

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TIAGO SAMUEL FEIX

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY**

São Leopoldo

2021

TIAGO SAMUEL FEIX

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. M.e Vinícius André Uberti

São Leopoldo

2021

AGRADECIMENTOS

Durante todos os momentos da vida, existem pessoas especiais que nos acompanham e merecem um agradecimento especial quando atingimos um grande objetivo de nossas vidas.

Assim, em primeiro lugar, agradeço a minha família, por sempre estarem ao meu lado, me apoiando de todas as formas possíveis para que esta caminhada chegasse ao fim. Ao meu pai, Auri Feix e minha mãe, Janice Beatriz Feix, os meus mais sinceros agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador, professor M.e Vinícius André Uberti, por todas as orientações, todos os ensinamentos e teus conselhos na elaboração deste trabalho. Sem dúvidas, teus ensinamentos engrandeceram esta monografia.

Aos meus amigos, agradeço todo apoio e incentivo, que me deram forças para seguir no curso e cumprir esta meta em minha vida. Em especial, aqueles que pude contar em momentos de dúvidas, que me auxiliaram conversando ou tomando um simples café para me fornecerem mais força para continuar nesta longa caminhada.

Agradeço aos professores, que formaram a base do meu conhecimento, desde o ensino fundamental, seguindo pelo ensino técnico e, por fim, na graduação. Sem vocês, não existiria mais nenhuma profissão, obrigado por repassarem o conhecimento à todos nós.

Por fim, agradeço aos especialistas, que me auxiliaram a formar uma base para aplicação de minha ferramenta. Obrigado pelo seu tempo e conhecimento.

RESUMO

Transformadores de potência são responsáveis pela transformação de energia de um circuito primário para um circuito secundário, alterando os níveis de tensão e corrente de forma proporcional entre elas. Transformadores são fundamentais para o sistema elétrico, sendo o equipamento mais importante em uma subestação. Uma parada neste equipamento, sendo ela por falha ou sendo ela por necessidade de manutenção, geralmente obriga o desligamento de inúmeras cargas, podendo parar produções inteiras na indústria ou desabastecer consumidores do sistema de distribuição. Sendo assim, neste contexto, garantir o funcionamento deste tipo de equipamento é de extrema importância em todos os tipos de consumidores de energia elétrica. Este trabalho apresenta uma proposta de elaboração de uma ferramenta, que através da Lógica Fuzzy, avalia a confiabilidade de transformadores de potência de um sítio composto por quatro subestações de alta tensão. A ferramenta irá avaliar dados históricos de falhas, sendo de paradas programadas ou de falhas graves dos transformadores, além dos dados da análise do óleo mineral isolante e dos ensaios elétricos do equipamento, oriundos de manutenções planejadas. Como variável de saída é gerado um indicador utilizado para classificar a confiabilidade dos equipamentos. A metodologia proposta foi aplicada em 12 transformadores de potência, onde os resultados demonstraram que dois equipamentos apresentam Confiabilidade Alta e três são classificados com Confiabilidade Regular. O menor índice de confiabilidade é de 57,5%, no transformador FR1 e o maior índice é de 82,9% pertencente ao transformador LB3. Com a ferramenta, é otimizado o plano de manutenção dos transformadores de potência e desta forma há uma considerável redução dos custos com manutenção destes equipamentos.

Palavras-chave: Confiabilidade. Transformadores de Potência. Lógica Fuzzy. Manutenção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva da Banheira	29
Figura 2 – Pertencimento Lógica Clássica	34
Figura 3 – Pertencimento Lógica Fuzzy	35
Figura 4 – Funções de Pertinência.....	37
Figura 5 – Exemplo de Variáveis Linguísticas	38
Figura 6 – Ferramenta 01	39
Figura 7 – Ferramenta 01	41
Figura 8 – Ferramenta 02.....	42
Figura 9 – Fluxograma da Metodologia Proposta.....	44
Figura 10 – Diagrama de blocos dos dados analisados	46
Figura 11 – Diagrama de blocos Ferramenta Fuzzy	51
Figura 12 – Função de pertinência – Fuzzyficação de variáveis	52
Figura 13 – Função de Pertinência da Variável Resistência de Isolação	53
Figura 14 – Função de Pertinência da Variável Resistência do Bobinado	54
Figura 15 – Função de Pertinência da Variável Relação de Transformação.....	55
Figura 16 – Função de Pertinência da Variável Fator de Potência de Isolação	56
Figura 17 – Função de Pertinência da Variável Histórico.....	57
Figura 18 – Função de Pertinência da Variável Proteção Física	58
Figura 19 – Função de Pertinência da Variável Teor de Água	59
Figura 20 – Função de Pertinência da Variável Rigidez Dielétrica	60
Figura 21 – Controlador Ensaio Elétricos	61
Figura 22 – Controlador Histórico e Proteções Físicas	62
Figura 23 – Controlador Análise de Óleo	62
Figura 24 – Variável de Saída - Ensaio Elétricos	63
Figura 25 – Variável de Saída - Histórico e Proteções Físicas.....	64
Figura 26 – Variável de Saída - Análise de Óleo.....	65
Figura 27 – Aplicação Ferramenta Fuzzy – Variável Ensaio Elétricos	73
Figura 28 – Aplicação Ferramenta Fuzzy – Variável Histórico e Proteções Físicas..	74
Figura 29 – Aplicação Ferramenta Fuzzy – Variável Análise de Óleo.....	76

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Termômetro	20
Fotografia 2 – Indicador de Nível	21
Fotografia 3 – Relé Buchholz	22
Fotografia 4 – Coleta de Óleo	23
Fotografia 5 – Transformador de Potência SC1	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Diferenças entre tipos de manutenção	30
Quadro 2 – Pesos do número de prioridade de risco	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos Transformadores.....	45
Tabela 2 – Parâmetros da Variável Resistência de Isolação	53
Tabela 3 – Parâmetros da Variável Resistência do Bobinado.....	54
Tabela 4 – Parâmetros da Variável Relação de Transformação	55
Tabela 5 – Parâmetros da Variável Fator de Potência de Isolação.....	56
Tabela 6 – Parâmetros da Variável Histórico	57
Tabela 7 – Parâmetros da Variável Proteção Física	58
Tabela 8 – Parâmetros da Variável Teor de Água	59
Tabela 9 – Parâmetros da Variável Rigidez Dielétrica	60
Tabela 10 – Parâmetros da Variável de saída Ensaio Elétrico	63
Tabela 11 – Parâmetros da Variável de Saída Histórico e Proteções Físicas.....	64
Tabela 12 – Parâmetros da Variável de saída Análise de Óleo	65
Tabela 13 – Características dos transformadores.....	66
Tabela 14 – Ponderação dos Indicadores Parciais	66
Tabela 15 – Classificação do Indicador de Confiabilidade	67
Tabela 16 – Resistência de Isolação do Transformador SC1	69
Tabela 17 – Resistência do Bobinado do Transformador SC1.....	69
Tabela 18 – Relação de Transformação do Transformador SC1	70
Tabela 19 – Fator de Potência de Isolação do Transformador SC1.....	70
Tabela 20 – Intervenções Históricas do Transformador SC1	71
Tabela 21 – Análise de Óleo do Transformador SC1.....	71
Tabela 22 – Valores das Variáveis de Entrada dos Transformadores	72
Tabela 23 – Valores de Saída do Controlador Ensaio Elétrico	73
Tabela 24 – Valores de Saída da Variável Histórico e Proteções Físicas.....	75
Tabela 25 – Valores de Saída da Variável Análise de Óleo.....	76
Tabela 26 – Indicador de Confiabilidade Transformador SC1	77
Tabela 27 – Índices Fuzzy e Índice de Confiabilidade.....	78
Tabela 28 – Classificação do Indicador de Confiabilidade	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
DALF	Diagnóstico Auxiliado por Lógica Fuzzy
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effect and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Failure Tree Analysis</i>
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MT	Média Tensão
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NPR	Número de Prioridade de Risco
OFAF	Óleo Forçado Ar Forçado
OFWF	Óleo Forçado Água Forçado
ONAF	Óleo Natural Ar Forçado
ONAN	Óleo Natural Ar Natural
ppm	Partículas por milhão
SE	Subestação
TTR	<i>Transformer Turn Ratio</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Subestações	14
2.2 Transformadores de Potência	15
2.2.1 Funcionamento Básico de Transformadores de Potência	15
2.2.2 Características Construtivas de Transformadores de Potência.....	16
2.2.3 Meios Isolantes.....	18
2.2.4 Proteções Físicas	19
2.2.5 Coleta de Óleo	23
2.2.6 Ensaios de Transformadores de Potência.....	24
2.3 Manutenção	25
2.3.1 Manutenção Corretiva	25
2.3.2 Manutenção Preventiva.....	26
2.3.3 Manutenção Preditiva.....	27
2.3.4 Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade.....	27
2.3.5 Manutenção Centrada na Confiabilidade	29
2.3.6 Ferramentas de Análise	31
2.3.6.1 FMEA	31
2.3.6.2 FMECA.....	31
2.3.6.3 FTA.....	32
2.4 Lógica Fuzzy	33
2.4.1 Conjuntos Fuzzy.....	33
2.4.2 Funções de Pertinência.....	35
2.4.3 Variáveis Linguísticas.....	37
2.4.4 Fuzzyficação, Inferência e Defuzzuficação	38
2.5 Trabalhos Correlatos	40
2.5.1 Ferramenta 01 – Índice de Confiabilidade Final	40
2.5.2 Ferramenta 02 – Grau de Aderência.....	41

3 METODOLOGIA	43
3.1 Definição do Equipamento Analisado	45
3.2 Análise de Dados.....	46
3.2.1 Ensaio Elétrico.....	46
3.2.2 Histórico e Proteções Físicas	48
3.2.3 Análise de Óleo	49
3.3 Tratamento e Seleção de Dados	49
3.4 Ferramenta Fuzzy.....	51
3.4.1 Fuzzyficação	51
3.4.1.1 Fuzzyficação da Variável Resistência de Isolação.....	53
3.4.1.2 Fuzzyficação da Variável Resistência do Bobinado	54
3.4.1.3 Fuzzyficação da Variável Relação de Transformação.....	55
3.4.1.4 Fuzzyficação da Variável Fator de Potência de Isolação	56
3.4.1.5 Fuzzyficação da Variável Histórico.....	57
3.4.1.6 Fuzzyficação da Variável Proteção Física.....	58
3.4.1.7 Fuzzyficação da Variável Teor de Água	59
3.4.1.8 Fuzzyficação da Variável Rigidez Dielétrica.....	60
3.4.2 Inferência.....	61
3.4.3 Defuzzyficação	63
3.5 Análise de indicadores Fuzzy	65
3.6 Indicador de Confiabilidade	66
4 ESTUDO DE CASO	68
4.1 Tratamento e Seleção de Dados	69
4.2 Aplicação dos Dados na Ferramenta Fuzzy.....	71
4.3 Análise dos Indicadores	77
4.4 Análise dos Resultados	78
5 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE ENTREVISTA COM ESPECIALISTAS	85
APÊNDICE B – ALGORITMO FUZZY	89

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fundamental para a realização de atividades essenciais, incluindo os setores industriais e de transportes, por exemplo. É cada vez mais necessária a diversidade de fontes de geração de energia elétrica e, ainda, são necessários meios de transmissão desta energia dos mais distantes locais para os grandes centros de consumo.

Próximo dos locais de grande geração e próximo aos centros de consumo são construídas subestações. Estas são responsáveis por controlar, através de seus equipamentos instalados e conforme necessidade, toda a transmissão e distribuição de energia elétrica em diversos níveis de tensão. Nas transformações de níveis de tensão e corrente elétrica, causando a diminuição de perdas por efeito joule durante a transmissão, as subestações utilizam o mais importante equipamento nela instalado, os transformadores de potência.

Por conseguirem transformar o nível de tensão do circuito primário para um nível diferente no circuito secundário, os transformadores têm papel fundamental no sistema elétrico. Devido seus padrões construtivos e por sua responsabilidade no sistema, este equipamento acaba tendo um custo elevado e, em alguns casos, conforme algumas características, se tornam de difícil reposição, com grande período de espera até que seja repostos em caso de falha.

Com isto, a confiabilidade na operação deste equipamento é cada vez mais importante para tomadas de decisão na manutenção destes transformadores. Os setores responsáveis pela manutenção aplicam diversas metodologias para acompanhar os parâmetros de funcionamento dos transformadores e, através de destes, conseguem verificar e prever algumas falhas, para assim, em tempo hábil, programarem paradas de manutenção para minimizar ou reparar as potenciais falhas, elevando a confiabilidade de operação.

O presente trabalho aborda a metodologia de manutenção de transformadores de potência instalados em quatro subestações de alta tensão. A proposta consiste em avaliar a confiabilidade de operação destes transformadores para garantir o funcionamento do sistema de abastecimento de energia elétrica nesta planta.

O modelo apresenta conceitos de manutenção e controle de manutenção para verificar a confiabilidade de doze transformadores de potência, e, se

necessário, alterar o plano de manutenção destes. Para isto, será utilizada uma ferramenta baseada na Lógica Fuzzy.

1.1 Justificativa

A crescente necessidade em garantir o funcionamento de equipamentos elétricos sem paradas emergenciais para realizar manutenções corretivas, aumentando a eficiência do sistema em destaque, é fator primordial para a realização deste trabalho.

A empresa em estudo, que é responsável por transportar mais de duzentas mil pessoas por dia, tem 50 MVA de potência instalada para a atividade fim. Por ter uma responsabilidade social e por auxiliar no desenvolvimento da região metropolitana de Porto Alegre não pode deixar de atender a população gaúcha e assim não pode ter diversos transformadores inoperantes simultaneamente devido a falhas ou paradas programadas. Pois desta forma seria necessário a redução da oferta de trens para o transporte de passageiros ou em casos mais críticos a parada total do sistema.

