se a realização do ensaio de TGA para conhecer as curvas de degradação térmica dos vernizes utilizados na isolação e o ensaio para determinação do PDIV, sendo que os resultados permitiram o levantamento de informações sobre os fatores considerados para construção do sistema de inferência *fuzzy* e entendeu-se ser necessário coordenar os conhecimentos dos especialistas parceiros para avaliação dos resultados.

A nova abordagem proposta se justifica porque a utilização do sistema de inferência *fuzzy* incorpora interpretações mais robustas no que diz respeito às incertezas e possui capacidade de mapear as características do problema estudado na etapa de inferência. Quando ocorre falha, os especialistas são capazes de investigar para indicar as possíveis causas e quais condições que a isolação dos motores estava submetida. Este conhecimento permite a utilização de um sistema de inferência *fuzzy*. No caso do modelo proposto, a sobreposição de conjuntos difusos associados, o estudo das normas técnicas e a experiência dos engenheiros envolvidos, bem como a interpretação dos dados resultantes de ensaios, permitiram

representar o fenômeno estudado e estimar com erro relativo médio de 10% em relação aos dados experimentais, sendo apresentados erros relativos menores para os casos extremos que geram estresse térmico e elétrico.

Entendeu-se que o método de inferência de Mamdani obteve uma melhor aproximação em relação aos dados experimentais devido sua funcionalidade na formação de regras lógicas para os antecedentes e também para os consequentes, mapeados através de conjuntos *fuzzy* e adequando-se para o problema de pesquisa. Com método de inferência definido, foram realizadas diversas abordagens alterando os tipos de funções de pertinência (triangular, trapezoidal, gaussiana, forma de sino e forma de Z) tanto para os termos linguísticos das variáveis de entrada quanto para os da variável de saída. O modelo proposto apresentado no Capítulo 4 foi o que obteve melhor aproximação com os dados resultantes dos ensaios de degradação acelerada. Observou-se também que, mesmo não existindo um ponto de ápice para os valores de tensão, FC e ET, que é uma característica da função de pertinência triangular, esta função mostrou-se mais adequada, principalmente devido sua simplicidade e possibilidade de ajuste pontual para os intervalos para os termos linguísticos das variáveis de entrada e saída.

A elaboração do modelo deste trabalho, buscou incorporar os efeitos do estresse elétrico e térmico, bem como uma implementação simplificada que pode ser compreendida e justificada de forma intuitiva, incentivando o uso do modelo proposto para outros tipos de fios, com as devidas adaptações. Geralmente, as estimativas realizadas atualmente, definem o tempo de vida apenas pela sua classe térmica e isto não define as capacidades de resistência elétrica dos materiais utilizados. A capacidade de prever o tempo de vida da isolamento é essencial tanto para o fabricante do fio quanto para o fabricante do motor, gerando preocupação em algumas áreas de aplicação e as contramedidas (segurança excessiva no projeto) geram alto custo e podem ser desnecessárias.

Apesar de os efeitos dos picos elevados de tensão na degradação do sistema isolante dos motores elétricos ser verificado e analisado há pouco mais de 30 anos, as literaturas sobre o assunto se resumem a diversos artigos com contradições nas interpretações, pois cada um define as características aplicadas nas análises e utiliza um fio específico porém, mesmo os fios de diferentes fabricantes sendo enquadrados no mesmo tipo especificado na norma, eles podem

se comportar de diferentes maneiras em uma mesma aplicação, dificultando a comparação dos resultados do modelo proposto com os resultados apresentados na literatura. Com isto, foi necessário desenvolver um ensaio de degradação acelerada, baseado em normas e sugestão da literatura, que poderia ser generalizado para outros tipos de fios e utilizado na validação dos resultados do modelo proposto. Para implementação do ensaio foi construído e testado um novo dispositivo (*hipot*) que possibilitou a variação dos níveis de frequência de chaveamento de tensão.

O reconhecimento de que os custos de fabricação podem ser reduzidos eliminando o conservadorismo de design desnecessário, junto com o mercado global muito competitivo para motores elétricos, justificou o desenvolvimento da metodologia desenvolvida no presente trabalho. Os resultados obtidos foram bastante promissores e servirão como referência para incentivar investimentos na continuidade destas pesquisas buscando aprofundar o estudo dos efeitos sinérgicos da temperatura, tempo de subida, tensão e frequência de chaveamento, fornecendo informações sobre o tempo de vida da isolação, ao testar o fio sob uma série de conjuntos de diversas condições.

