

Modelo eletrotérmico para determinação da durabilidade do enrolamento de motores elétricos alimentados com tensão PWM

Vanessa Neves Höpner (Universidade Federal do Paraná) vanessa.hopner@ifc.edu.br

Volmir Eugênio Wilhelm (Universidade Federal do Paraná) volmirw@gmail.com

Resumo: A grande demanda de energia elétrica para a alimentação de motores elétricos; a necessidade crescente de obtenção de equipamentos ambientalmente amigáveis, com foco no aumento da eficiência; a acentuada evolução da eletrônica de potência aliado ao decréscimo dos custos destes equipamentos fomentaram a utilização de inversores de frequência no controle da rotação destes motores. Porém, as formas de onda geradas tornam-se não sinusoidais, ocasionando um aumento da tensão e da temperatura. Isto resulta em envelhecimento acelerado do isolamento e prematura falha. Nestas condições, os modelos para tempo de vida para materiais isolantes tornam-se complexos e ambíguos. Esta pesquisa apresenta a aplicação da *Lógica Fuzzy* para desenvolver um modelo eletrotérmico que determina um percentual de vida do isolamento do fio, sendo de 100% quando não sofreu nenhum estresse no seu isolamento, resultante dos valores simulados para Tensão (em Vrms), Frequência de Chaveamento (em kHz) e Envelhecimento Térmico (em °C) e 0% quando o fio não preserva nenhuma de suas propriedades, pois o isolamento sofreu deterioração em decorrência dos efeitos gerados pelos valores simulados. A calibração dos intervalos e seleção das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* de entrada e saída foi realizada a partir dos conhecimentos técnicos e práticos fornecidos pelos especialistas, Engenheiros Químico e Eletricista, do departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica (P&IT) da empresa WEG S.A. que atuam na área do problema de pesquisa. Bem como, de avaliação das normas e guias técnicos que tratam do tema. Experimentos estão sendo conduzidos para validação do Modelo.

Palavras chave: Inversor de frequência, *Lógica Fuzzy*, Fio esmaltado, Modelo de Vida.

Electrothermal model for determining the durability of the winding of PWM powered electric motors

Abstract: The high demand for electric power for the supply of electric motors; the growing need for environmentally friendly equipment, focusing on increasing efficiency; The sharp evolution of the power electronics coupled with the decrease of the costs of these equipments promoted the use of frequency inverters to control the rotation of these motors. However, the generated waveforms become non-sinusoidal, causing an increase in voltage and temperature. This results in accelerated insulation aging and premature failure. Under these conditions, lifetime models for insulating materials become complex and ambiguous. This research presents the application of Fuzzy Logic to develop an electrothermal model that determines a percentage of wire insulation life, being 100% when there was no stress on its insulation, resulting from the simulated values for Voltage (in Vrms), Switching (in kHz) and Thermal Aging (in °C) and 0% when the wire does not preserve any of its properties, as the insulation has deteriorated due to the effects generated by the simulated values. The calibration of the intervals and the selection of the fuzzy functions of the input and output fuzzy sets was performed based on the technical and practical knowledge provided by the experts, chemical and electrical engineers, from the Research and Technological Innovation (P&IT) department of the company WEG S.A. work in the area of the research problem. As well as, evaluation of the standards and technical guides dealing with the topic. Experiments are being conducted to validate the model.

Keywords: Frequency inverter, Fuzzy logic, Enameled wire, Life Model.

1. Introdução

A utilização de conversores estáticos de frequência compreende o método mais eficiente e atrativo em termos de custo para controlar a rotação dos motores elétricos. Estes conversores, também chamados de inversores de frequência, transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em tensões de amplitude e frequências variáveis que alteram a velocidade do campo girante e, conseqüentemente, a velocidade de rotação da máquina. Os acionamentos eletrônicos de velocidade variável são empregados em aplicações industriais e alguns equipamentos residenciais também os incorporam, como máquinas de lavar e secadoras de roupas, condicionadores de ar e refrigeradores. O controle da rotação também se faz presente no mercado em expansão da tração elétrica que, impulsiona a redução dos resíduos poluentes, utiliza energia de fonte renovável e apresenta mais eficiência energética. As aplicações dos acionamentos eletrônicos estão se tornando cada vez maiores, o que resulta em maior exigência por parte dos fabricantes de inversores e de máquinas elétricas, bem como uma compreensão maior dos elementos que compõem este sistema.

Os conversores com Modulação por Largura de Pulso (ou *Pulse Width Modulation – PWM*), empregados para a alimentação de motores elétricos de baixa tensão, operam 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 impulsos de tensão com tempos de subida extremamente curtos. Dependendo das características de controle (resistores de gate, capacitores, tensões de comando, etc.) e da modulação PWM adotada, estes impulsos em combinação com as impedâncias do cabo e do motor, podem gerar sobretensões nos terminais do motor, reduzindo a vida do motor pela degradação mais acelerada do seu sistema de isolamento.