A empresa já tem um plano de manutenção anual, contudo, não tem uma ferramenta para tomada de decisão devido à confiabilidade do equipamento. A melhor tomada de decisão para realização das atividades de manutenção, através de ferramentas de análise, visa a redução do custo tanto na execução das atividades de manutenção quanto na atividade fim da empresa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é elaborar uma ferramenta de análise da confiabilidade de transformadores de potência, baseado na Lógica Fuzzy, a partir de informações coletadas durante os diferentes tipos de manutenção, com a finalidade de otimizar o plano de manutenção destes equipamentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para garantir o atendimento do objetivo geral deste trabalho, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar o levantamento de dados dos equipamentos instalados, assim como os valores obtidos na última manutenção preventiva em relação aos ensaios elétricos e análise de óleo;
- b) Realizar o levantamento de dados históricos das falhas dos transformadores;
- c) Desenvolver uma ferramenta que identifique a confiabilidade dos equipamentos estudados através de fatores críticos determinados por especialistas;
- d) Verificar a eficácia da ferramenta elaborada, sugerindo, inclusive, ações de melhoria no cronograma de manutenção.

Com os objetivos definidos e a justificativa apresentada, foram iniciados os estudos teóricos para a elaboração da ferramenta de confiabilidade baseada na Lógica Fuzzy.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estando divididos em cinco assuntos e tendo como finalidade proporcionar a melhor compreensão do estudo proposto, este capítulo apresenta a fundamentação teórica deste trabalho.

Serão apresentados conceitos de subestações, transformadores de potência, conceitos de manutenção, de Lógica Fuzzy e apresentados alguns trabalhos correlatos.

2.1 Subestações

Com o aumento – ao passar do tempo – da demanda e do consumo de energia elétrica, a humanidade começou a necessitar cada vez mais de sua utilização para os mais diversos fins. Assim foi necessário um aumento significativo da geração de energia que hoje é produzida em grande escala, longe dos centros urbanos e maiores consumidores de cargas existentes no sistema interligado nacional. As subestações são instalações destinadas a elevar a tensão para possibilitar a transmissão de energia com menor quantidade de perdas e, após a transmissão, rebaixar a tensão para níveis próprios ao consumo. (GEDRA, BARROS, BORELLY, 2014)

Subestações, ainda na visão de Gedra, Barros e Borelly (2014), são as instalações elétricas que abrigam equipamentos de medição, proteção e transformação que alteram os valores de tensão e corrente. Permitem manobras garantindo a confiabilidade do sistema e a segurança das instalações e dos profissionais que ali trabalham. São classificadas entre subestações de energia das concessionárias e subestações de energia de consumidores.

Próximo aos centros geradores de energia elétrica, segundo Barros e Gedra (2010), são construídas subestações elevatórias de tensão para valores padronizados, destacando-se as tensões de 69 kV, 88 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 750 kV em corrente alternada e 600 kV em corrente contínua. No setor de distribuição as subestações rebaixam os valores de tensão e a distribui pelas ruas dos centros de carga, as tensões nominais são entre 13,8 kV e 34,5 kV. (GEDRA, BARROS, BORELLY, 2014)

Para realização da transformação das tensões e corrente as subestações abrigam diversos equipamentos que visam a transformação das grandezas elétricas, a manobras operacionais e a segurança dos equipamentos e pessoas envolvidas nas atividades de manutenção. Como exemplos de equipamentos instalados em subestações temos os para-raios, que protegem o sistema de surtos de tensão. Já para manobras são instalados disjuntores que extinguem o arco elétrico de forma segura e controlada e as chaves seccionadoras, que garantem visualmente a interrupção do circuito. Os relés micro processados, no qual com o auxílio de transformadores de corrente e transformadores de potencial, protegem de forma rápida e digital a subestação. E por fim, o mais importante equipamento, transformadores de potência que são responsáveis por transferirem a potência de um circuito primário para um secundário modificando a tensão e a corrente elétrica do sistema.

2.2 Transformadores de Potência

Transformadores de potência é o equipamento mais importante e o mais caro de uma subestação. Segundo a ABNT é um equipamento estático que por indução magnética transforma um sistema de tensão e corrente alternada chamado de primário em um sistema secundário, com o objetivo de transferir potência elétrica entre os sistemas (NBR 5356:2007).

2.2.1 Funcionamento Básico de Transformadores de Potência

Sendo um equipamento para a redução ou aumento de tensão, um transformador pode ser definido como transformador abaixador ou elevador de tensão (NASCIMENTO JR. 2014). Para Mamede Filho (2019), transformadores são considerados equipamentos de operação estática, que, por meio de indução eletromagnética, transferem energia de um circuito primário para circuitos denominados secundário e eventualmente terciário. A frequência mantém-se constante nos circuitos primário, secundário e terciário.

Por convenção, segundo Umans (2014), o primário é visto como a entrada do sistema e o secundário como a saída, contudo o fluxo pode fluir em ambos os

sentidos, assim é comum utilizar a terminologia alternativa se referindo aos enrolamentos de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT).

Se o enrolamento primário for conectado a uma fonte alternada de tensão, será produzido um fluxo alternado de amplitude dependendo da tensão do primário, da frequência e do número de espiras da bobina primária. Uma parte do fluxo se conecta ao enrolamento secundário induzindo nele uma tensão elétrica dependendo do número de espiras do bobinado secundário. (UMANS, 2014)

Ainda na visão de Umans (2014), o acoplamento destas duas bobinas pode ser muito mais eficiente com o uso de um núcleo de ferro ou material ferromagnético, pois a maior parte do fluxo mantém-se confinada a um caminho delimitado e de alta permeabilidade. Deste modo, a essência de funcionamento de um transformador, necessita apenas de um fluxo, variável no tempo, mútuo entre dois enrolamentos.

2.2.2 Características Construtivas de Transformadores de Potência

Os componentes do transformador podem ser classificados em dois grupos, em relação às características construtivas. Temos a parte ativa que é composta pelas bobinas e pelo núcleo. E temos os demais itens, que são denominados acessórios, segundo os estudos de Gedra, Barros e Borelli (2014).

Construtivamente, temos transformadores tipo camada, o qual este é o caso mais comum na montagem do enrolamento dos transformadores de distribuição, onde fios, de pequena seção, são enrolados de forma helicoidal em espiras sucessivas e adjacentes. Também existem os do tipo panqueca, a qual a bobina é composta por vários discos ligados em serie verticalmente, facilitando a manutenção em caso de avaria em alguma das panquecas (MAMEDE FILHO, 2019).

A parte ativa é composta pelas bobinas e pelo entreferro, este último constituído de chapas de ferrosilício isoladas e sobrepostas. É pelo núcleo de ferro que o fluxo magnético flui do primário para o secundário (GEDRA, BARROS, BORELLY, 2014).

Para possibilitar a alteração da relação de transformação, compensando possíveis quedas de tensão dos sistemas elétricos, os transformadores são construídos com derivações no enrolamento primário chamadas de "TAP". Normalmente, os transformadores devem ser desligados para que seja alterada a

alavanca ou chapa de posição de TAP, e devido à esta ser a única peça móvel de transformadores, acarreta nela um alto índice de falhas. Em alguns casos há equipamentos com comutação automática da posição da derivação, chamados de comutadores de operação sobre carga, estes regulam a tensão secundária em razão da tensão primária, operam corrigindo as quedas de tensão que ocorrem durante as faixas do dia e em relação à carga do circuito até seu limite de fabricação (MAMEDE FILHO, 2019).

No aspecto construtivo, ainda segundo Mamede Filho (2019), há transformadores de núcleo envolvente, no qual o núcleo envolve as bobinas e de núcleo envolvido, em que as bobinas envolvem o núcleo. Os transformadores podem ser construídos, dependendo da potência do circuito a alimentar, em uma fase, duas fases e três fases (MAMEDE FILHO, 2019).

Ainda sobre os estudos de Mamede Filho (2019), dependendo da conveniência do sistema, transformadores trifásicos podem ter suas bobinas ligadas de três maneiras diferentes: em triangulo, no qual o final de uma bobina é ligado ao início da próxima; em estrela, em que cada bobina representa uma fase e o final das mesmas são unidos como ponto comum; e em zigue-zague, que as bobinas são ligadas aos pares em cada fase e, também, são unidas em um ponto comum.

Destinadas a assegurar a passagem de um condutor através de uma parede não isolada as buchas em transformadores com tensão nominal elevada devem ser capacitivas e com isolação através de mesmo líquido de isolação do transformador. Devem conter visor para verificação do nível de óleo e munidas de terminações para testes da capacitância e fator de potência (NBR 10202, 2011).

A carcaça, também chamada de tanque, é a parte metálica onde é abrigado o núcleo e é onde está restrito o líquido isolante. É construído em tamanhos e formatos diferentes (MAMEDE FILHO, 2019).

Segundo Gedra, Barros, Borelli (2014), em transformadores de grande porte, em que há variação do nível de óleo devido à variação de temperatura, é fixado um tanque de expansão na parte superior da carcaça. Este recebe o óleo em sua expansão e o devolve à parte ativa do transformador na sua retração. Para Mamede Filho (2019), transformadores que não necessitam de tanque de expansão tem as chapas da carcaça em uma espessura maior, devido as maiores pressões internas do óleo, estes são chamados transformadores selados.

Durante o processo de expansão e retração do óleo isolante, há a possibilidade de se contaminar o líquido isolante, diminuindo seu dielétrico, através de sujeira e umidade. Assim, é instalado um recipiente que recebe óleo e sílica gel para proteger e desumidificar o ar que fica em contato com o líquido isolante, o chamado secador de ar (GEDRA, BARROS, BORELLY, 2014).

Devido às variações de carga e de temperatura, na visão de Mamede Filho (2019), o óleo isolante transfere o calor do núcleo até as paredes do transformador, e para auxiliar no resfriamento, transformadores de grande porte são munidos de radiadores que contribuem com a circulação do líquido isolante e seu resfriamento, nos radiadores, também, são fixados métodos de resfriamento forçado, como ventiladores.

2.2.3 Meios Isolantes

Quanto ao meio isolante, os transformadores são classificados em dois grupos: os isolados através de líquido isolante e os isolados em resina epóxi, chamados a seco (MAMEDE FILHO, 2019).

Os transformadores a seco, por se tratar de um equipamento específico, tem um custo um pouco maior comparando aos de líquido isolante. Sua utilização é especificamente em instalações em que o nível de segurança requeira um grau mais elevado. Construídos, geralmente, com fitas de alumínio nas bobinas primárias e em chapa de alumínio nas bobinas secundárias, estes equipamentos são encapsulados em epóxi em ambiente de vácuo e alta temperatura (MAMEDE FILHO, 2019).

Conforme Mamede Filho (2019), transformadores isolados através de líquido isolante são de uso comum e generalizado em sistemas de distribuição e em plantas industriais. Os quatro tipos de líquidos isolantes existentes são o mineral, o vegetal, o silicone e o ascarel. Este último está proibido por lei de ser comercializado devido a suas características cancerígenas. Os líquidos isolantes são destinados a refrigerar as bobinas dos transformadores e, através do efeito Joule, transferir o calor até as paredes do tanque.

As partes energizadas ficam imersas em líquido isolante neste tipo de equipamento, para desempenhar a função de isolar e refrigerar as características do óleo isolante são: boa rigidez dielétrica, capacidade de transferência de calor, baixo ponto de ignição, baixa viscosidade e alta resistência a oxidação. Ainda,

transformadores de grande porte tem um sistema de refrigeração diferenciado, sendo eles à refrigeração natural (ONAN), ventilação forçada (ONAF), circulação forçada de óleo (OFAF) e refrigeração a água (OFWF) (GEDRA, BARROS, BORELLY, 2014).

O óleo mineral é o mais utilizado em transformadores. Tem sua origem em fracionamento do petróleo e processo de refino. Este deve ser livre de impurezas, como poeira e umidade que afetam suas características de isolamento, à medida que o tempo passa, e em virtude vários fatores, como as sobrecargas no sistema, o óleo mineral vai perdendo suas características e se torna inadequado aos equipamentos elétricos. Quando perde suas características dielétricas pode-se regenerá-lo através de filtro prensa ou com a utilização de inibidores. Há dois tipos de óleo mineral isolante, o naftênico que é chamado de tipo A e o parafínico que, por sua vez, é chamado de tipo B (MAMEDE FILHO, 2019).

O óleo silicone é constituído de polímero sintético de base do silício, este, por ter um ponto de chama próximo aos 300°C, é recomendado para instalações em edifícios residenciais e comerciais onde há maior segurança para as pessoas que ali circulam. Ainda na concepção de Mamede Filho (2019), as normativas de manutenção de equipamentos com esta especificação do meio isolante são as mesmas dos de óleo mineral, contudo seu custo de instalação é maior, ficando assim, na grande maioria das vezes, restrito a normativas para sua instalação.

Por fim, o óleo mineral isolante foi desenvolvido principalmente pela questão ambiental, é adaptado por processos específicos recebendo aditivos antioxidantes e depressores de ponto de fluidez para o uso em equipamentos elétricos. Sua maior vantagem é ter características biodegradáveis, onde, em caso de contaminação do solo, o produto se degrada em poucos dias, diminuindo os custos de reparação ambiental (STOCCO, 2009).

2.2.4 Proteções Físicas

Na construção dos transformadores existem alguns itens responsáveis pela sua proteção física, ou seja, em caso de falha geram um sinal de “TRIP”, este sinal tem a função de, para proteção, acionar a abertura do equipamento de proteção do referido transformador, no caso seu disjuntor. As proteções físicas estudadas neste trabalho são:

- Termômetro;
- Indicador de nível de óleo;
- Válvula de Alívio de Pressão;
- Relé de Súbita Pressão;
- Relé de Gás.