Assim, a principal contribuição da tese, caracterizada pela proposta de um modelo que considera fatores particularmente relevantes na estimativa do tempo de vida da isolação do fio esmaltado, foi efetivada sendo que a metodologia adotada para a validação deste modelo poderá ser estendida para diferentes tipos de fio. Além disso, uma das vantagens da metodologia aqui proposta é a padronização para quantificação do tempo de vida, a qual se encontra no fato do modelo descrever o efeito do envelhecimento por meio de variáveis previamente estabelecidas, proporcionando o entendimento das estimativas por meio do conhecimento das variáveis estudadas. Isto fornecerá subsídios para desenvolver novas tecnologias de esmaltes utilizados nos fios e na impregnação de motores e, testar comparativamente a qualidade de fios esmaltados disponíveis atualmente no mercado.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a continuação dos ensaios para completar as 12 regras que não foram validadas e comparar com os resultados alcançados com o modelo proposto.

Para ampliar o escopo de estudo, podem ser realizados ensaios com outros tipos de fios e avaliar a metodologia proposta para quantificação do tempo de vida.

O modelo proposto é um bom interpolador em relação as saídas para o tempo de vida quando comparado aos resultados dos ensaios de degradação acelerada porém, como trabalho futuro, sugere-se desenvolver um estudo que extrapole os resultados para determinação do tempo de vida do fio esmaltado quando sujeito as condições normais de uso dos motores elétricos. Isto pode ser realizado estudando os fatores de aceleração em relação a validação do modelo e um aprofundamento dos efeitos ocorridos quando se altera os intervalos numéricos das variáveis recomendadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1641-16**: Standard Test Method for Decomposition kinetics by thermogravimetry using the Ozawa/Flynn/Wall Method. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1877-17**: Standard practice for calculating thermal endurance of materials from thermogravimetric decomposition data. Conshohocken: ASTM International, 2017.

ARORA, T. G.; AWARE, M. V.; TUTAKNE, D. R.. Fuzzy Logic-based Electrothermal Life Model for Inverter-fed Induction Motor Insulation. **Electric Power Components And Systems**, [S.L.], v. 43, n. 3, p. 298-308, 3 jan. 2015. UK Limited. DOI. 10.1080/15325008.2014.978050.

ARORA, T. G.; AWARE, M. V.. Life Model for PWM Controlled Induction Motor Insulation using Design of Experiments Method. **Electric Power Components And Systems**, [S.L.], v. 47, n. 1-2, p. 153-163, 20 jan. 2019. Informa UK Limited. DOI. 10.1080/15325008.2019.1566843.

ASSOCIATION FOR INSTRUMENTATION, CONTROL, AUTOMATION (GAMBICA); ROTATING ELECTRICAL MACHINES ASSOCIATION (REMA). **Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation**. Technical Report. 4 ed. Londres, 2016.

BONNETT, A.H. A comparison between insulation systems available for PWM-inverter-fed motors. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 1331-1341, 1997. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/28.633814.

BOCEK, V.; KUCEROVA, E.; MENTLIK, V.; SEBIK, P.; TRNKA, P. Reliability of the adjustable speed drives in power electronic waveform environment. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), Nashville, TN, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2010. p. 241-244.

CALLE, M. G. La de; MARTINEZ-TARIFA, J. M.; SOLANILLA, A. M. G.; ROBLES, G. Uncertainty Sources in the Estimation of the Partial Discharge Inception Voltage in Turn-to-Turn Insulation Systems. **IEEE Access**, [S.L.], v. 8, p. 157510-157519, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/access.2020.3018870.

CARRASCO, F. The evaluation of kinetic parameters from thermogravimetric data: comparison between established methods and the general analytical equation. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 213, p. 115-134, jan. 1993. Elsevier BV. DOI. 10.1016/0040-6031(93)80010-8.

CAVALLINI, A.; FABIANI, D.; MONTANARI, G.C. Power electronics and electrical insulation systems - part 2: life modeling for insulation design. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 33-39, jul. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/mei.2010.5511187.