Quando se considera aspectos tais como custos de fabricação, manutenção e tempo de vida, o sistema de isolamento do motor elétrico torna-se um dos mais importantes componentes das máquinas elétricas girantes. Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil do isolamento do enrolamento do estator, que é afetada por muitos fatores, tais como: umidade, vibrações, ambientes corrosivos, estresse térmico, estresse mecânico, entre outros.

A característica da tensão aplicada aos terminais de um motor elétrico, acionado através de inversor de frequência, é determinada por um universo de fatores que combinados entre si ou, agindo de maneira independente, poderão provocar o envelhecimento acelerado do sistema de isolamento levando o mesmo a falha prematura. Fatores como, a linha de tensão onde o inversor de frequência está operando; a arquitetura e o regime de controle do inversor, a presença de filtros entre o conversor e o motor, comprimento e características do cabo entre o conversor o motor, projeto do enrolamento do motor e sistema de aterramento, poderão ser listados como variáveis que podem impactar diretamente na integridade do sistema de isolamento do motor elétrico (KARAVASILIS, 2008, p.14).

Analisando a afirmação acima, entende-se que a determinação da vida de um motor elétrico, quando o mesmo é acionado por um inversor de frequência, necessita do entendimento dos fenômenos que afetam o sistema de isolamento. Para contribuir foi selecionada a Lógica *Fuzzy*, que busca resolver problemas que possuem um volume considerável de informações essenciais analisadas a partir de conhecimentos técnicos sobre os resultados de testes experimentais e práticas cotidianas em sistemas produtivos. A

modelagem baseada nesta ferramenta, trata do relacionamento entre entradas e saídas, agregando vários parâmetros de processo e de controle. Isto permite a consideração de procedimentos complexos, proporcionando resultados mais acurados, juntamente com simplicidade de implementação, reduzindo as dificuldades de um projeto e transformando problemas anteriormente intratáveis em solúveis.

Os autores Arora e Aware (2019) usaram a Lógica *Fuzzy* para desenvolver um modelo que relaciona o logaritmo da vida útil do isolamento (em porcentagem da vida sob condição de tensão de entrada senoidal) com o logaritmo de três parâmetros de tensão: fator de magnitude de pico, fator de frequência de pico e fator de harmônicos de tensão. Os valores de entrada do Modelo foram calculados experimentalmente sob PWM. Para validar o modelo, um teste de envelhecimento acelerado foi realizado no filme de isolamento com as mesmas voltagens PWM, o modelo ficou bem ajustado aos resultados obtidos com o teste de envelhecimento acelerado. Neste ponto, entende-se deveria ser melhorada a validação do Modelo proposto, pois o mesmo foi elaborado a partir a análise de dados do motor completo e sua validação foi baseada apenas em dados resultantes do ensaio realizado com um componente do sistema de isolamento, o filme.

Além disso, também no trabalho citado, os dados do Modelo *Fuzzy* foram processados e analisados através de técnicas estatísticas, tais como ANOVA, gráfico Normal e gráfico de Pareto Padronizado. O gráfico normal dos efeitos padronizados mostrou que todos os três parâmetros de tensão estão no lado esquerdo e, portanto, têm efeito negativo significativo na vida útil do isolamento. Possivelmente, ainda com a intenção de validar o modelo *Fuzzy*, foi usado o método *Design of Experiments* (DoE) para obter uma equação de primeira ordem para a vida útil, em termos de parâmetros de tensão vinculados aos resultados do teste de envelhecimento acelerado. Segue-se desta equação que o efeito da magnitude do pico de tensão é o mais predominante, seguido pelo efeito da frequência de pico e dos harmônicos de tensão, respectivamente, no envelhecimento do isolamento. Os autores afirmam que o modelo de vida proposto pode ser usado diretamente para a estimativa de vida do isolamento de motores de indução controlados por acionamentos de velocidade ajustáveis PWM e medidas podem ser tomadas antes da mão para evitar as perdas de tempo de inatividade devido a falha do motor nas indústrias. Concluiu-se também que a possibilidade de síntese de técnicas de inteligência artificial como lógica *Fuzzy*, rede neural, algoritmos genéticos e combinação destes podem ser exploradas como métodos estatísticos na área de estimativa de vida, diagnóstico de falhas, probabilidade de falhas e avaliação de confiabilidade em aplicações na indústria. Cabe ressaltar que, o artigo descrito neste parágrafo, incrementa outro artigo dos mesmos autores escrito no ano de 2015. As ideias identificadas nos dois artigos unidas com a intenção de aprimorar os resultados apresentados também motivaram o desenvolvimento do modelo desta pesquisa.