Para não causar falhas ou desgaste por elevação de temperatura, são instalados termômetros que permitem monitorar a mesma. Em transformadores de grande porte há o termômetro de temperatura do óleo e o termômetro de imagem térmica, que monitora a temperatura no enrolamento. Sendo formado por um bulbo com mercúrio em seu funcionamento, devido ao aumento da pressão e devido ao aquecimento do óleo, conseqüentemente, expande-se para marcar a temperatura. Há vários ponteiros em um termômetro de transformadores, os mesmos podem ser usados para acionarem estágios de alarmes e “trip” no circuito de comando do equipamento, como por exemplo, acionar os ventiladores no caso de ONAF e enviar sinal de “trip” para o disjuntor de proteção do equipamento (GEDRA, BARROS, BORELLY, 2014). A Fotografia 1 exemplifica o termômetro de um transformador de potência de 3,3 MVA.

Fotografia 1 – Termômetro



Fonte: Tiago Samuel Feix (2021).

O indicador de temperatura instalado no termômetro da Fotografia 1, além do ponteiro indicador, apresenta um ponteiro de arrasto que indica a maior temperatura marcada no equipamento, uma vez que, é levado de arrasto pelo ponteiro indicador de temperatura.

Segundo Mamede Filho (2019), com a finalidade de indicar o nível de óleo dos transformadores e a proteção dos equipamentos, uma vez que a parte elétrica de transformadores isolados a óleo deve ficar completamente imersa no líquido isolante, os indicadores de nível magnéticos são instalados externamente. Normatizados pela NBR 9368, têm dois contatos, sendo um no mínimo e outro no máximo para, se necessário, informar através de alarme ou envio de “trip” ao disjuntor do equipamento alguma situação crítica no circuito de proteção.

A Fotografia 2 apresenta um indicador de nível de óleo instalado no tanque de expansão de um transformador de potência de 3,3 MVA.

Fotografia 2 – Indicador de Nível



Fonte: Tiago Samuel Feix (2021).

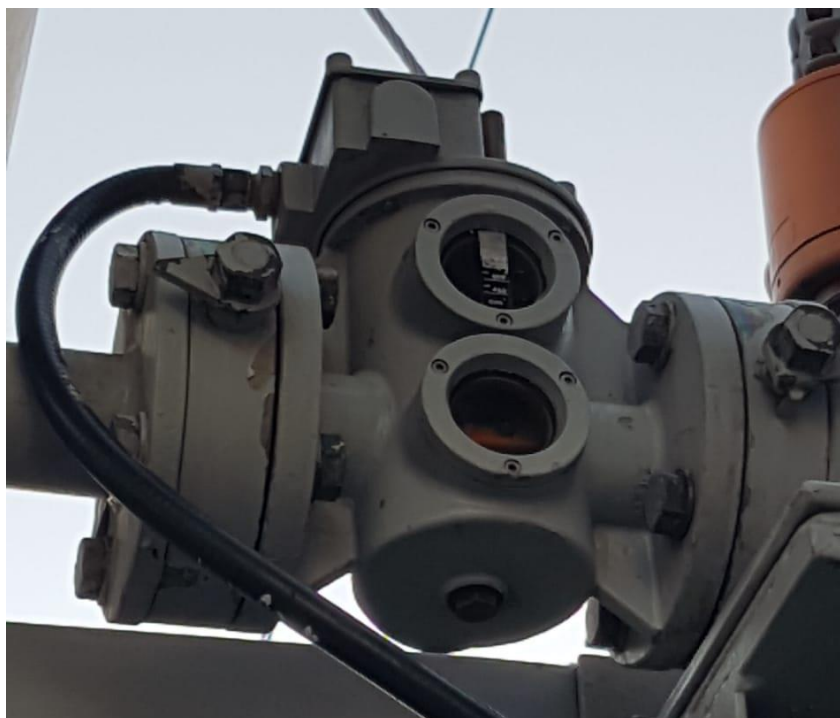
Válvulas de alívio de pressão atuam ao terem a pressão dentro da carcaça do transformador maior que o limite permitido pela válvula. São instaladas a fim de

proteger possíveis deformações no casco causadas por falhas internas que aquecem o óleo isolante e o expande, aumentando a pressão internamente. A válvula de alívio de pressão, após atuar, retorna ao seu estado de repouso. Já o relé de súbita pressão é destinado a proteger o equipamento em uma variação súbita da pressão interna. Este tipo de relé é geralmente instalado em transformadores selados (MAMEDE FILHO, 2019).

Também conhecido como “Buchholz”, o relé de gás protege o transformador de curto-circuitos internos, que causam queima do material isolante, criando gases que se movimentam até o tanque de expansão. Instalado entre o transformador e o tanque de expansão, o relé acusa a sinalização de gases no interior do equipamento gerando sinal de “trip” para desligar o circuito do transformador (MAMEDE FILHO, 2019).

A Fotografia 3 apresenta um relé Buchholz instalado em um transformador de potência de 3,3 MVA, entre o tanque de expansão e a carcaça do equipamento.

Fotografia 3 – Relé Buchholz



Fonte: Tiago Samuel Feix (2021).

Estas proteções físicas serão avaliadas na ferramenta que será elaborada com base na Lógica Fuzzy, tendo seu funcionamento e suas atuações verificadas periodicamente.

2.2.5 Coleta de Óleo

Periodicamente os transformadores imersos em líquido isolante passam por ensaios físico-químicos de seu óleo. Este teste é realizado por empresa especializada em laboratório para verificar as condições do meio isolante. Normalmente retiradas de um dreno na parte inferior do transformador as amostras são colhidas para frascos destinados a esta finalidade (NASCIMENTO JR, 2014).

Para determinar os parâmetros mínimos aceitáveis em análises de características físicas e químicas do líquido isolante dos transformadores, a NBR 10576/2017 fornece orientação sobre a qualidade do óleo isolante, quando aplicado os ensaios de rotina, chamados grupo 1 (NBR 10576, 2017). Para Mamede Filho (2019), devido à importância de algumas instalações, pode-se solicitar alguns ensaios especiais, como a análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante.

A Fotografia 4 apresenta a realização da coleta de óleo de um transformador de potência. Pode-se observar a seringa utilizada para armazenar o óleo após sua coleta.

Fotografia 4 – Coleta de Óleo



Fonte: Tiago Samuel Feix (2021).

Desenvolvida para transformadores de potência com enrolamento de cobre isolados com papel, o método de análise descrito na NBR 7274/2012, e em conjunto com o método de coleta da NBR 7070/2006, demonstra como as concentrações de gases formados pela degradação do papel e óleo isolante podem ser interpretadas para diagnosticar o estado do transformador, prevenindo falhas (NBR 7274, 2012).

2.2.6 Ensaio de Transformadores de Potência

Os ensaios de rotina, de tipo e especiais devem ser aplicados nos transformadores. Devem ser realizados em fábrica - salvo acordo contrário entre fabricante e cliente -, executados em temperatura de 10°C até 30°C e corrigidos os valores a temperatura conforme normativa, se necessário (ABNT, 2016).

A medição de resistência de enrolamento é realizada a partir da medição de resistência ôhmica de cada enrolamento, individualmente no primário, secundário e terciário, através de um equipamento conhecido como “microhmímetro”. Deve-se anotar também a temperatura dos enrolamentos. Para isso recomenda-se aguardar ao menos 3 horas com o equipamento desligado para iniciar o teste, evitando autoindutância (ABNT, 2016).

A medição da relação de transformação, do inglês *Transformer Turn Ratio* (TTR), verifica a relação de transformação entre a bobina do primário com a do secundário (ABNT, 2016).

Na medição de resistência de isolamento, aplica-se tensão nos terminais de alta tensão contra o aterramento, nos terminais de baixa tensão contra o aterramento e da alta tensão contra a baixa tensão, através de um equipamento conhecido como “megôhmetro”. Realiza-se a leitura em um espaço de tempo e registra-se a temperatura do líquido isolante para correção do valor lido conforme Tabela de correção. (NBR 7036, 1990)

Por fim, o teste de medição do fator de potência de isolamento deve ser aplicado antes dos testes dielétricos, com as buchas montadas e com os enrolamentos curto circuitados. Aplica-se o teste entre os terminais das buchas e em relação à terra para verificar as condições de fator de potência. Este teste também é aplicado nas buchas de AT (NBR 5356, 2016).

Estes ensaios são aplicados nas manutenções preventivas dos transformadores de potência de 3,3 MVA da empresa foco deste estudo.

2.3 Manutenção

Manutenção, conforme a NBR 5462 (1994), é a combinação das ações administrativas e técnicas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um determinado equipamento a fazer o que ele foi criado para fazer.

Para Moubray (2000), a manutenção é um conjunto de ações e recursos aplicados aos ativos, para mantê-lo nas condições de desempenho de fábrica, visando garantir a realização de suas funções dentro dos parâmetros estipulados como os de disponibilidade, qualidade, prazos, custos e de vida útil. A manutenção deve ser voltada aos resultados objetivados pela organização, deve buscar uma maior eficácia na aplicação dos recursos avaliando a relação entre custo e vida útil dos equipamentos (SOEIRO, OLIVIO, LUCATO, 2017).

De extrema importância em empresas de diversos setores, a atividade de manutenção, pode variar em cada organização devido às diversas diferenças nas atividades e no tamanho de cada uma delas, a manutenção deve ser adaptada às situações técnicas, geográficas e de pessoal existente (MENEGAZ).

Para classificar a atuação da manutenção há uma variedade grande de denominações, os diversos tipos de manutenções podem ser classificados como políticas de manutenção, desde que, previamente, sejam determinados por alguma decisão gerencial baseada em dados técnicos e econômicos (KARDEC; NASCIF, 2012). Os tipos de manutenção executados na indústria são a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva.

2.3.1 Manutenção Corretiva

Segundo a NBR 5462 (1994) a manutenção corretiva destina-se a recolocar um equipamento em operação após ele sofrer uma avaria ou falha. A opção pela manutenção corretiva, em princípio, deve levar em consideração fatores econômicos, ou seja, avaliar se é uma boa opção consertar uma falha ao invés de preveni-la, sem esquecer a segurança e preservação do meio ambiente (SOEIRO, OLIVIO, LUCATO, 2017).

Definida como a ação para a correção da falha ou do desempenho de equipamentos, a manutenção corretiva não é necessariamente a correção de falhas emergenciais. Kardec e Nascif (2012) diferenciam a manutenção corretiva entre

manutenção não planejada e corretiva planejada. Segundo os autores a manutenção corretiva não planejada implica em altos custos de manutenção, pois há uma quebra inesperada de algum equipamento. Se caracteriza, ainda, pela atuação da manutenção em falhas já ocorridas sem tempo de preparação para o serviço de manutenção em equipamentos fora de operação.

A manutenção corretiva planejada, por sua vez, é a correção do desempenho do equipamento ou por uma decisão gerencial, que pode ser tomada a partir de análises das manutenções preditivas realizadas. Sendo sempre de melhor qualidade, mais barato e rápido um trabalho planejado do que um que não foi planejado (KARDEC; NASCIF, 2012).

2.3.2 Manutenção Preventiva

Realizada em intervalos predeterminados de tempo, a manutenção preventiva, é executada para reduzir a quantidades de falhas ou a degradação do equipamento (NBR 5462, 1994). Segundo Lafraia (2001), a manutenção preventiva, através da prevenção de falhas, busca reter o sistema no estado operacional, através de atividades como limpeza, lubrificação e calibração, afetando diretamente a confiabilidade e a taxa de falhas do equipamento.

Envolvendo algumas atividades sistêmicas, com intervalos bem definidos, a manutenção preventiva, devem ter equipamentos testados, peças trocadas e componentes reformados antes do fim de sua vida útil. Como resultado desta técnica, os equipamentos apresentam uma diminuição da frequência de falhas e um aumento na disponibilidade dos ativos da planta (SOEIRO, OLIVIO, LUCATO, 2017).

Para Kardec e Nascif (2012), os dados dos equipamentos nem sempre são entregues de forma completa para adoção de um plano de manutenção preventivo. E, além de condições operacionais e ambientais influenciarem significativamente na expectativa de vida útil do equipamento, a definição da periodicidade deve ser estipulada para cada instalação e equipamento em operação.

Permitindo um bom gerenciamento das atividades e ativos da planta, a manutenção preventiva proporciona um conhecimento prévio das ações, além da previsibilidade do consumo de insumos e sobressalentes. Contudo, para realização desta técnica se faz necessária a retirada do equipamento da operação. Ainda, devido à intervenção no equipamento, outros defeitos podem ser introduzidos no

ativo devido à falha na manutenção, podendo ser humana ou de procedimento, falhas em sobressalentes ou defeitos no desligamento ou energização do ativo (KARDEC; NASCIF, 2012).

2.3.3 Manutenção Preditiva

Manutenção preditiva, que vem do termo predizer, determina as condições dos equipamentos e busca privilegiar a disponibilidade do equipamento, pois através do monitoramento do mesmo realiza intervenções apenas quando se atinge o limite previamente estabelecido de algum parâmetro (KARDEC; NASCIF, 2012).

A manutenção preditiva utiliza métodos de supervisão centralizada ou de amostragem, com isso permite garantir a qualidade do serviço desejado, com base na aplicação sistêmica de técnicas. Este tipo de manutenção visa reduzir ao mínimo as manutenções preventivas e reduzir as manutenções corretivas (NBR 5462, 1994).

Na visão de Soeiro, Olivio e Lucato (2017), a manutenção preditiva, basicamente, pode ser considerada como uma manutenção preventiva baseada no monitoramento e, assim, os equipamentos mais essenciais não tem paradas de manutenção baseadas na vida útil. Ainda, para Soeiro, Olivio e Lucato (2017) as técnicas preditivas mais comuns são a análise de óleo, a análise de vibração e a termografia, dependendo do tipo de indústria e equipamento.