CAVALLINI, A.; MONTANARI, G.C.; FABIANI, D.; TOZZI, M. The influence of PWM voltage waveforms on induction motor insulation systems: Perspectives for the end user. In: IEEE SYMPOSIUM ON DIAGNOSTICS FOR ELECTRICAL MACHINES, POWER ELECTRONICS & DRIVES, 8., Bologna, Italy. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2011. p. 288–293.

CAVALLINI, A. Reliability of low voltage inverter-fed motors: What have we learned, perspectives, open points. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATING MATERIALS (ISEIM), 2017, Toyohashi, Japan. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2017. p. 13–22.

CUI, Y.; WU, G.; CAO, K.; LUO, Y. Life models of polyimide film under combined thermal and electrical stresses used in inverter-fed traction motor. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, Cancún, México. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2011. p. 80–83.

CULBERT, I. Experience with partial discharge testing during voltage surges as required by IEC 60034-18-41 and 60034-18-42. In: CONFERENCE RECORD OF 2009 ANNUAL PULP AND PAPER INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 2009, Birmingham, AL, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2009. p. 156–160.

DIVLJAKOVIC, V.; KLINE, J.; BARTA, D.; FLORYAN, D. Aging of magnetic wire in the presence of variable frequency, high rise time and high voltage pulses. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), 1994, Arlington, TX, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 1994. p. 391–399.

EBRAHIMI-KAHRIZSANGI, R.; ABBASI, M.H. Evaluation of reliability of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA. **Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 217–221, fev. 2008. Elsevier BV. DOI. 10.1016/s1003-6326(08)60039-4.

ESCOBAR, Luis A.; MEEKER, WILLIAM Q. A Review of Accelerated Test Models. **Statistical Science**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 552–577, 1 nov. 2006. Institute of Mathematical Statistics. DOI. 10.1214/088342306000000321.

ESPINO-CORTES, F.P.; ZAMORANO, P.G.; ROSARIO, A.R. Effect of voltage distortion on stress grading coatings working at high fundamental frequency. In: ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE AND ELECTRICAL MANUFACTURING EXPO, Nashville, TN, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2007. p. 159–163.

FENGER, M.; CAMPBELL, S.R.; PEDERSEN, J. Motor winding problems: caused by inverter drives. **IEEE Industry Applications Magazine**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 22–31, jul. 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/mia.2003.1206913.

FLORKOWSKI, B.; FLORKOWSKA, M.; ZYDRON, P. The influence of PWM stresses on degradation processes in electrical insulation systems. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTIC PHENOMENA, West Lafayette, IN, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2010. p. 1–4.

FLORKOWSKI, B.; ZYDRON, P.; FLORKOWSKA, M. Effects of inverter pulses on the electrical insulation system of motors. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Gdansk, Poland. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2011. p. 573–578.

FLORKOWSKA, B. Experimental evaluation of breakdown voltage and life time for models of the low voltage electrical motors windings. **Przegląd Elektrotechniczny**, [S.L.], v. 1, n. 10, p. 23-27, 5 out. 2016. DOI. 10.15199/48.2016.10.05.

FLORKOWSKI, M.; FLORKOWSKA, B.; ZYDRON, P. Partial Discharges in Insulating Systems of Low Voltage Electric Motors Fed by Power Electronics—Twisted-Pair Samples Evaluation. **Energies**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 768, 26 fev. 2019. MDPI AG. DOI. 10.3390/en12050768.

GAO, B.; WU, G.N.; HE, J.Y.; LEI, K.G. Investigation on aging mechanism of winding insulation used in inverter-fed traction motors. In: ANNUAL REPORT—CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, Vancouver, Canadá. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2007. p. 107–111.

GAO, B.; WU, G.; ZHOU, L.; CAO, K.; LUO, Y. Research on aging characteristics of twisted pair based on dielectric loss under high frequency pulse voltage. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, 9., 2009, Harbin, China. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2009. p. 392–395.