Análises de normas técnicas e guias de especificação citados nas referências indicam que o isolamento do enrolamento da bobina do motor elétrico experimenta estresses maiores relacionados a variação da tensão, da frequência e da temperatura quando o motor é alimentado por um inversor de frequência. Este isolamento é usado para separar eletricamente o fio de cobre do corpo do rotor aterrado e assume muitas formas e formatos devido à natureza altamente distribuída do enrolamento do rotor, a necessidade de permitir o movimento devido à expansão e a geometria do forjamento do rotor.

Diante desse cenário, devido à complexidade na determinação das causas dos estresses térmico e elétrico, foram simuladas diversas condições para as variáveis selecionadas. A partir disto, este trabalho, apresenta um Modelo *Fuzzy* que quantifica, através de porcentagens, o tempo de vida do fio esmaltado tipo ANSI MW 35 (de acordo com NEMA MW 1000). Este fio recebe duas camadas de isolamento, vernizes a base de poliéster-imida e poliamida-imida, sendo muito utilizado em aplicações com diversas bitolas, classes térmicas e nos mais variados tipos de máquinas.

2. Material e Métodos

Neste trabalho, quanto à estrutura, foi dada ênfase as máquinas com rotor de gaiola de esquilo randômicas, nas quais o enrolamento consiste de barras condutoras conectadas ao ferro do rotor, que são curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores e as voltas do fio de seção redonda estão enroladas aleatoriamente no processo de formação da bobina. Quanto ao funcionamento, são abordados os motores de indução. O que caracteriza um motor de indução é que somente o estator é ligado à rede de alimentação, o rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam nele são induzidas eletromagneticamente pelo estator.

O desenvolvimento do motor de indução de gaiola de esquilo, com seu sistema de isolamento associado, geralmente utiliza alimentação senoidal. Os requisitos para motores com suprimentos padrão são estabelecidos internacionalmente na série de padrões IEC 60034. Eles abrangem aspectos de desempenho, características de partida, classificações térmicas, proteção mecânica, segurança, nível de isolamento por teste dielétrico etc. Os avanços na qualidade dos vernizes usados nos sistemas de isolamento de motores melhoraram consideravelmente as características térmicas, mecânicas e dielétricas dessas normas e, em geral, o motor de indução padrão é capaz de suportar as formas de onda de tensão encontradas na maioria dos inversores. A vida útil do isolamento do motor é geralmente definida apenas pela sua classe térmica porém, isto não define as capacidades de resistência elétrica dos materiais utilizados. Segundo o Guia Técnico das instituições britânicas GAMBICA e REMA (2016), existem três possibilidades sugeridas para danos no isolamento:

- a) Quebra entre a bobina e o núcleo do estator: normalmente não é um problema pois, são usados reforços adicionais dos revestimentos e fechamentos das ranhuras;
- b) Falha fase a fase: normalmente não é um problema pois, os motores usam barreiras entre fases e separadores de ranhuras;
- c) Falha entre condutores adjacentes do enrolamento do estator: a causa mais provável de falha devido à distribuição não uniforme de tensão ao longo dos enrolamentos do estator, associada aos curtos tempos de subida dos pulsos de tensão incidentes. Dependendo da qualidade/homogeneidade do sistema de impregnação, o material impregnante pode conter bolhas de ar (vazios), nas quais se desenvolve o mecanismo de falha do isolamento entre espiras.

A deterioração do isolamento do motor devido aos *overshoots* de tensão ocorre por meio de Descargas Parciais (DP), fenômeno complexo decorrente do efeito Corona. Entre condutores energizados adjacentes existe uma diferença de potencial relativa, que resulta em um campo elétrico. Se for estabelecido um campo elétrico suficientemente alto (mas abaixo da tensão de ruptura do material isolante), a rigidez dielétrica do ar pode ser rompida, ou seja,

se houver energia suficiente, o oxigênio (O_2) é ionizado em ozônio (O_3). O ozônio é altamente agressivo e ataca os componentes orgânicos do sistema isolante, deteriorando-os. Para que isso ocorra, o potencial nos condutores precisa exceder um valor limiar denominado CIV (Corona Inception Voltage), que é a rigidez dielétrica do ar existente dentro da bolha. O CIV depende do projeto do enrolamento, tipo de isolamento, temperatura, características superficiais e umidade. Portanto, as descargas parciais são descargas de baixa energia que, se atuam continuamente, degradam prematuramente o isolamento do motor. A erosão resulta na diminuição da espessura do material isolante, acarretando progressivas perdas de propriedades dielétricas, até que a tensão de ruptura atinja um nível abaixo do nível de pico da tensão aplicada, ocasionando então a falha do isolamento.