Segundo Kardec e Nascif (2012), para produção que busca reduzir o quantitativo de paradas, a manutenção preditiva é a que oferece melhores resultados ainda como vantagens, este tipo de manutenção é mais eficaz na segurança pessoal e operacional, reduz os custos de manutenção, uma vez que é mais barato o acompanhamento do equipamento, e mantém o mesmo em funcionamento por um maior tempo, elevando sua vida útil.

2.3.4 Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade

A confiabilidade é a capacidade, durante um tempo, de um item desempenhar uma função sob condições específicas. Já a capacidade de o item estar disponível e em condições de executar uma função em um intervalo de tempo é determinada como disponibilidade. A manutenibilidade é a capacidade de um item ser mantido,

mediante os procedimentos, em condições de executar uma função específica (NBR 5462, 1994).

No contexto de Lafraia (2001), a confiabilidade relaciona-se com todas as características que, ao passar do tempo, podem mudar ou ainda deixar de estar em conformidade, trazendo as falhas para o domínio do tempo. Todo equipamento é projetado para a função básica que irá executar, seguindo especificações, assim, a manutenção pode restaurar este desempenho se estiver abaixo do requerido ou em falha. Quanto maior o número de falhas no equipamento, menor será a confiabilidade dele (KARDEC; NASCIF, 2012).

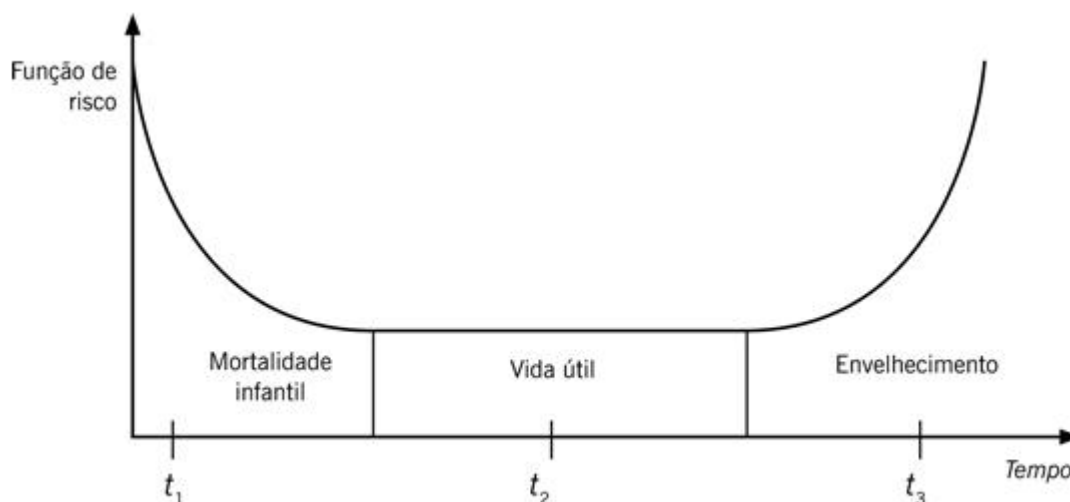
Ainda, Kardec e Nascif (2012), definem taxa de falha como a razão do número de falhas por unidade de tempo, conforme Equação 1.

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas}}{\text{número de horas de operação}} \quad (1)$$

Segundo Siqueira (2009), estudos dos mecanismos de falhas, que ocorrem durante a vida útil do equipamento, auxiliam a identificar as características das diversas formas que as falhas acontecem, criando curvas características da taxa de falha, que por sua vez, auxiliam a escolher a melhor estratégia de manutenção. Com vários componentes diferentes, em um equipamento complexo, há diversos mecanismos de falha, que tem participação na formação da curva característica do equipamento como um todo. Esta curva é conhecida como curva da banheira, devido seu formato parecido com uma banheira. Há três regiões característica nesta curva, sendo elas: i) mortalidade infantil; ii) vida útil; e iii) envelhecimento (SIQUEIRA, 2009).

A Figura 1 apresenta graficamente as fases da curva da banheira, sendo o t_1 uma curva decrescente referente à mortalidade infantil, t_2 apresenta uma constante na vida útil e t_3 o aumento das falhas referente ao envelhecimento.

Figura 1 – Curva da Banheira



Fonte: Fogliato e Ribeiro (2009).

Na mortalidade infantil ocorrem falhas devido a erros de projeto, instalação ou por defeitos de componentes de forma prematura. Já na fase da vida útil as falhas são constantes, ou seja, aparecem durante todo o período de funcionamento do equipamento e de forma aleatória, uma vez que podem ocorrer a qualquer momento deste período. Por fim, no envelhecimento inicia-se o fim do ciclo do equipamento e a taxa de falhas cresce devido a deterioração do equipamento (LAFRAIA, 2001).

2.3.5 Manutenção Centrada na Confiabilidade

Sendo uma metodologia que estuda um equipamento ou sistema em detalhes, a manutenção centrada na confiabilidade (MCC), analisa como cada ativo pode falhar e define a melhor forma para realização de manutenções e para redução do quantitativo de falhas. A MCC é um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer equipamento (KARDEC; NASCIF, 2012).

Para Moubray (2000), a MCC apresenta benefícios como a maior segurança e proteção ambiental, desempenho operacional melhorado, maior efetividade do custo de manutenção, vida útil mais longa dos itens, banco de dados dos equipamentos mais completo, maior motivação das pessoas e melhor trabalho em equipe. Surgindo como uma evolução da manutenção tradicional, a MCC, é baseada na condição do equipamento, deixando de ser baseada no tempo, a terceira geração da

manutenção apresenta uma visão diferente do processo de manutenção (GREGORIO, 2018).

O Quadro 1 apresenta as principais diferenças entre a manutenção tradicional e a MCC.

Quadro 1 – Diferenças entre tipos de manutenção

Característica	Manutenção Tradicional	MCC
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do equipamento	Consequência da Falha
Normalização	Não	Sim
Priorização	Inexistente	Por função

Fonte: Gregório (2018) Apud Siqueira (2005).

O Quadro 1 demonstra as diferenças da manutenção tradicional com o aplicado na MCC, enquanto a manutenção tradicional busca uma performance do equipamento, sem se preocupar com históricos, dados e o restante do sistema. A MCC busca garantir o funcionamento do sistema como um todo, garantindo a funcionalidade do sistema e mantendo o processo funcionando.

Segundo Siqueira (2009), as características e objetivos trazidos pela MCC devem ser mantidos, buscando a coleta de dados que melhore a confiabilidade da manutenção através de um planejamento que melhore as funções desejadas. Já na concepção de Lafraia (2001) o objetivo da MCC é assegurar que o sistema continue exercendo sua função, determinando o que deve ser feito para esta condição seja mantida, tendo suas funções e padrões de desempenhos definidos para a operacionalidade do equipamento. Sendo um processo contínuo e com suas aplicações reavaliadas conforme as experiências operacionais forem se acumulando, no início do processo com a determinação da frequência de forma mais conservadora e após análises podendo ser modificada a periodicidade da execução das manutenções programadas.

2.3.6 Ferramentas de Análise

As ferramentas de análise são utilizadas para detectar falhas em potencial em equipamentos, de forma qualitativa e quantitativa buscam melhorar a prevenção de falhas. Destacam-se as seguintes metodologias de análise conforme abaixo.

2.3.6.1 FMEA

A Análise do Modo e Efeito de Falha é o método que ajuda a identificar e priorizar falhas em potencial em equipamentos. Mais conhecido pela sigla em inglês FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), a ferramenta, que fornece recomendações de ações preventivas, é um sistema lógico que organiza hierarquicamente as falhas (KARDEC; NASCIF, 2012). Segundo a NBR 5462 (1994), FMEA é o método qualitativo de análise de confiabilidade, envolvendo o estudo, que podem existir em cada item, dos modos de falhas, e a determinação dos efeitos sobre os outros itens de cada falha.

Identificando as causas de falhas, a FMEA, propõe melhorias e ações preventivas para melhorar o processo. Sua confiabilidade aumenta, conforme a diminuição ou eliminação da chance de falhas, sendo uma ferramenta indutiva, que minuciosamente, analisa os modos de falha do sistema (PEZZATO, 2018).

2.3.6.2 FMECA

A Análise de Modo, Efeito e Criticidade de Falhas, do inglês FMECA (*Failure Mode Effects and Critically Analysis*), é uma ferramenta que inclui a análise crítica, sendo um método quantitativo utilizado para classificar, levando em consideração sua probabilidade de ocorrência, os modos de falha (KARDEC; NASCIF, 2012). Ainda, para Kardec e Nascif (2012), o índice de risco ou número de prioridade de risco (NPR) é o resultado do índice de prioridade do risco de falha, dado pelo produto dos quantitativos da frequência da falha que é a probabilidade de ocorrer uma falha, pela gravidade da falha, que indica como a falha afeta o sistema, pela detectabilidade que indica a facilidade de detecção da falha no sistema.

O Quadro 2 mostra um exemplo de determinação dos pesos aplicados para determinação do NPR.

Quadro 2 – Pesos do número de prioridade de risco

Componente do NPR	Classificação	Peso
FREQUÊNCIA DA OCORRENCIA	Improvável	1
	Muita Pequena	2 a 3
	Pequena	4 a 6
	Média	7 a 8
	Alta	9 a 10
GRAVIDADE DA FALHA	Apenas Perceptível	1
	Pouca Importância	2 a 3
	Moderadamente Grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremamente Grave	9 a 10
DETECTABILIDADE	Alta	1
	Moderada	2 a 5
	Pequena	6 a 8
	Muita Pequena	9
	Improvável	10
ÍNDICE DE RISCO NPR	Baixo	1 a 50
	Média	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muito Alto	200 a 1000

Fonte: Kardec e Nascif (2012).

O Quadro 2 visa ponderar e classificar potenciais falhas em relação a sua frequência, gravidade e detectabilidade, apresentando um valor escalar para determinar o risco que o equipamento apresenta em sofrer uma parada.

2.3.6.3 FTA

A análise de árvore de falhas, ou do inglês FTA (*Failure Tree Analysis*), é uma técnica de análise que tem como objetivo a identificação de falhas e de suas combinações partindo de um evento topo inicial, determinar sua probabilidade e estudar maneiras de bloquear a sua ocorrência (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Ainda segundo Fogliato e Ribeiro (2009), a FTA é um diagrama lógico que representa, entre os componentes de um sistema, as combinações das falhas de um sistema global. Permitindo que seja calculada a probabilidade de um evento topo, a FTA exige que se desenvolva um modelo em que são especificadas as dependências dos equipamentos do sistema.

Com o avanço de tecnologias computacionais, as ferramentas e os métodos de análise são aprimorados. Assim, as análises são realizadas de forma mais rápida, permitindo melhorar a eficiência na tomada de decisões quanto a realização de algum tipo de manutenção.

Neste certame, diversas ferramentas são utilizadas, entre elas a Lógica Fuzzy.

2.4 Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy, também conhecida por lógica difusa ou lógica nebulosa, diferentemente da lógica bivalente - que reconhece apenas dois valores: verdadeiro ou falso -, traz a multivalência de valores, determinando que exista uma graduação de valores entre 0 e 1 nas questões estudadas. Sendo assim, gerencia as incertezas em um grau de certeza no intervalo numérico, sendo o grau máximo de certeza igual a 1 (SIMÕES E SHAW, 2007).

Caracterizada por ser descritiva, como se fosse uma tradução, a Lógica Fuzzy decodifica o que é dito em uma função dominante, contrapondo-se a lógica clássica de Aristóteles (0 ou 1), a operacionalidade da lógica difusa é semelhante a mente humana, tendo capacidade de lidar com informações incompletas, imprecisas, incertas e ambíguas (LANZILLOTTI e LANZILLOTTI, 2014). Na conjectura de Simões e Shaw (2007), a lógica difusa pode transformar os termos Fuzzy da comunicação humana, de forma sistêmica, para valores computacionais, de forma lógica e compreensiva para as máquinas.

2.4.1 Conjuntos Fuzzy

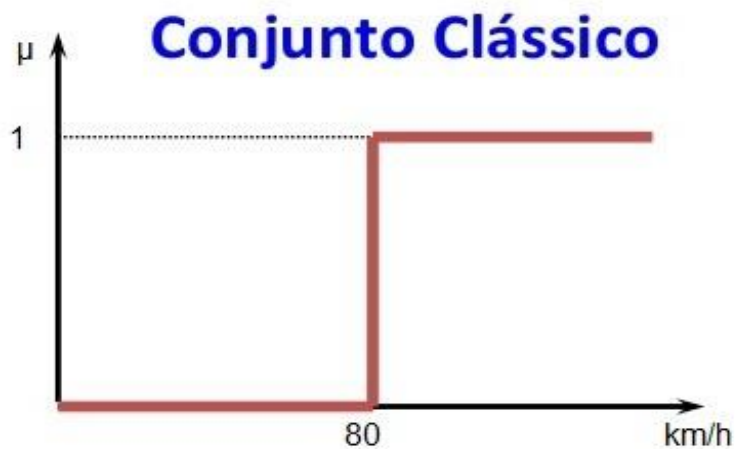
A primeira publicação sobre conjuntos Fuzzy foi feita por Zadeh em 1965, que apresenta a ideia principal da lógica nebulosa. Baseando-se em determinar um grau de pertinência a um elemento, a Lógica Fuzzy busca uma escala que permita determinar o grau de relevância do elemento dentro das possibilidades (LANZILLOTTI e LANZILLOTTI, 2014 apud BELLMAN; ZADEH, 1970).