GJERDE, A.C.. Multifactor ageing models - origin and similarities. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 6-13, jan. 1997. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/57.567392.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy e Aplicações. In: INTERNATIONAL FUZZY SYSTEMS ASSOCIATION WORLD CONGRESS, 6., São Paulo, SP, Brasil. **Proceedings...** São Paulo: INPE, 1995. vol. 59. p. 1-38.

GRUPO WEG. Unidade Motores. **Novo Padrão de rendimento dos Motores Elétricos – Portaria IR3**. Jaraguá do Sul, 2020. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7f/h0e/WEG-novo-padrao-rendimento-motores-eletricos-IR3.pdf>> Acesso em: 01 de set 2020.

GRZYBOWSKI, S.; BANDARU, S.; KOTA, N.; KING, C.F. Lifetime characteristics of magnet wires under pulse voltage [wire insulation multistress effects]. In: ANNUAL MEETING OF THE IEEE LASERS AND ELECTRO-OPTICS SOCIETY, 17., 2004, Boulder, CO, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2004. p. 145–148.

GUEDES, A. S. **Estudo e proposição de técnicas para a avaliação do isolamento em motores de indução trifásicos de baixa e média tensão**. 2018. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

HAYAKAWA, N.; OKUBO, H.. Partial discharge characteristics of inverter-fed motor coil samples under ac and surge voltage conditions. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 5-10, jan. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/mei.2005.1389265.

HAYAKAWA, N.; MORIKAWA, M.; OKUBO, H. Partial discharge inception and propagation characteristics of magnet wire for inverter-fed motor under surge voltage application. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 39-45, fev. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2007.302870.

HAYAKAWA, Naoki; INANO, Hiroshi; NAKAMURA, Yusuke; OKUBO, Hitoshi. Time variation of partial discharge activity leading to breakdown of magnet wire under repetitive surge voltage application. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 1701-1706, dez. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2008.4712674.

HAYAKAWA, N.; SHIMIZU, F.; OKUBO, H. Estimation of partial discharge inception voltage of magnet wires under inverter surge voltage by volume-time theory. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 550-557, abr. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2012.6180249.

HE, J.; WU, G.; GAO, B.; WU, J. Study on aging characteristics for inverter-fed traction Motor inter-turn insulation based on analysis of dielectric characteristic parameters. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, Vancouver, Canadá. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2007. p. 81–84.

HÖPNER, V. N.; WILHELM, V. E. Insulation Life Span of Low-Voltage Electric Motors – A Survey. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 1738, 21 mar. 2021. MDPI AG. DOI. 10.3390/en14061738.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60085**: Electrical insulation – Thermal evaluation and designation. Genebra, 2007.

HURVICH, C. M.; TSAI, C.-L. Regression and time series model selection in small samples. **Biometrika**, [S.L.], v. 76, n. 2, p. 297-307, 1989. Oxford University Press (OUP). DOI. 10.1093/biomet/76.2.297.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60851-5**: Winding wires, test methods – electrical properties. Genebra, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60317-0**: Specifications for particular types of winding wires, general requirements – enamelled round copper wire. Genebra, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60034-18-41:** Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – qualification and quality control tests. Genebra, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60034-25:** AC electrical machines used in power drive systems – application guide. Genebra, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60034-18-42:** Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters. Genebra, 2017.

KAIJIANG, C.; GUANGNING, W.; LIREN, Z.; XIAOXIA, G.; KEGANG, L.; BO, G. Insulation life-span models for electrical and thermal aging under continuous high square impulses voltage. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, 9., Harbin, China. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2009. p. 285–288.

KARAVASILIS, R. G. **Estudo de Motores Acionados por Conversores de Frequência e Influências no Sistema Isolante.** 2008. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

KAUFHOLD, M.; BORNER, G.; EBERHARDT, M.; SPECK, J. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 9-16, set. 1996. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/57.537190.

KAUFHOLD, M.; ANINGER, H.; BERTH, M.; SPECK, J.; EBERHARDT, M. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, [S.L.], v. 47, n. 2, p. 396-402, abr. 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/41.836355.

KIMURA, K.; USHIRONE, S.; KOYANAGI, T.; HIKITA, M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 744-750, jun. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2007.369539.

KOLTUNOWICZ, T. L.; BAJRACHARYA, G.; DJAIRAM, D.; SMIT, J. J. Exploring the feasibility of an aging model for paper insulation based on the repetition frequency of transients. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, San Diego, CA, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2010. pp. 1–5.