Neste contexto, o Modelo baseado em Lógica *Fuzzy* que será proposto busca simular as interações entre os fatores citados, quantificando o tempo de vida do isolamento do fio utilizado em motores elétricos de baixa tensão, construídos com bobinas randômicas, para aplicações de uso geral. A seleção desta ferramenta para elaboração do Modelo foi baseada na concepção de que grandezas (temperatura, tensão, velocidade, etc.) admitem graus de pertinências, que visam ajustar os entendimentos técnicos, práticos ou o senso comum. Desta forma, a lógica *Fuzzy* pode ser considerada como um agrupamento de princípios matemáticos para a representação do conhecimento baseado em graus de pertinência que variam no intervalo $[0,1]$, quando 0 significa que um elemento não pertence a um determinado conjunto e quando 1 significa completa pertinência ao conjunto e valores entre 0 e 1 representam graus parciais de pertinências que são calculados com a atribuição de funções de pertinência, dependendo do problema a ser modelado. Logo, a classificação dos elementos de um dado universo é menos rígida do que aqueles utilizados na teoria clássica.

O processo de implementação da Lógica *Fuzzy* (ou sistema baseado em regras *fuzzy*) é desenvolvido basicamente em três etapas:

a) 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, sendo que as mais utilizadas são: triângulos, trapézios, funções exponenciais e logarítmicas, função normal, entre outras.

b) Inferência *Fuzzy*: é um procedimento lógico de um sistema *Fuzzy*, no qual, são definidas os conjuntos de regras que definem os passos seguintes à que o processo será submetido. 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 Mandani e Método de Takagi-Sugeno;

c) 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 da malha de controle. São eles: defuzzificação por centro-de-área, centro-do-máximo e média-do-máximo. Lembrando que todo o processamento feito é com base em variáveis linguísticas e funções de pertinência, com determinados graus de pertinência para as variáveis defuzzificadas.

Devido as suas funcionalidades o software MATLAB foi escolhido como plataforma para conduzir as simulações necessárias para implementação do modelo deste projeto. O mesmo

disponibiliza a toolbox *fuzzy*, uma interface específica que permite a edição da estrutura e dos parâmetros para o desenvolvimento do sistema baseado em regras *fuzzy*.

3. O Modelo FUZZY-FIO

Foi desenvolvido um Modelo, baseado em Lógica *Fuzzy*, que quantifica o tempo de vida do o fio esmaltado tipo ANSI MW 35 quando submetido a níveis de estresse conhecidos/impostos, através de porcentagens relativas ao tempo de vida considerado “normal” para o mesmo. Este fio recebe duas camadas de isolamento que são vernizes a base de poliéster-imida e poliamida-imida que possuem desempenho comprovado em aplicações em diversas bitolas, classes térmicas e nos mais variados tipos de máquinas.

Após a defuzzificação pelo método de Centro-de-área (centróide), determina-se um percentual de vida para o isolamento do fio, sendo de 100% quando não sofreu nenhum estresse no seu isolamento, resultante dos valores simulados para Tensão (em Vrms), Frequência de Chaveamento (em kHz) e Envelhecimento Térmico (em °C) e 0% para o fio que não preserva nenhuma de suas propriedades, pois o isolamento sofreu deterioração em decorrência dos efeitos gerados pelos valores simulados.

Para construção do Modelo, a calibração dos intervalos e seleção das funções que determinam os graus de pertinência dos conjuntos *fuzzy* de entrada e saída é uma etapa muito importante. Isto foi realizado baseado na prática profissional e conhecimentos técnicos fornecidos pelos especialistas, um engenheiro químico e um engenheiro electricista, do departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica (P&IT) da empresa catarinense WEG S.A., que atuam na área do problema de pesquisa. Além de normas avaliação das normas e guias técnicos que tratam do tema. Na sequência são apresentadas os critérios adotados para cada conjunto.

3.1 Envelhecimento Térmico

O envelhecimento térmico é um efeito da temperatura sob processos químicos e físicos. Ou seja, ocorrendo exposição em temperaturas acima do limite de suas respectivas classes térmicas (descritas posteriormente), pode-se verificar perda de integridade física, que fica caracterizada pela craquelação do material isolante. Conforme WEG S.A. (2016), o envelhecimento térmico do enrolamento confere vulnerabilidade ao sistema de isolamento quanto a outros fatores que podem causar curto-circuito entre espiras, como o estresse mecânico e ambiental.

Para direcionar a seleção dos intervalos das temperaturas que podem influenciar o envelhecimento térmico dos polímeros em questão foram estudados artigos, normas e realizado o ensaio de TGA (*Thermogravimetric analysis*) no laboratório do departamento de Química da Universidade Federal do Paraná. Descreve-se a seguir os fundamentos para a construção do conjunto *fuzzy* Envelhecimento Térmico, determinando os intervalos térmicos apropriados para os termos linguísticos: Baixo, Médio e Alto. Quanto às funções que geraram os graus de pertinência, foram selecionadas relações lineares (trapezoidal e triangular) devido sua simplicidade.