Na lógica clássica um elemento pertence ou não a um determinado conjunto, como vemos na Equação 2.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad (2)$$

A Figura 2, apresenta um exemplo do pertencimento da lógica clássica, onde o valor de μ_A assume o valor de 1 apenas se o valor for superior a 80km/h, considerando assim que um determinado veículo está em alta velocidade.

Figura 2 – Pertencimento Lógica Clássica



Fonte: Simões e Shaw (2014) adaptado pelo autor (2021).

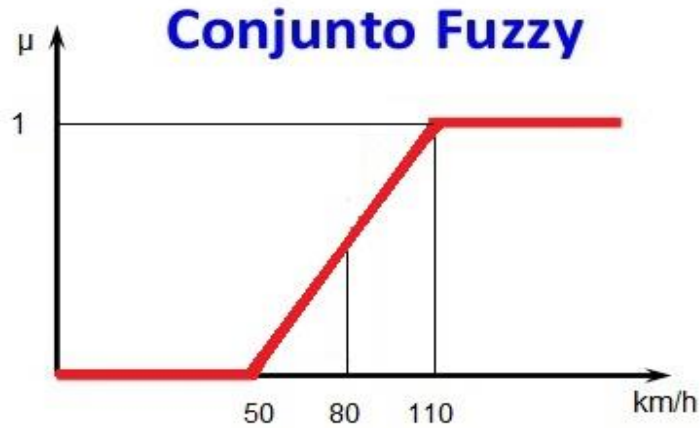
Propondo uma caracterização mais ampla, Zadeh (1965), sugere que alguns números pertencem mais a um determinado estado do que outro. A pertinência assume qualquer número de 0 a 1, onde 0 é a total exclusão e 1 a total inclusão. Tendo a função de pertinência μ_A que assume qualquer valores de zero a um em todo o universo do conjunto Fuzzy (GOMIDE, GUDWIN, TANSCHKEIT, 1995).

A Equação 3 demonstra o apresentado acima:

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0,1] \quad (3)$$

A Figura 3, por sua vez, apresenta um exemplo do pertencimento da Lógica Fuzzy, onde o valor de μ_A assume valores de 0 a 1 em um intervalo maior, considerando alta velocidade de forma gradativa.

Figura 3 – Pertencimento Lógica Fuzzy



Fonte: Simões e Shaw (2014) adaptado pelo autor (2021).

Desta forma, podemos criar graficamente inumeros modelos de funções para determinar o pertencimento de um assunto a um conjunto Fuzzy.

2.4.2 Funções de Pertinência

A escolha da função de pertinência é o primeiro passo para a representação dos conjuntos Fuzzy. Deve-se levar em consideração a capacidade computacional para a escolha das funções, uma vez que funções não lineares podem ser mais eficientes para problemas mais complicados, contudo exigem maior processamento do que funções lineares (MARRO, SOUZA, CAVALCANTE, BEZZERA e NUNES).

A mais simples função de pertinência é a triangular, descrita por apenas três parâmetros, sendo os pontos que delimitam a Figura, sendo estes seus vértices. Por sua vez a função trapezoidal é definida por quatro parâmetros, também conhecida por função π , ela forma 3 retas que formam um trapézio. Variações da função trapezoidal são as funções de pertinência Γ e L onde apresenta valores máximos abaixo de um valor de x na função Γ e valores máximos acima de um valor de x para a função L (UBERTI, 2017).

As equações abaixo apresentam matematicamente as funções de pertinência que serão utilizadas neste trabalho, sendo a Equação 4 a função triangular, a

Equação 5 a função trapezoidal, a Equação 6 a função Γ e por fim, a Equação 7 representando a função L:

$$\mu_{(x)} = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

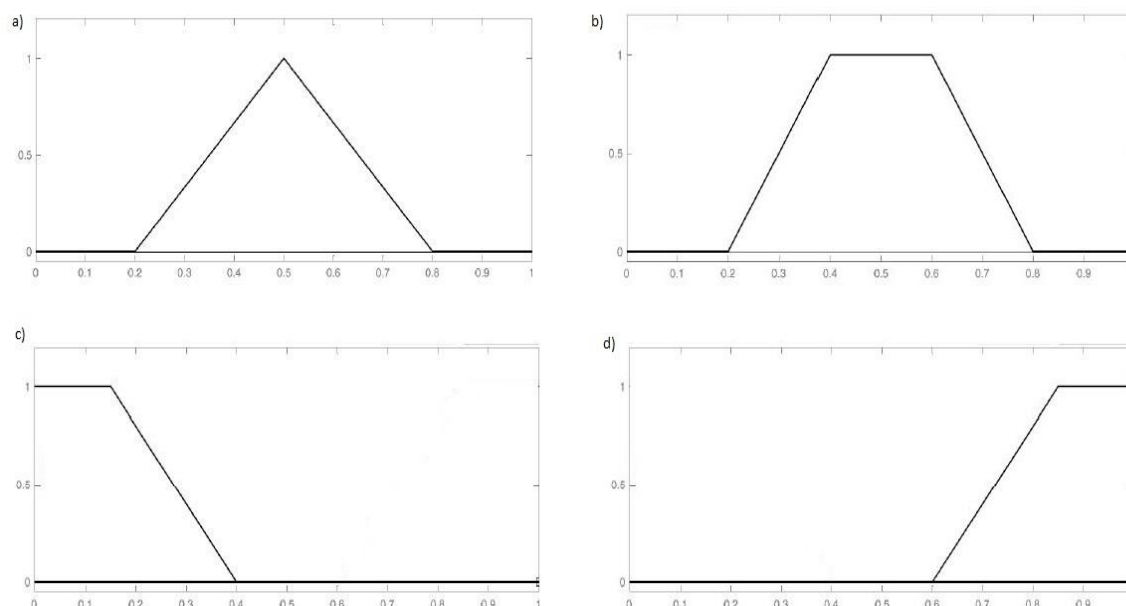
$$\mu_{(x)} = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in (n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{(x)} = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & \text{se } x \in (a, b) \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{(x)} = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } x \in (a, b) \\ 1, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (7)$$

As funções de pertinência vistas através das equações 4, 5, 6 e 7 são apresentadas na Figura 4 onde, respectivamente formar os gráficos "a", "b", "c" e "d".

Figura 4 – Funções de Pertinência



Fonte: Uberti (2017) adaptado pelo autor (2021).

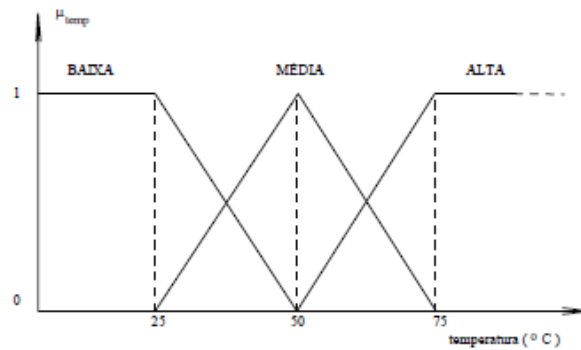
Existem inúmeras outras formas de parametrizar outras funções de pertinência, contudo, neste trabalho serão utilizadas apenas as demonstradas neste subcapítulo.

2.4.3 Variáveis Linguísticas

A entidade para representar um modo impreciso, de modo linguístico, é a variável linguística. Diferente de uma variável numérica recebe apenas valores definidos na linguagem, como por exemplo, alto, baixo, quente ou frio. Ainda, existem os chamados modificadores, que alteram a forma dos conjuntos Fuzzy, são classificados como aumentadores ou diminuidores, sendo eles linguagens alteram a as variáveis, pode-se citar como exemplo os termos “muito”, “bastante”, “pouco” (MARRO, SOUZA, CAVALCANTE, BEZZERA e NUNES).

Segundo Gomide, Gudwin e Tanscheit (1995), uma variável linguística é o conjunto de valores dos conjuntos Fuzzy. A Figura 5 apresenta o exemplo de baixa, média e alta para as variáveis linguísticas referentes à temperatura.

Figura 5 – Exemplo de Variáveis Linguísticas



Fonte: Gomide, Gudwin e Tanscheit (1995)

A função principal das variáveis linguísticas é aproximar, de forma sistemática, a caracterização de fenômenos complexos, permitindo analisar sistemas muito grandes com a utilização de uma descrição linguística empregada comumente por seres humanos (GOMIDE, GUDWIN, TANSCHIEIT, 1995).

2.4.4 Fuzzyficação, Inferência e Defuzzuficação

Para Simões e Shaw (2007) Fuzzyficação é a transferência através de mapeamento de números reais para o domínio Fuzzy. Sendo um pré-processamento das categorias ou classes dos sinais de entrada, a Fuzzyficação representa também a existência de atribuições de valores linguísticos e de funções de pertinência às variáveis de entrada. Na Fuzzyficação se obtém o grau de pertinência de cada entrada e de cada conjunto Fuzzy, previamente limitada ao universo em discussão. As entradas têm um grau de pertinência em cada conjunto Fuzzy (MARRO, SOUZA, CAVALCANTE, BEZZERA e NUNES).

A identificação de um sistema de regras requer, de forma subjetiva e sempre que possível conhecimento sobre o sistema. Em geral, a seleção de variáveis, partição de domínios, atribuição de termos linguísticos e função de pertinência e a descrição de regras, fazem parte da identificação do sistema de regras (RIGONI, 2009).

Interpretado por um método de inferência, o conjunto de regras elaborado pelo especialista, passa por um processo de um controlador Fuzzy. Sendo os quatro modelos mais conhecidos os de Tsukamoto e Takagi-Sugeno, que retorna uma

função para cada regra da Lógica Fuzzy, e os de Larsen e Mamdani, considerados mais clássicos e retornam um valor para cada regra (UBERTI, 2017 apud SANDRI e CORREA, 1999).

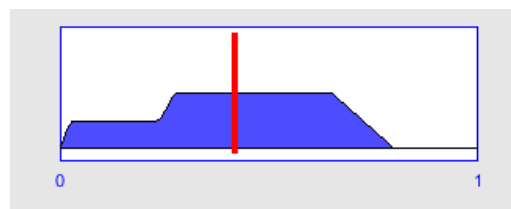
Na visão de Rigoni (2009), ao avaliar um sistema para um conjunto de entradas, de forma geral, mais de uma regra é aplicada, e desta forma, deve-se agregar os resultados para produzir uma resposta única, como acontece no controlador Fuzzy Mandani. Para Simões e Shaw (2007), o valor da variável linguística de saída, no processo de Defuzzificação, será traduzido em um valor discreto, tendo como objetivo a obtenção de um único valor numérico, assim, é o método inverso que traduz do domínio Fuzzy para o domínio discreto.

Para a realização da Defuzzificação foi escolhido o controlador de Mandani, e o método centroide, conhecido como centro de gravidade. Que segundo Aguado e Cantanhede é o método onde se considera o centro de gravidade da função de pertinência (AGUADO e CANTANHEDE apud COX, 1994). E que considera para solucionar a Lógica Fuzzy a integral de toda área de saída (UBERTI, 2017 apud ROSS, 2010).

$$x = \frac{\int \mu_A(x) * x \delta x}{\int \mu_A(x) \delta x} \quad (8)$$

A equação 8 demonstra o método matemático para determinar o valor discreto de um controlador Mandani utilizando o método centro de gravidade. A Figura 6 apresenta um exemplo de defuzzyficação deste método matemático.

Figura 6 – Ferramenta 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 6 apresenta a defuzzyficação de um conjunto de regras onde duas são ativadas. O centro de gravidade é indicado pela faixa vermelha no gráfico e representa o centro da área da função apresentada neste exemplo ou simplesmente, o resultado do controlador Fuzzy.

2.5 Trabalhos Correlatos

Com a importância da confiabilidade na realização da manutenção de equipamentos e sistemas e com o desenvolvimento de ferramentas para determinar a eficácia de processos na indústria, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos sobre o tema entre eles alguns destacados a seguir.

2.5.1 Ferramenta 01 – Índice de Confiabilidade Final

Rheinheimer (2019) criou um modelo para avaliação da confiabilidade de disjuntores de média tensão em uma planta petroquímica, buscando a otimização das manutenções dos equipamentos. Elaborada como trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica na UNISINOS, a ferramenta, que foi feita em Excel, busca a melhora na confiabilidade da manutenção, a partir de um algoritmo que, através de critérios técnicos relacionados pelo histórico de manutenção, cria um indicador da saúde do equipamento e gera a otimização do plano de manutenção dos disjuntores de MT (Média Tensão).

Diferentemente do trabalho atual, que escolheu transformadores de potência como equipamento estudado, Rheinheimer (2019) avalia as condições de disjuntores de MT, que são responsáveis pelas proteções e manobras do circuito elétrico e tem suas particularidades estudadas em seu trabalho.

Segundo o autor, foi realizado um estudo preliminar dos fatores que interferem na vida útil dos equipamentos e levado em consideração opiniões técnicas para modelagem, utilizando os conceitos de MCC, das ponderações dos fatores. O trabalho atual, também irá considerar a opinião de especialistas na modelagem dos fatores avaliados, estes em forma de funções de pertinência serão avaliados pelo software matemático Matlab.

A ferramenta de análise consiste em ponderar pesos para cada característica dos disjuntores de MT. Sendo elas de projeto, fatores relevantes externos ao equipamento ou resultados de aplicações de testes em manutenções passadas, determinando assim, o Índice de Saúde dos equipamentos.