LAHOUD, N.; FAUCHER, J.; MALEC, D.; MAUSSION, P. Electrical Aging of the Insulation of Low-Voltage Machines: model definition and test with the design of experiments. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, [S.L.], v. 60, n. 9, p. 4147-4155, set. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tie.2013.2245615.

LAHOUD, N.; NGUYEN, M. Q.; MAUSSION, P.; MALEC, D.; MARY, D. Lifetime model of the inverter-fed motors secondary insulation by using a design of experiments. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 3170-3176, dez. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2015.005202.

LI, Zhuo; MOON, Kyoung-Sik; YAO, Yagang; HANSEN, Kristen; WATKINS, Kenneth; MORATO, Liliane; WONG, C.P. Carbon nanotube/polymer nanocomposites: sensing the thermal aging conditions of electrical insulation components. **Carbon**, [S.L.], v. 65, p. 71-79, dez. 2013. Elsevier BV. DOI. 10.1016/j.carbon.2013.07.105.

MAUSSION, P.; PICOT, A.; CHABERT, M.; MALEC, D. Lifespan and aging modeling methods for insulation systems in electrical machines: A survey. In: IEEE WORKSHOP ON ELECTRICAL MACHINES DESIGN, CONTROL AND DIAGNOSIS (WEMDCD), 2015, Turin, Italy. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2015. p. 279–288.

MAZZANTI, G.. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 1168-1179, ago. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2009.5211872.

MELFI, M.; SUNG, A.M.J.; BELL, S.; SKIBINSKI, G.L.. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 766-775, 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/28.703971.

MELFI, M.J.. Low-Voltage PWM inverter-fed motor insulation issues. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 42, n. 1, p. 128-133, jan. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tia.2005.861308.

MELKEBEEK, J. A. **Electrical Machines and Drives**. Cham, Switzerland: Springer, 2018.

MONTANARI, G.C. Characterizing insulation systems of rotating machines controlled by power electronics: The role of partial discharges. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS (ICPADM), 11., 2015, Sydney, Australia. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2009. p. 15–21.

MONTANARI, G.C.; HEBNER, R.; SERI, P.; GHOSH, R. Noise rejection and partial discharge identification in PDIV tests of insulated wires under repetitive impulse supply voltage. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC), Calgary, Canadá. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2019. p. 505–508.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. São Paulo: Editora Artliber, 2009.

QIANG, Y.; GUANGNING, W.; QIAN, P.; BING, A.; CHANGHONG, H.; MINGLI, D. Research on electrical aging lifetime model of insulation material under high voltage square impulses for inverter-fed motors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS, Beijing, China. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2008. p. 259–263.

REID, M. **Reliability**. Manual de utilização. 2021. Disponível em: <<https://reliability.readthedocs.io/en/latest>> Acesso em: 05 maio 2021.

RODRIGUES, A. L. M. **Estudo comparativo de sistemas de isolação em motores MT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

STONE, G.C.. The statistics of aging models and practical reality. **IEEE Transactions On Electrical Insulation**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 716-728, 1993. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/14.237738.

STONE, G.C.; CULBERT, I.M.; LLOYD, B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives. In: IEEE CEMENT INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE RECORD, Charleston, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2007. pp. 187–192.

STONE, G.C.; CULBERT, I. Partial discharge testing of random wound stators during short risetime voltage surges. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, Montreal, Canadá. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2009. p. 188–191.

STONE, G.C.; CULBERT, I. Review of stator insulation problems in medium voltage motors fed from voltage source PWM drives. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATING MATERIALS, 2014, Niigata, Japan. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2014. p. 50–53.

STONE, G. C.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H. **Electrical Insulation for Rotating Machines**: design, evaluation, aging, testing, and repair. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2014.

SZCZEPANSKI, M.; MALEC, D.; MAUSSION, P.; PETITGAS, B.; MANFÉ, P. Prediction of the lifespan of enameled wires used in low voltage inverter-fed motors by using the Design of Experiments (DoE). In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, 2017, Cincinnati, OH, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2017. p. 1–6.