Nos intervalos do termo linguístico Baixo, foram utilizadas as classes de isolamento elétrico, conforme NBR-7034 que 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 (conforme projeto) de operação durante a sua vida útil.

Para o termo linguístico Médio, inicia-se com classe F devido a continuidade da ocorrência de diversas temperaturas as quais o material pode ser submetido, seguida da temperatura da classe H. Há uma orientação interna da empresa WEG SA que, devido a resultados experimentais e por limite de segurança, entende-se que o fio tipo ANSI MW 35 mantém suas propriedades até 200°C, este também foi um valor escolhido como delimitador.

Nesta fase, foram considerados os dados resultantes do ensaio TGA que mede alterações de perda (geralmente muito pequenas) em um material em função da temperatura. As informações de decomposição do TGA podem ser usadas para prever a vida útil de polímeros. Uma amostra é aquecida a três ou mais taxas diferentes, quanto mais rápida a taxa de aquecimento aplicada, mais alta se torna a temperatura de decomposição. A saída de um ensaio TGA geralmente é um gráfico do percentual de peso da amostra versus temperatura. A temperatura de degradação de um material curado pode ser calculado em duas etapas. A primeira abordagem é a temperatura de degradação inicial (Onset). Esta temperatura é calculada com base na interseção da tangente ao ponto de inflexão da curva (mudança de máxima inclinação) de perda de massa com a tangente à linha de estabilidade térmica inicial. A segunda abordagem é a temperatura de perda de peso de 10%. Este cálculo é muito simples para sistemas não preenchidos. Nesse caso, é simplesmente a temperatura na qual o material perdeu 10% de sua massa inicial.

Os cálculos dos parâmetros cinéticos que foram utilizados para determinar a temperatura Onset e demais valores, cujos dados estão apresentados na Tabela 1 foram baseados nas Normas ASTM E1641 e ASTM E1877, sendo que a referência de Onset é o ensaio de TGA realizado de acordo com a Norma ASTM D.

| Carga residual (%) | Início de degradação (°C) | Limite da estabilidade (°C) | Perda de massa equivalente (%) | T de degradação em 12,5% | Taxa de aquecimento (C°/minuto) |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 24,7 | 380,6 | 230,6 | 9,4 | 388,2 | 5 |
| 19,1 | 390,5 | 240,5 | 10,1 | 402,5 | 10 |
| 23,8 | 391,1 | 241,1 | 9,5 | 402,2 | 20 |
| 23,0 | 396,2 | 246,2 | 9,7 | 407,2 | 30 |
| 25,7 | 382,9 | 232,9 | 9,3 | 395,1 | 40 |

Fonte: A autora (2019)

Tabela 1 – Resultados da Análise Térmica - Dados do TGA

Assim, a temperatura de 240°C é considerada o limite de estabilidade térmica, este valor refere-se a extremidade superior da janela de operação contínua que é calculada subtraindo 150°C do início da degradação.

Para o termo linguístico Alto, os valores determinados baseiam-se nas justificativas já citadas, sendo: 240°C (limite de estabilidade térmica com Onset menos 150°C, 298°C (10% perda de massa), 340°C (extremidade superior da janela de operação intermitente, calculada subtraindo 50°C da temperatura de degradação) e início de degradação térmica em 390°C.

3.2 Tensão

Os valores que compõe o conjunto *fuzzy* da Tensão representam o quanto da tensão que aparece nos terminais de alimentação do motor recai sobre o fio esmaltado selecionado, lembrando que considera-se utilização de inversor de frequência. Os fundamentos para a determinação destes valores surgiram de avaliações de especificações e determinações de

normas técnicas e da determinação experimental da PDIV (tensão de início de descarga parcial) de pares torcidos produzidos com os fios esmaltados examinados, em estudo conduzido pelo departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica (P&IT) da WEG SA. Os procedimentos para condução do ensaio foram baseados nas orientações da Norma IEC 60270 (2015). Também algumas diretrizes da norma IEC TS 60034-18-42 (2017) foram utilizadas para embasar este experimento.