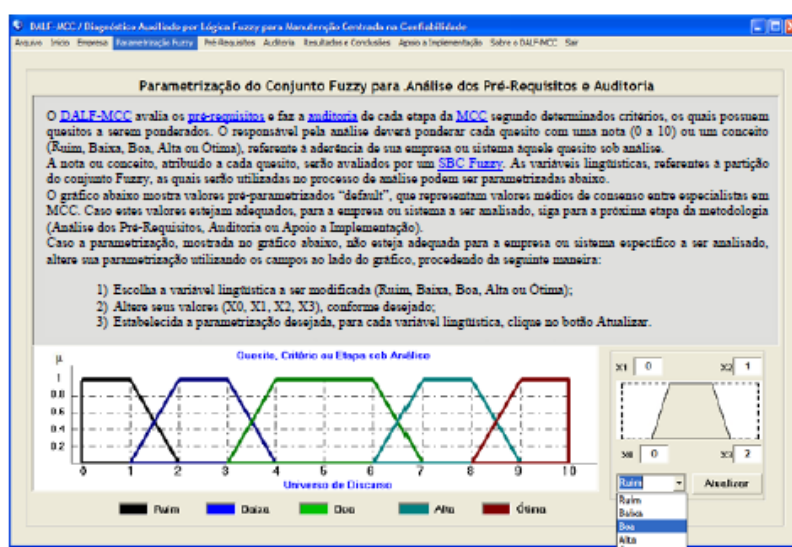
Ainda, a ferramenta analisa fatores críticos agravantes que, de mesma forma, teve a ponderação de um peso para quantificar de forma numérica a criticidade do sistema. Por fim, é determinado o índice de Confiabilidade Final do equipamento,

um indicador de sucesso para a etapa de implementação da MCC. O foco do trabalho de Rigoni (2009) é de avaliar a implementação de um processo de trabalho através da Lógica Fuzzy, enquanto o atual tem como foco a melhoria dos processos de manutenção no equipamento mais importante de uma subestação. Enquanto a ferramenta 02 trabalha com elementos administrativos do processo de manutenção o trabalho atual desenvolvido atua diretamente em equipamentos técnicos do sistema com uma abordagem direta no sítio de trabalho.

Para a aplicação de sua ferramenta foi implementado um programa computacional, chamado por Rigoni (2009) de DALF-MCC (Diagnostico Auxiliado por Lógica Fuzzy para a Manutenção Centrada na Confiabilidade) e tem sua interface criada em Visual Basic, e retorna o resultado do grau de aderência em html.

A Figura 8 mostra uma tela do programa DELF-MCC ferramenta desenvolvida pelo Dr. Rigoni.

Figura 8 – Ferramenta 02



Fonte: Rigoni (2009).

O programa criado, é utilizado exclusivamente para a montagem das funções de pertinência e a realização dos cálculos dos controladores Fuzzy Mandani. Desta forma, como proposto, Rigoni (2009) determina se as etapas de implementação de um programa de manutenção baseado na MCC atingiram o mínimo esperado no local avaliado.

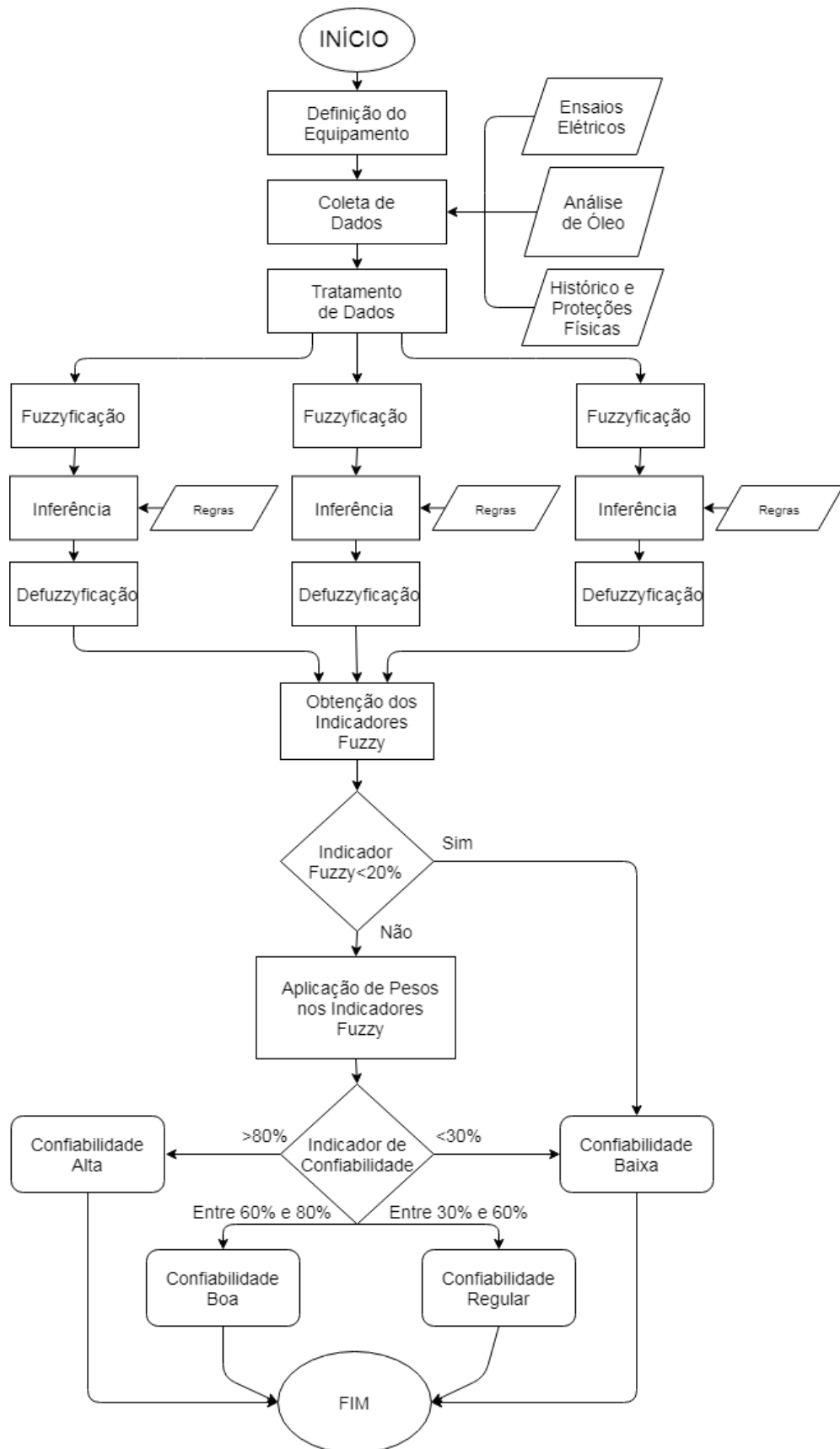
3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta para aplicação da ferramenta, que, através da Lógica Fuzzy, determina a confiabilidade dos transformadores de potência estudados neste trabalho.

Após a determinação de índice de confiabilidade, será possível estimar um percentual de confiabilidade do equipamento estudado, que por se tratar de um equipamento de alto valor monetário e de características técnicas fora de padrão de mercado, necessita de um acompanhamento especial para garantir a sua operação e prolongar sua vida útil estimada. Uma vez que sua substituição acarreta um longo investimento de tempo e dinheiro para a empresa responsável pelo sistema.

As etapas desta metodologia estão definidas e apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma da Metodologia Proposta



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nesta etapa, após a definição do equipamento, serão reunidas todas as informações do transformador analisado. Desta maneira, serão definidos os parâmetros dos blocos de análise com posterior aplicação na ferramenta Fuzzy elaborada. Por fim, uma análise dos resultados na qual se classificará a confiabilidade do equipamento no sistema. A seguir, nos próximos tópicos, serão detalhadas as etapas da análise.

3.1 Definição do Equipamento Analisado

Os transformadores de potência avaliados neste trabalho fazem parte de um sítio de manutenção contendo quatro subestações, sendo três alimentadas em 69 kV e uma em 138 kV. Cada subestação contém três transformadores trifásicos ligados em paralelo, somando uma potência instalada de 10 MVA em cada local. Os transformadores são de duplo secundário, em que a tensão fornecida para o sistema é de 1277 V. A Tabela 1 apresenta um resumo das características técnicas dos transformadores de potência considerados.

Tabela 1 – Características dos Transformadores

Transformadores de Potência Duplo Secundário				
Subestação	SEFT	SESL	SESC	SELB
Potência Unitária (MVA)	3,3	3,3	3,3	3,3
Meio Isolante	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo
Tipo	ONAN	ONAN	ONAN	ONAN
Volume do óleo (litros)	3600	6740	3000	3950
Peso Total (kg)	12500	20000	12750	13500
Classe Isolação Primário (kV)	72,5	145	72,5	72,5
Classe Isolação Secundário (kV)	12	12	3,6	20
Classe Isolação Terciário (kV)	12	12	3,6	20
Diagrama Fasorial	Dy1d0	Dy1d0	Dy1d0	Dy1d0
Impedância (%)	5,75	6,50	6,15	8,21
Ano de Fabricação	1984	1984	1998	2011

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

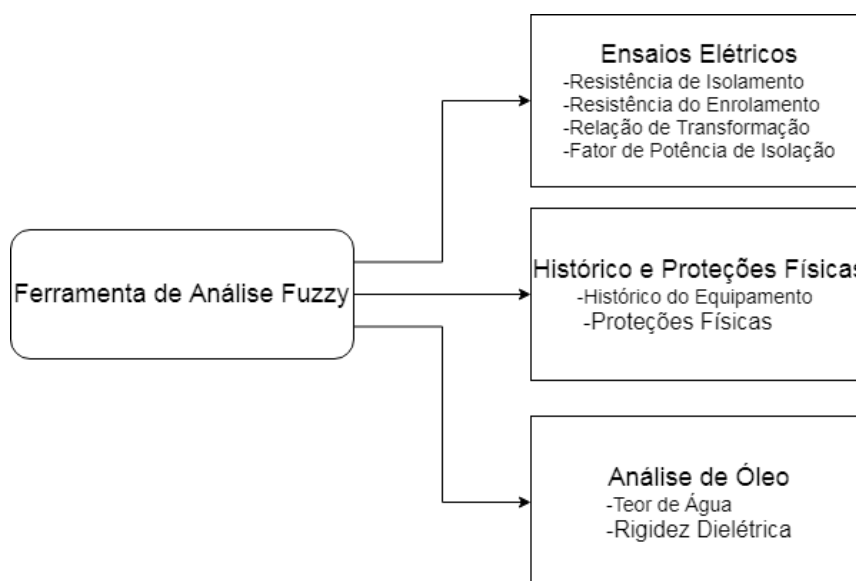
A Tabela 1 apresenta os dados dos transformadores de cada subestação, sendo elas construídas a partir de 1984 até a inauguração da última em 2011, tendo um grupo de três equipamentos idêntico em cada local.

3.2 Análise de Dados

Para a seleção das variáveis consideradas na análise do índice de confiabilidade foi observado o plano de manutenção do equipamento e seus respectivos ensaios planejados além dos conceitos abordados de MCC e FMEA.

A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos utilizado, e ilustra a estruturação da análise inicial de dados.

Figura 10 – Diagrama de blocos dos dados analisados



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Assim, foram analisados diversos parâmetros para desenvolver três blocos de estudo: os ensaios elétricos, que são realizados nas manutenções preventivas; os resultados das análises de óleo isolante, com amostras coletadas de forma periódica, e os dados históricos dos transformadores, sendo elas corretivas programadas ou não programadas.

3.2.1 Ensaio Elétrico

Os resultados dos ensaios elétricos realizados durante a manutenção preventiva dos equipamentos são analisados pela equipe de manutenção após a emissão de laudo correspondente a manutenção.

A resistência de isolamento é medida através de um equipamento chamado megôhmetro. O procedimento é bem simples: aplica-se tensão em um determinado ponto do equipamento e realiza a leitura da resistência através de um retorno conectado em um segundo ponto. O ensaio é aplicado por 10 minutos neste tipo de equipamento, com registro a cada minuto do valor lido. Os pontos de testes que são realizados neste equipamento são:

- Primário x Massa;
- Secundário x Massa;
- Terciário x Massa;
- Primário x Secundário;
- Primário x Terciário.

A resistência de enrolamento mede a resistência de cada bobina do transformador, através de um equipamento chamado microhmímetro. Realiza-se a leitura da resistência das bobinas do primário, secundário e terciário do equipamento, não podendo haver uma alta variação percentual entre os valores lidos em cada grupo de bobinas, sendo os limites estabelecidos por norma de 10%.

A equação 9 mostra o modelo de cálculo para determinar a variação percentual entre as bobinas.

$$\Delta\% = \frac{R_{maior} - R_{menor}}{R_{maior}} \times 100 \quad (9)$$

A relação de transformação é obtida através da aplicação de tensão em uma bobina do primário do transformador e realizando, através do equipamento comumente chamado de TTR, a leitura de tensão proporcional no secundário do equipamento obtendo, assim, a relação real de transformação entre os bobinados do transformador. Aplica-se este teste entre primário x secundário e primário x terciário, observando o diagrama fasorial do transformador e realizando a leitura conforme os pares de bobinas correspondentes. Neste teste, o resultado lido não deve ter uma grande variação percentual entre o resultado e a relação teórica calculada de transformação.

A equação 10 mostra o erro da transformação calculado entre a relação teórica e a relação medida.

$$E\% = \frac{Relação_{med} - Relação_{calc}}{R_{calc}} \times 100 \quad (10)$$

Por fim, o último ensaio elétrico avaliado é o fator de potência de isolamento. Ele também mede a isolamento do equipamento entre os pontos avaliados, realizado na frequência nominal do transformador. Este teste realiza a leitura das perdas em todo material isolante do equipamento, verificando as condições dos materiais isolantes através das perdas dielétricas em watts e volt-ampere do equipamento ensaiado, podendo assim ser calculado o fator de potência. As configurações de teste no equipamento estão apresentadas abaixo e os resultados obtidos não devem ser superiores a 1% de perda.