SZCZEPANSKI, M.; MALEC, D.; MAUSSION, P.; PETITGAS, B.; MANFÉ, P. Use of Design of Experiments (DoE) predictive models as a method of comparison of enameled wires used in low voltage inverter-fed motors. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, 2018, Portland, OR, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2018. p. 1–8.

SZCZEPANSKI, M.; MALEC, D.; MAUSSION, P.; MANFE, P. Design of Experiments Predictive Models as a Tool for Lifespan Prediction and Comparison for Enameled Wires Used in Low-Voltage Inverter-Fed Motors. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 56, n. 3, p. 3100-3113, maio 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tia.2020.2970855.

TAKINO, T.; MURAKAMI, Y.; HOZUMI, N.; NAGAO, M. Evaluation of partial discharge under inverter surge application using current waveform. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2010, West Lafayette, IN, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2014. p. 1–4.

VARNIER, C. A. C. **Avaliação de fio circular esmaltado submetido à tensão pulsada retangular**. 2016. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2016.

WALPOLE, R.E. et al. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

WANG, P.; WANG, J.; XU, H.; ZHOU, K.; LEI, Y.; ZHOU, Q. Comparative study of PD characteristics for inverter-fed motor insulation under sinusoidal and repetitive square wave voltage conditions. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION (ICHVE), Chengdu, China. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2016a. p. 1–4.

WANG, P.; XU, H.; WANG, J.; CAVALLINI, A.; MONTANARI, G.C. Temperature effects on PD statistics and endurance of inverter-fed motor insulation under repetitive square wave voltages. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC), Montreal, Canadá. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2016b. 2016b. p. 202–205.

WANG, P.; XU, H.; WANG, J.; CAVALLINI, A.; MONTANARI, G.C. The effects of asymmetry repetitive square wave voltages on PD statistics and endurance. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRICS (ICD), Montpellier, France. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2016c. p. 693–696.

WANG, P.; XU, H.; WANG, J.; CAVALLINI, A. The influence of repetitive square wave voltage duty cycle on partial discharge statistics and insulation endurance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS (CMD), Xian, China. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2016d. p. 274–277.

WANG, P.; XU, H.; WANG, J.; ZHOU, W.; CAVALLINI, A. The influence of repetitive square wave voltage rise time on partial discharge inception voltage. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), Toronto, ON, Canadá. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2016e. p. 759–762.

WANG, P.; XU, H.; WANG, J.; WANG, W.; CAVALLINI, A. Effect of repetitive impulsive voltage duty cycle on partial discharge features and insulation endurance of enameled wires for inverter-fed low voltage machines. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 2123-2131, 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2017.006268.

WANG, P.; ZHENG, C.; LI, Y.; LI, Y.; CAVALLINI, A. The PD and Endurance Features of Enameled Wires at Short Repetitive Impulsive Voltages. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC), San Antonio, TX, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2018a. p. 572–576.

WANG, P.; ZHENG, C.; LI, Y.; LI, Y. Effect of repetitive impulsive and square wave voltage frequency on partial discharge features. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS (ICPADM), 12., Xian, China. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2018b. p. 152–155.

WANG, P.; ZHAO, M.; ZHOU, Q.; ZHANG, J. The Influence of SPWM Frequency on the Endurance of Inverter-fed Motor Insulation. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), Richland, USA. **Proceedings...** [S.L.]: IEEE, 2019. p. 142–145.

WEG S.A. **Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM**. Guia técnico. Jaraguá do Sul, 2016. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>> Acesso em: 15 de julho 2019.

WHEELER, J.C.G.. Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 22-29, mar. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/mei.2005.1412216.

WU, G.; WU, J.; ZHOU, L.; GAO, B.; ZHOU, K.; GUO, X.; CAO, K.. Microscopic view of aging mechanism of polyimide film under pulse voltage in presence of partial discharge. **IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 125-132, fev. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tdei.2010.5412010.

YIN, Weijun. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 18-23, nov. 1997. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/57.637150.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. **IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics**, [S.L.], v. -3, n. 1, p. 28-44, 1973. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI. 10.1109/tsmc.1973.5408575.