A média aritmética, desvio padrão, valores máximo e mínimo das medições de 10 corpos de prova seguem descritos na Tabela 2 para três diferentes bitolas do fio ANSI MW 35.

| Parâmetros da Tensão (V _{rm}) | Bitolas | | |
|---|---------|--------|---------|
| | 0,5 mm | 0,8 mm | 1,32 mm |
| Mínima | 490 | 580 | 560 |
| Máxima | 580 | 650 | 640 |
| Média Aritmética | 535 | 617 | 617 |
| Desvio Padrão | 31,00 | 20,03 | 21,63 |

Fonte: A autora (2019)

Tabela 2 – Tensão de início de descarga parcial (PDVI)

De acordo com dados da Tabela 2 e os artigos analisados na revisão bibliográfica, pode-se considerar a tensão de início de descarga parcial (PDVI) no intervalo de 500 a 600 Vrms (tensão eficaz), conforme a bitola do fio. Este intervalo foi considerado a variável linguística Média do conjunto *fuzzy* Tensão. Cabe ressaltar que, quanto maior a bitola maior tende a ser a PDIV pois, por norma, o fio esmaltado possui uma camada maior de isolamento (revestimento).

Conforme descrito na norma IEC TS 60034-18-41 (2014), a experiência mostra que existem apenas algumas combinações de *overshoot* de tensão e *rise-time* que são necessárias, na prática, para satisfazer a maioria das aplicações. Na Tabela 3, retirada da referida Norma, são especificadas quatro categorias de estresse do motor (A-benigno, B-moderado, C-severo e D-extremo) que, mesmo de natureza parcialmente arbitrária, auxiliam na qualificação dos sistemas de isolamento para operação com inversor em classes de tensão semelhantes à qualificação do sistema de isolamento para as classes de temperatura (descritas anteriormente), onde ocorre aplicação em diversos níveis de tensão de entrada. Para o *rise time* apenas um valor padrão de 0,3 μ s foi especificado. 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 *rise time* foi gerado um gráfico que está disponível na Figura 7, página 18 da norma IEC TS 60034-18-41 (2014). Como nos interessa apenas o *rise time* de 0,3 μ s, tem-se que o valor correspondente de U/U_j é de 0,70.

| Categorias de estresse | Fator de <i>Overshoot</i> (OF) | Impulso <i>rise time</i> t _r μ s |
|------------------------|--------------------------------|--|
| | Up/U _a | |
| A – Benigno | OF \leq 1,1 | 0,3 |
| B – Moderado | 1,1 < OF \leq 1,5 | |
| C – Severo | 1,5 < OF \leq 2,0 | |
| D – Extremo | 2,0 < OF \leq 2,5 | |

Fonte: IEC TS 60034-18-41 (2014)

Tabela 3 – Categorias de estresse elétrico

Com base nas informações da Tabela 3, decidiu-se excluir a categoria de estresse D, foram considerados valores muito altos para as aplicações usuais do fio esmaltado avaliado. Quando o motor está em vazio ou com cargas leves, a tensão no link DC tende a estabilizar no valor aproximado de $1,42 \cdot V_{rede}$, conforme foi descrito na seção 2.3. Assim, para os limites dos intervalos de OF das categorias de estresse, temos uma aproximação para tensão que recai sobre o fio esmaltado dos enrolamentos de 414, 564, 752, respectivamente, considerando-se que no Brasil a tensão da rede (V_{rede}) adotada é de 380 V. Estes valores são considerados na determinação de intervalos coerentes para qualificar as variáveis linguísticas do conjunto *fuzzy* Tensão. As funções de pertinência escolhidas seguem as mesmas justificativas do conjunto *fuzzy* Envelhecimento Térmico.

3.3 Frequência de Chaveamento

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. Experiências realizadas nesse sentido (YIN, 1997) 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. Utilizou-se também algumas especificações da norma IEC TS 60034-2-3 (2013) para elaborar os intervalos do conjunto *fuzzy* Frequência Chaveamento.

3.4 Base de Regras

Neste componente são formuladas as relações possíveis entre os termos linguísticos, traduzidos por conjuntos *fuzzy*, que são utilizados para transcrever a base de conhecimentos por meio de uma coleção de regras, denominada base de regras *fuzzy*. Foi utilizado o método de inferência de Mamdani na geração do Modelo deste trabalho.

Foi disponibilizada no Anexo deste trabalho a Base de Regras definida, considerando os conjuntos *fuzzy* de entrada: Tensão (V_{rms}), Frequência de Chaveamento (FC - kHz) e Envelhecimento Térmico (EV - °C). A norma IEC TS 60034-2-3 (2013) indica que, se níveis de Tensão forem considerados baixos, a frequência de chaveamento não interfere de maneira significativa no isolamento. Porém, se os valores de tensão aumentam, qualquer alteração nos valores da frequência de chaveamento pode influenciar a qualidade do isolamento do fio. Também foi descrita no trabalho de Xi Liu et al (2006) a relação entre Tensão e Frequência de Chaveamento no aparecimento de descargas parciais e seus efeitos. Foram realizados cruzamentos destas afirmarmos, buscando definir suas relações com o Envelhecimento Térmico. Lembrando que, deseja-se definir a vida do isolamento pela sua classe térmica e também pela capacidade de resistência elétrica dos materiais utilizados. Este Modelo promove a avaliação, interligação e verificação de consequências dos entrelaçamentos propostos.