- Primário x (Secundário + Massa);
- Primário x (Terciário + Massa);
- Primário x Secundário;
- Primário x Terciário;
- Primário x Massa;
- Secundário x (Primário + Massa);
- Secundário x Primário;
- Secundário x Massa;
- Terciário x (Primário + Massa);
- Terciário x Primário;
- Terciário x Massa;
- Bucha Fase R;
- Bucha Fase S;
- Bucha Fase T.

3.2.2 Histórico e Proteções Físicas

Uma forma de manutenção preditiva é a inspeção visual das instalações e equipamentos. Assim, neste bloco, são verificadas as proteções físicas dos transformadores de potência, além da análise do histórico de intervenções no mesmo classificado como corretiva programada.

As proteções físicas têm seu funcionamento testado nas manutenções preventivas e são frequentemente verificadas através de inspeção visual e através de um painel anunciador de alarmes. Complementarmente, são verificados válvulas e juntas do transformador, avaliando e mapeando vazamentos de líquido isolante.

Ainda, periodicamente é realizada uma termografia no equipamento com uma periodicidade maior em relação à inspeção visual. Esta termografia verifica a correta transferência de calor do núcleo para as extremidades do equipamento e o correto funcionamento dos radiadores, nos quais deve haver a dissipação maior do calor emitido pelo transformador.

Serão consideradas, portanto, as duas variáveis, sendo o Histórico do Equipamento, onde irá verificar-se as intervenções corretivas nos últimos 5 anos, e Proteções Físicas, onde serão verificados alarmes e atuações, nos últimos 5 anos, de alguma proteção crítica ou urgente relacionada com os transformadores considerados.

3.2.3 Análise de Óleo

A análise de óleo é realizada por laboratório especializado e é realizada sempre que há interferência no equipamento onde se manuseia o líquido isolante, como por exemplo, correção de vazamentos ou substituição de juntas dos radiadores. Estes procedimentos exigem a retirada do óleo em parte para realização da manutenção corretiva do equipamento. Desta maneira, antes de realizar a reenergização do equipamento há o tratamento do líquido isolante através de termo à vácuo e se realizam análises laboratoriais para verificação de suas características.

Serão consideradas como variável de entrada do modelo o teor de água, em partículas por milhão (ppm), e a rigidez dielétrica, em kV.

3.3 Tratamento e Seleção de Dados

Devido à necessidade de padronizar os dados dos equipamentos em análise e devido à variedade de testes realizados em cada ensaio elétrico, se faz necessário uma avaliação previa para realizar o tratamento dos dados e a seleção dos valores que serão aplicados na ferramenta Fuzzy.

A variável resistência de isolação necessita, de forma breve, do tratamento dos dados analisados. Os valores obtidos nas manutenções serão divididos pela classe de isolação do equipamento, obtendo um valor de isolação por tensão de trabalho, em MΩ/kV.

A Equação 11 exemplifica esta etapa. Por fim, cada transformador tem cinco valores distintos de isolação, dependendo do ensaio realizado, para aplicação na ferramenta Fuzzy será aplicada o pior caso, sendo este o menor valor encontrado.

$$\text{Isolação por classe de tensão} = \frac{\text{Valor medido de Isolação (M}\Omega\text{)}}{\text{Classe de isolação (kV)}} \quad (11)$$

Explicando a equação 11, se um determinado ensaio apresentar valores de 5000 MΩ entre primário e massa e o equipamento for da classe de tensão 72,5 kV, o valor para ser submetido a ferramenta Fuzzy é de aproximadamente 69 MΩ/kV.

Para as variáveis de resistência do bobinado e relação de transformação eis que após a manutenção são avaliadas em um valor percentual da variação entre os ensaios semelhantes. Para a resistência do bobinado, no qual há três conjuntos de ensaios realizados - no primário, no secundário e no terciário -, será utilizada a maior variação encontrada. Para a relação de transformação, de mesma forma, serão avaliados os dois ensaios realizados e será submetido à ferramenta a maior variação encontrada.

O fator de potência de isolação tem catorze ensaios durante a manutenção preventiva e o resultado se dá através de um percentual. Nesta forma, novamente será utilizado o pior caso, ou seja, o maior valor, para a aplicação na ferramenta Fuzzy.

Os demais blocos terão os dados analisados de forma direta, ou seja, o bloco denominado Coleta de Óleo, terá os valores escalares de laboratório diretamente submetidos à ferramenta Fuzzy. Já o bloco referente a Histórico e Proteções Físicas será analisado através de informações coletadas diretamente de planilhas de controle e registro utilizadas pela equipe de manutenção.

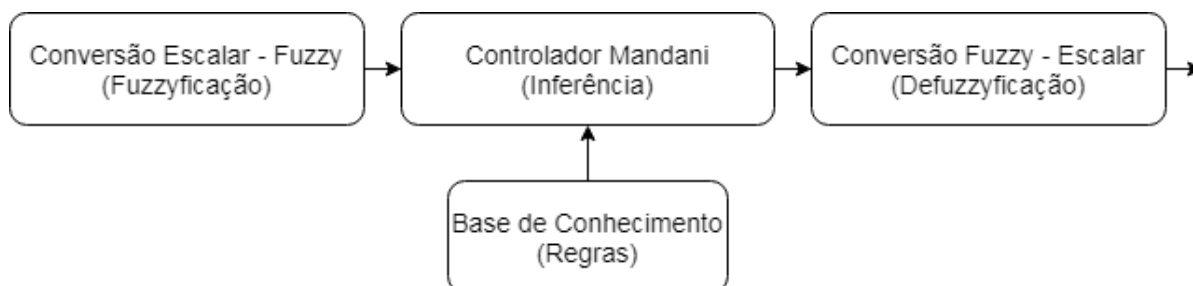
3.4 Ferramenta Fuzzy

Cada uma das variáveis analisadas neste trabalho e seus conjuntos de dados utilizados como entrada tem seus conjuntos de regras conforme normativas e opiniões de especialistas que trabalham na área de manutenção de transformadores e subestações.

As variáveis de entrada utilizadas foram divididas em três sistemas Fuzzy completos, com Fuzzyficação, inferência e Defuzzyficação. Foram criados conforme seu grupo de análise: ensaios elétricos, coleta de óleo e histórico. Desta forma foram criados três indicadores Fuzzy: Ensaios Elétricos que analisa quatro variáveis de entrada, Análise de Óleo, que analisa duas variáveis de entrada e Histórico e Proteções Físicas, que também analisa duas variáveis de entrada.

A Figura 11 apresenta um esquema simplificado das etapas realizadas nas ferramentas Fuzzy deste trabalho:

Figura 11 – Diagrama de blocos Ferramenta Fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

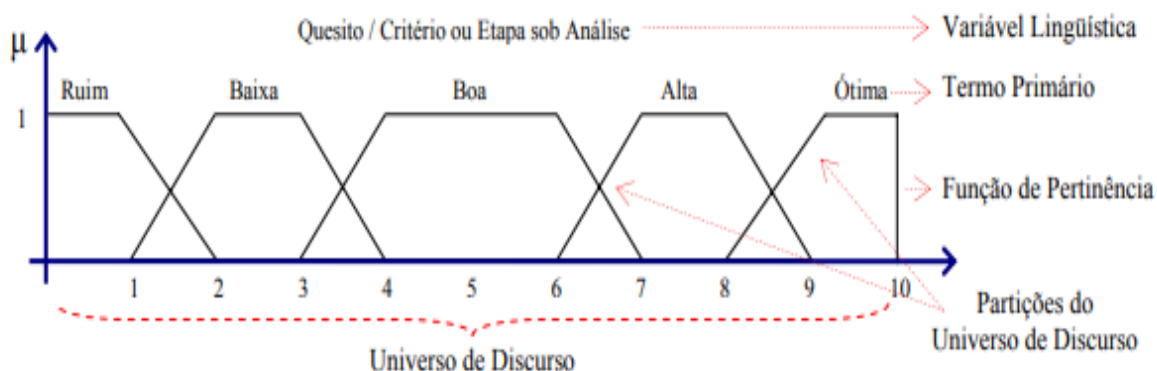
As funções de pertinência e as variáveis linguísticas foram modeladas de acordo com os dados analisados de forma a transformar os dados escalares em termos fuzzyficionados, para que através do controlador Mandani e seu conjunto de regras fossem possíveis a defuzzyficação e, então, retornarmos com um termo escalar e este será o índice Fuzzy deste bloco específico.

3.4.1 Fuzzyficação

A primeira etapa da ferramenta Fuzzy aplicada é a Fuzzyficação das variáveis analisadas. As oito variáveis de entrada analisada serão transformadas de valores escalares para valores Fuzzy, sendo analisadas em variáveis linguísticas através das funções de pertinência.

A Figura 12 demonstra a relação das funções de pertinência com as variáveis linguística.

Figura 12 – Função de pertinência – Fuzzyficação de variáveis



Fonte: Rigoni (2009).

Na montagem do conjunto de funções de pertinência é levado em consideração a opinião de cinco especialistas, que trabalham na área de manutenção elétrica, e que detém o conhecimento específico relacionado a estes equipamentos. Estes cinco especialistas atuam em diversas áreas, desde a engenharia do sistema até a atuação direta no equipamento, sendo engenheiros eletricitas e supervisores de manutenção.

Para isto foi aplicado um questionário aos entrevistados, conforme apêndice A deste trabalho acadêmico, onde os especialistas responderam conforme suas experiências profissionais. Após, foi realizada uma média das respostas em cada uma das variáveis de entrada, gerando um intervalo de valores considerados como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom” e estes serão utilizados para a elaboração das funções de pertencimento e conjunto de regras da ferramenta.

Devido algumas divergências nas respostas dos especialistas e para a montagem linear das funções de pertinência, foram utilizados valores convergentes em cada função. Neste método foram Fuzzyficadas as variáveis de entrada deste trabalho.

Ainda, a soma de todas as funções de pertinência gera o valor unitário de pertencimento, ou seja, em qualquer ponto das variáveis de entrada e saída, o resultado estará enquadrado em um pertencimento unitário.

3.4.1.1 Fuzzyficação da Variável Resistência de Isolação

A variável resistência de isolação é analisada em $M\Omega/kV$ e tem conforme NBR7036/1990 valores mínimos admissíveis, para líquido isolante a $75^{\circ}C$, o valor de $1,5 M\Omega/kV$. Conforme avaliações dos especialistas foram consideradas quatro funções de pertinência demonstradas na Tabela 2, sendo elas: Muito Ruim, Ruim, Regular/Bom e Muito Bom.

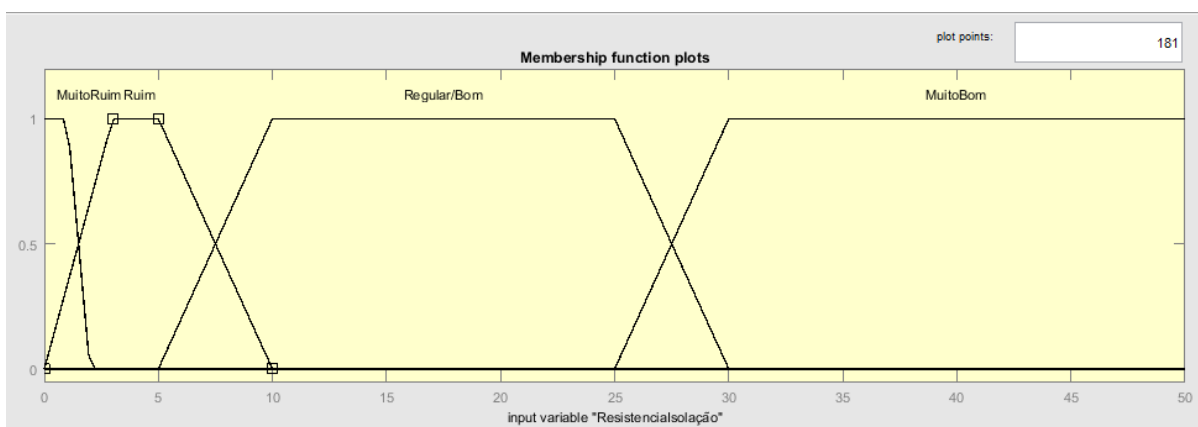
Tabela 2 – Parâmetros da Variável Resistência de Isolação

Resistência de Isolação		Valores ($M\Omega/kV$)			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Ruim	Trapezoidal	0	0	1	2
Ruim	Trapezoidal	0	3	5	10
Regular/Bom	Trapezoidal	5	10	25	30
Muito Bom	Trapezoidal	25	30	50	50

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 13 transcreve os valores da Tabela 2 graficamente, modificando os valores de $M\Omega/kV$ para o universo discursivo adotado neste trabalho.

Figura 13 – Função de Pertinência da Variável Resistência de Isolação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Como opinião, os entrevistados consideraram valores de até $5 M\Omega/kV$ como ruim ou muito ruim, mesmo estando, em sua maioria, acima dos valores mínimos por norma. O fato de estes valores serem considerados aceitáveis pela NBR7036/1990 não impede de classificá-los de forma ruim, pois nesta variável, os especialistas, consideraram apenas valores maiores como bons. Ainda, para as respostas médias

dos entrevistados, se fez necessário adaptar as funções Regular e Bom em apenas uma função de pertinência.

3.4.1.2 Fuzzyficação da Variável Resistência do Bobinado

A variável resistência de Enrolamento tem valores analisados em percentual e conforme NBR5356/2014 o valor máximo admissível para variação dos valores ôhmicos dos bobinados é de 10%. Foram considerados quatro funções de pertinência demonstradas na Tabela 3, sendo elas Muito Ruim, Regular/Ruim, Bom e Muito Bom.