APÊNDICE 1 – METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DO FIO ESMALTADO UTILIZADO EM ESTADORES DE MOTORES ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

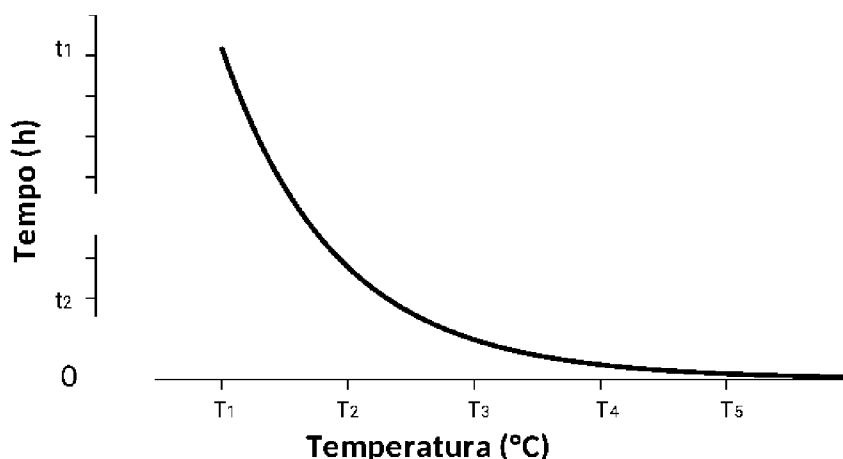
No presente trabalho foi apresentado um sistema de inferência *fuzzy* para quantificar o tempo de vida do fio esmaltado utilizado em estadores de motores elétricos alimentados por inversor de frequência. Conforme o tipo de esmalte utilizado na isolação do fio, a velocidade de degradação pode ser variar. Assim, propõe-se uma metodologia para geração de novos valores para as variáveis de entrada e saída do sistema *fuzzy*, adaptando o modelo proposto para diferentes tipos de isolação do fio.

1) DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA:

a) Envelhecimento térmico

Passo 1 – Realizar o ensaio TGA e determinar os parâmetros cinéticos para gerar o gráfico de tempo de degradação versus temperatura com para perda mássica fixada em 10% (ver abaixo).

Gráfico A.1 – TEMPO DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA COM PERDA MÁSSICA DE 10%



Fonte: A autora (2021).

Passo 2 – definir as funções de pertinência, sendo $f(x)$ o grau de pertinência e x a temperatura de envelhecimento térmico que o fio foi submetido, utilizando os valores do GRÁFICO A.1.

- Baixo (tempo de degradação acima de t_1 horas):

$$f(x) = \frac{T_1 - x}{T_1 - 160} \quad \text{quando } 160 \leq x \leq T_1$$

T_1 deve ser maior que 200°C , senão deve-se usar 200°C , que é o valor definido para a resistência da isolação do fio utilizado em estatores de motores alimentados por inversor de frequência;

- Médio (tempo de degradação entre t_1 e t_2 horas):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-200}{T_1-200} & \text{se } 200 \leq x < T_1 \\ \frac{T_2-x}{T_2-T_1} & \text{se } T_1 \leq x \leq T_2 \end{cases}$$

- Alto (tempo de degradação abaixo de t_2 horas):

$$f(x) = \frac{x - (T_2 - 10)}{280 - (T_2 - 10)} \quad \text{se } (T_2 - 10) \leq x \leq 280$$

b) Tensão

Passo 1 – Realizar ensaios que indiquem os valores de PDIV com pares torcidos dos fios esmaltados que se deseja estimar o tempo de vida. As orientações para os procedimentos de condução dos ensaios seguem as diretrizes das Normas IEC 60270 (2015) e IEC 60034-18-42 (2017). Calcular a média x_{med} dos valores de PDIV e utilizar para definir o termo linguístico “Baixa”, sendo $f(x)$ a função para calcular os graus de pertinência e x a tensão que recai sobre o fio.

$$\bullet \text{ Baixa: } f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq x_{min} \\ \frac{x_{med} - x}{x_{med} - x_{min}} & \text{se } x_{min} < x \leq x_{med} \end{cases}$$

sendo x_{min} o menor valor de PDIV encontrado.