Os gráficos presentes na Figura 1 descrevem os conjuntos *fuzzy* de entrada com os respectivos intervalos dos termos linguísticos e funções de pertinência. Foi apresentado também o conjunto *fuzzy* de saída PercentualVida.

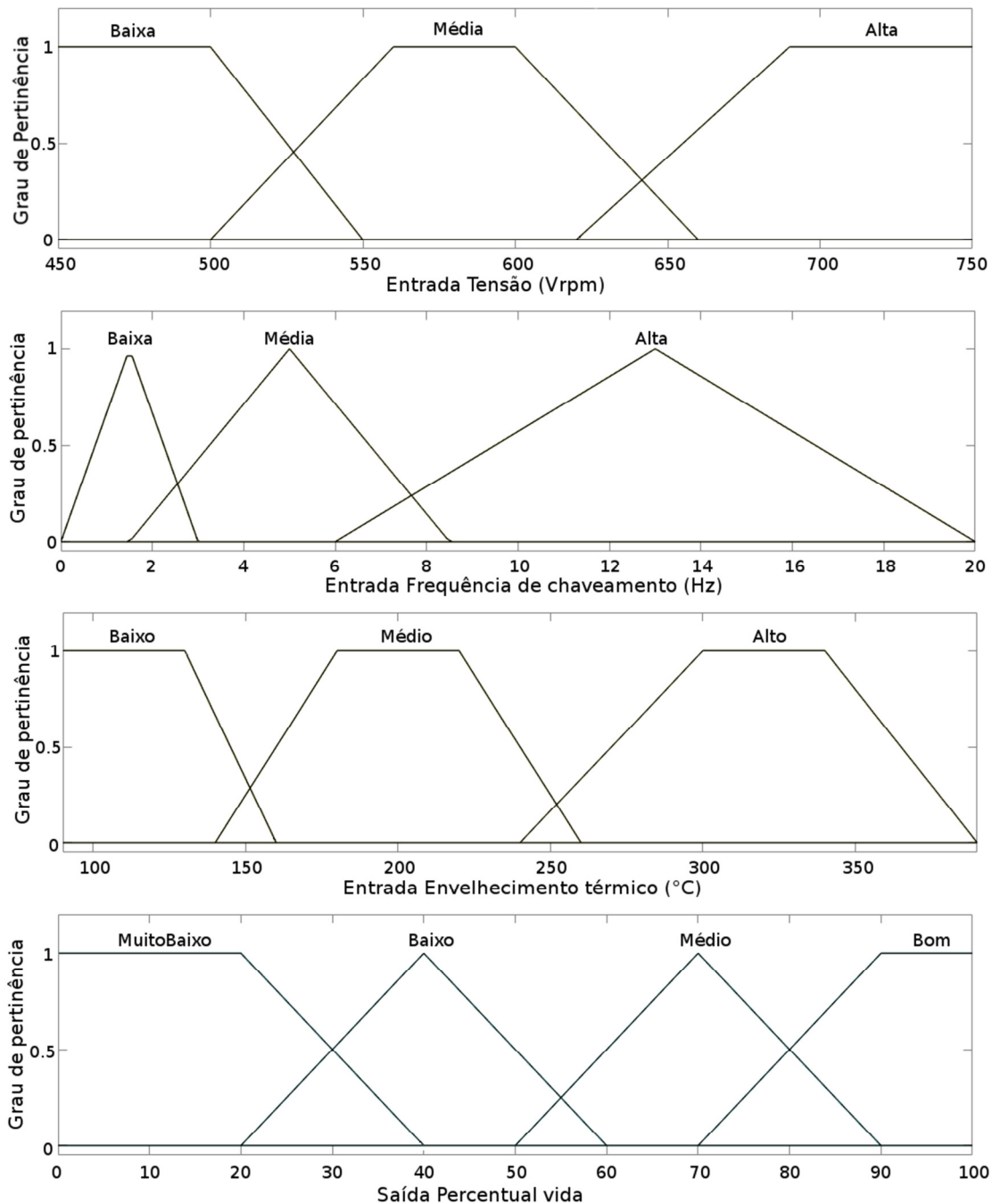


Figura 1 – Conjuntos *fuzzy* de entrada e saída do Modelo

4. Considerações Finais

O reconhecimento de que os custos de fabricação podem ser reduzidos eliminando o conservadorismo desnecessário do projeto, juntamente com o mercado global muito competitivo para motores e geradores, levou a mais métodos científicos que busquem avaliar a confiabilidade no projeto de sistemas de isolamento. Com o intuito de desenvolver um Modelo eficiente deve-se realizar a validação dos resultados. Para isto, além dos ensaios já realizados e de diversos dados experimentais que a empresa WEG S.A. possui e que ainda não foram avaliados, um novo ensaio está sendo desenvolvido: consiste em “envelhecer” termicamente 10 pares torcidos dos fios estudados, inicialmente com uma bitola específica, por 200 horas em uma estufa que regula a temperatura em um valor selecionado. Após,

serão impostas frequência (através de uma fonte chaveada) e tensão pré-determinadas. Gerando assim, o trio de entrada para medir o tempo até que cada par torcido apresente curto-circuito (falha). Ainda não foi determinado quantos “trios” serão gerados.