Passo 2 – Para os termos linguísticos “Médio” e “Alto”, obter as funções $f(x)$ para cálculo dos graus de pertinência, sendo x a tensão que recai sobre o fio, considerando os valores U_{f1} e U_{f2} resultantes das fórmulas:

$$U_{f1} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot V_r \cdot \frac{U}{U_j} \quad \text{e} \quad U_{f2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_r \cdot \frac{U}{U_j}$$

sendo:

U_{f1} e U_{f2} : tensão que recai sobre o isolamento do fio (V)

V_r : tensão da rede (entrada)

$\frac{U}{U_j}$: fração da tensão de pulso que estressa o isolamento e depende do

tempo de subida (*rise time*) considerado. Pode ser obtido no GRÁFICO 2.

- Média:
$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - U_{f1}}{\frac{U_{f1} + U_{f2}}{2} - U_{f1}} & \text{se } U_{f1} \leq x < \frac{U_{f1} + U_{f2}}{2} \\ \frac{U_{f2} - x}{U_{f2} - \frac{U_{f1} + U_{f2}}{2}} & \text{se } \frac{U_{f1} + U_{f2}}{2} \leq x \leq U_{f2} \end{cases}$$

- Alta:
$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - (U_{f2} - 20)}{40} & \text{se } (U_{f2} - 20) < x < (U_{f2} + 20) \\ 1, & \text{se } x \geq (U_{f2} + 20) \end{cases}$$

c) Frequência de chaveamento

Para a frequência de chaveamento, não será realizada nenhuma generalização dos valores, adotando-se as mesmas funções de pertinência para os respectivos termos linguísticos apresentadas na subseção 4.2.1.3.

2) DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL DE SAÍDA:

Como variável de saída, divide-se os tempos de vida da isolação do fio em cinco termos linguísticos no intervalo de 0 até $t_{\max}=150$ horas. O valor de $t_{\max}$ é resultante de ensaios de tempo de vida (sem a fonte chaveada) apenas utilizando tensão senoidal para as condições de teste com tensão baixa e envelhecimento térmico baixo. Sendo x o tempo de vida em horas e $f(x)$ a função que calcula o respectivo grau de pertinência:

- Muito Baixa:
$$f(x) = \frac{\frac{1}{20} \cdot t_{\max} - x}{\frac{1}{20} \cdot t_{\max}} \quad \text{quando } 0 \leq x < \frac{1}{20} \cdot t_{\max}$$

- Baixa: $f(x) = \begin{cases} \frac{x - \frac{1}{30} \cdot t_{max}}{\frac{1}{20} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{1}{30} \cdot t_{max} < x < \frac{1}{20} \cdot t_{max} \\ \frac{\frac{1}{10} \cdot t_{max} - x}{\frac{1}{30} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{1}{20} \cdot t_{max} \leq x < \frac{1}{10} \cdot t_{max} \end{cases}$
- Média: $f(x) = \begin{cases} \frac{x - \frac{1}{15} \cdot t_{max}}{\frac{1}{5} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{1}{15} \cdot t_{max} \leq x < \frac{4}{15} \cdot t_{max} \\ \frac{\frac{2}{5} \cdot t_{max} - x}{\frac{2}{15} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{4}{15} \cdot t_{max} \leq x < \frac{2}{15} \cdot t_{max} \end{cases}$
- Alta: $f(x) = \begin{cases} \frac{x - \frac{1}{3} \cdot t_{max}}{\frac{1}{5} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{1}{3} \cdot t_{max} \leq x < \frac{8}{15} \cdot t_{max} \\ \frac{\frac{3}{4} \cdot t_{max} - x}{\frac{1}{10} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{8}{15} \cdot t_{max} \leq x < \frac{3}{4} \cdot t_{max} \end{cases}$
- Muito Alta: $f(x) = \begin{cases} \frac{x - \frac{2}{3} \cdot t_{max}}{\frac{1}{12} \cdot t_{max}} & \text{se } \frac{2}{3} \cdot t_{max} \leq x < \frac{3}{4} \cdot t_{max} \\ 1, & \text{se } x \geq \frac{3}{4} \cdot t_{max} \end{cases}$

3) BASE DE REGRAS, INFERÊNCIA E DEFUZZIFICAÇÃO

Estas etapas para implementação do sistema de inferência *fuzzy*, devem ser as mesmas propostas nas subseções 4.2.2 e 4.2.3.