Cabe ressaltar que, o Modelo pode ser ajustado para se adaptar aos resultados experimentais, se necessário. Podem ser melhorados todos os elementos que compõe o: intervalos dos conjuntos *fuzzy* de entrada e saída, alteração nas funções de pertinência e/ou alteração na Base de Regras.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense (IFC) e parceria técnica-científica firmada com a empresa WEG S.A.

Referências

ARORA, T. G.; AWARE M. V.; TUTAKNE, D. R. Fuzzy logic based electrothermal life model for inverter-fed induction motor insulation. **Electric Power Component Systems**, London UK, v. 43, n. 3, p. 298–308, 2013.

ARORA, T. G.; AWARE M. V. Life Model for PWM Controlled Induction Motor Insulation using Design of Experiments Method. **Electric Power Component Systems**, London UK , v. 47, n. 1, p. 153–163, 2019.

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors**. IEC TS 60034-2-3. Geneva, Switzerland, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Qualification and type tests for Type II electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters**. IEC TS 60034-18-41. Geneva, Switzerland, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **High-voltage test techniques - Partial discharge measurements**. IEC 60270. Geneva, Switzerland, 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Partial Discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters - Qualification tests**. IEC TS 60034-18-42. Geneva, Switzerland, 2017.

KARAVASILIS, R. G. **Estudo de Motores Acionados por Conversores de Frequência e Influências no Sistema Isolante**. Florianópolis, 148 p., 2008. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina.

LIU, X.; WU, G.; TONG, L.; LIN, T.; ZHANG, G. **Influence of Impulse Frequency on Partial Discharge under PWM**. In: Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), 2006, p. 241-244.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **American National Standard Magnet Wire**. ANSI/NEMA MW 1000-2016. Rosslyn, Virginia, 2016.

SILVA, F. F. B. **Desvendando a lógica Fuzzy**. Uberlândia, 129 p., 2011. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia.

STONE, G. C.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H. **Electrical Insulation for Rotating Machines**. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004.

WEG S.A. Guia técnico – Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM, 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.

WEG S.A. Guia de especificação – Motores Elétricos, 2017. Disponível em <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 15 de julho 2019.

YIN, W. Dielectric properties of an improved magnet wire for inverter fed motors. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. Piscataway NJ, v. 13, n. 4, p. 17-23, 1997.

ANEXO

| Regra | V (Vrms) | FC (kHz) | ET (°C) | Percentual Vida |
|-------|----------|----------|---------|-----------------|
| 1 | Baixa | Baixa | Baixo | Bom |
| 2 | Baixa | Médio | Baixo | Bom |
| 3 | Baixa | Alta | Baixo | Bom |
| 4 | Baixa | Baixa | Médio | Bom |
| 5 | Baixa | Média | Médio | Médio |
| 6 | Baixa | Alta | Médio | Médio |
| 7 | Baixa | Baixa | Alta | Médio |
| 8 | Baixa | Média | Alta | Baixo |
| 9 | Baixa | Alta | Alta | Baixo |
| 10 | Média | Baixa | Baixo | Bom |
| 11 | Média | Médio | Baixo | Médio |
| 12 | Média | Alta | Baixo | Médio |
| 13 | Média | Baixa | Médio | Médio |
| 14 | Média | Média | Médio | Médio |
| 15 | Média | Alta | Médio | Baixo |
| 16 | Média | Baixa | Alta | Baixo |
| 17 | Média | Média | Alta | Baixo |
| 18 | Média | Alta | Alta | Baixo |
| 19 | Alta | Baixa | Baixo | Baixo |
| 20 | Alta | Médio | Baixo | Baixo |
| 21 | Alta | Alta | Baixo | MuitoBaixo |
| 22 | Alta | Baixa | Médio | Baixo |
| 23 | Alta | Média | Médio | Baixo |
| 24 | Alta | Alta | Médio | MuitoBaixo |
| 25 | Alta | Baixa | Alta | MuitoBaixo |
| 26 | Alta | Média | Alta | MuitoBaixo |
| 27 | Alta | Alta | Alta | MuitoBaixo |