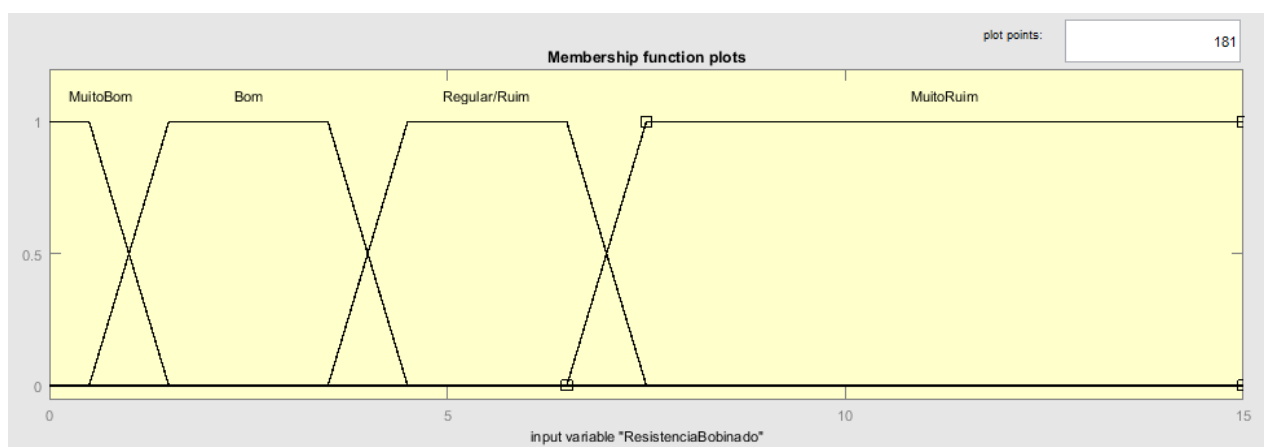
Tabela 3 – Parâmetros da Variável Resistência do Bobinado

Resistência do Bobinado		Valores (%)			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Bom	Trapezoidal	0	0	0,5	1,5
Bom	Trapezoidal	0,5	1,5	3,5	4,5
Regular/Ruim	Trapezoidal	3,5	4,5	6,5	7,5
Muito Ruim	Trapezoidal	6,5	7,5	15	15

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 14 apresenta graficamente as funções de pertinência desta variável.

Figura 14 – Função de Pertinência da Variável Resistência do Bobinado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os especialistas, nesta variável, consideraram o valor máximo admitido por norma como muito ruim, mesmo sendo admitida pela NBR5356/2014. Uma variação de 10% não é classificada pelos entrevistados com parâmetros positivos. Apenas

valores de 0 a 0,5% tem seu pertencimento unitário na função Muito Bom e de 1,5 a 3,5% tem seu pertencimento unitário na função Bom.

3.4.1.3 Fuzzyficação da Variável Relação de Transformação

Segundo a NBR5356/2014 a variação máxima para a relação de transformação em transformadores de potência é de 0,5%. Sendo assim, a variável Relação de Transformação será analisada de acordo com quatro funções de pertinência.

A Tabela 4 demonstra os parâmetros destas funções e seus respectivos valores correlatos.

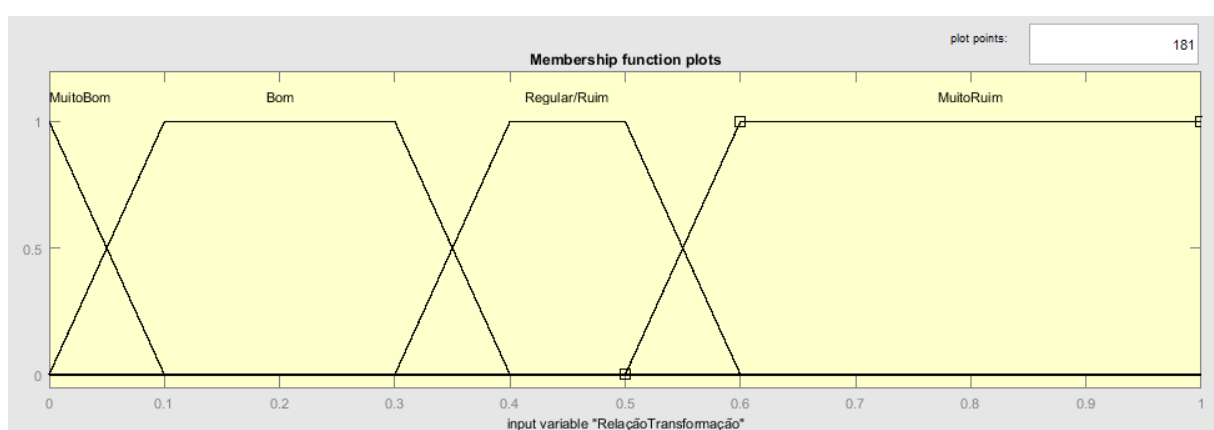
Tabela 4 – Parâmetros da Variável Relação de Transformação

Relação de Transformação		Valores (%)			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Bom	Triangular	0	0	-	0,1
Bom	Trapezoidal	0	0,1	0,3	0,4
Regular/Ruim	Trapezoidal	0,3	0,4	0,5	0,6
Muito Ruim	Trapezoidal	0,5	0,6	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 15 apresenta graficamente as funções de pertinência desta variável:

Figura 15 – Função de Pertinência da Variável Relação de Transformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os entrevistados, com base em suas experiências, consideraram o valor máximo admitido por norma como Regular/Ruim, pois a variação entre a variação teórica e a variação medida é item crítico para o funcionamento do transformador, já

que são valores muito discrepantes oriundos de falhas internas nas bobinas dos transformadores. Não obstante, apenas valores idênticos entre o medido e o calculado foram classificados como Muito Bom.

3.4.1.4 Fuzzyficação da Variável Fator de Potência de Isolação

Para a variável Fator de Potência de Isolação o valor máximo admissível considerado é de 1%. Desta maneira, este é o valor balizado com regular/ruim. Foram considerados quatro funções de pertinência demonstradas na Tabela 5, sendo elas Muito Ruim, Regular/Ruim, Bom e Muito Bom.

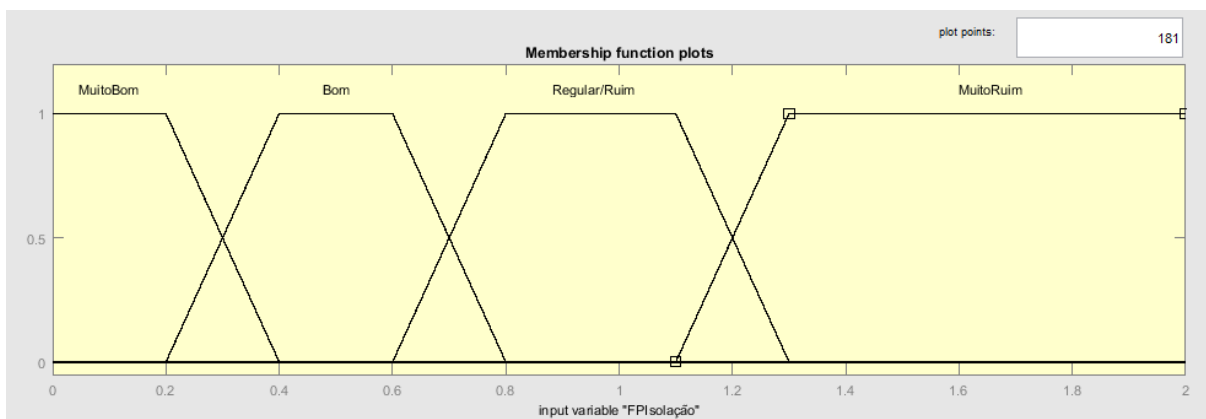
Tabela 5 – Parâmetros da Variável Fator de Potência de Isolação

Fator de Potência de Isolação		Valores (%)			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Bom	Trapezoidal	0	0	0,2	0,4
Bom	Trapezoidal	0,2	0,4	0,6	0,8
Regular/Ruim	Trapezoidal	0,6	0,8	1,1	1,3
Muito Ruim	Trapezoidal	1,1	1,3	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 16 apresenta graficamente as funções de pertinência desta variável.

Figura 16 – Função de Pertinência da Variável Fator de Potência de Isolação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Foram adaptadas as respostas dos especialistas, que consideram o valor máximo admitido por norma com Regular/Ruim, em quatro funções. Os entrevistados, determinaram valores até 0,2% como Muito Bom e valores de 0,4 a

0,6% com o grau de pertencimento unitário como Bom. Ainda, apenas valores superiores a 1,3% foram considerados Muito Ruim.

3.4.1.5 Fuzzyficação da Variável Histórico

Para a variável Histórico, serão analisados os quantitativos de intervenções no equipamento para correções de falhas de forma programada. Para esta variável foram considerados quatro funções de pertinência demonstradas na Tabela 6.

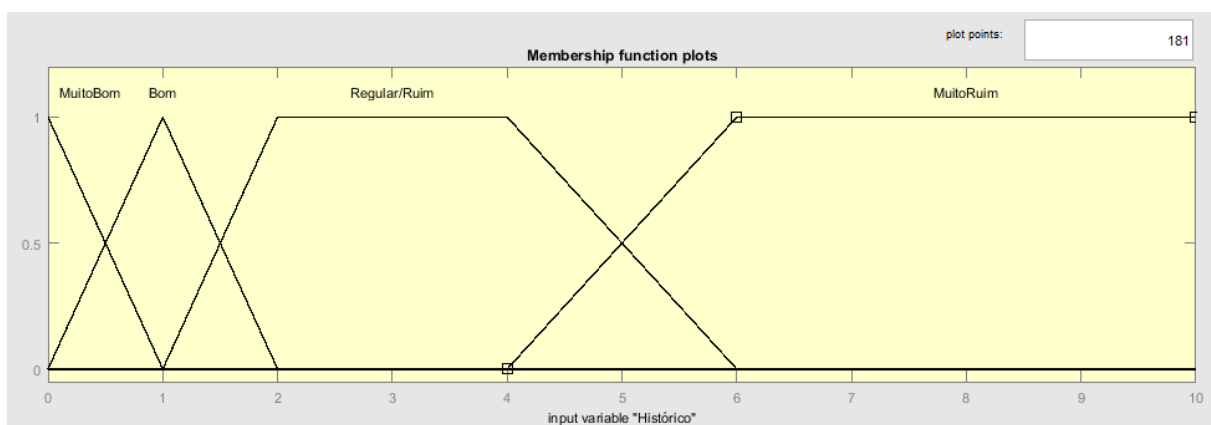
Tabela 6 – Parâmetros da Variável Histórico

Histórico de Intervenções		Valores			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Bom	Triangular	0	0	-	1
Bom	Triangular	0	1	-	2
Regular/Ruim	Trapezoidal	1	2	4	6
Muito Ruim	Trapezoidal	4	6	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 17 demonstra graficamente as funções criadas para esta variável.

Figura 17 – Função de Pertinência da Variável Histórico



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os especialistas classificaram como muito bom apenas o equipamento que não teve nenhuma intervenção programada nos últimos 5 anos, e como Bom os equipamentos que tiveram apenas uma intervenção.

3.4.1.6 Fuzzyficação da Variável Proteção Física

Por sua vez, a variável Proteção Física avaliará de forma quantitativa as intervenções emergenciais no equipamento causadas por defeitos graves vistos pelas proteções físicas do transformador. A Tabela 7 demonstram as funções criadas para esta variável.

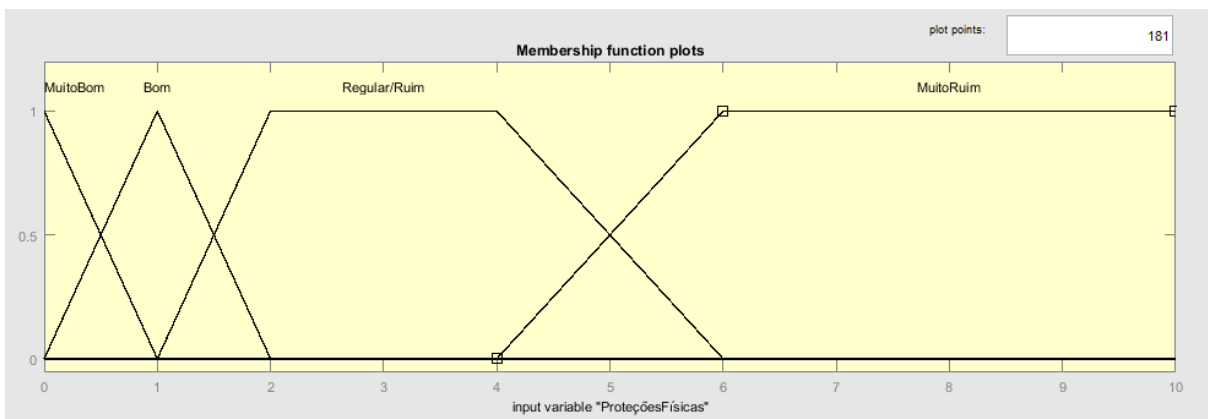
Tabela 7 – Parâmetros da Variável Proteção Física

Histórico de Inspeções		Valores			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Bom	Triangular	0	0	-	1
Bom	Triangular	0	1	-	2
Regular/Ruim	Trapezoidal	1	2	4	6
Muito Ruim	Trapezoidal	4	6	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 18 transcreve os valores das funções graficamente.

Figura 18 – Função de Pertinência da Variável Proteção Física



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De mesma forma, os entrevistados, com base em suas experiências, classificaram como muito bom apenas o equipamento que não teve nenhuma falha nas proteções físicas do equipamento e como Bom os equipamentos que tiveram apenas uma intervenção.

3.4.1.7 Fuzzyficação da Variável Teor de Água

A variável teor de água é analisada em ppm e tem conforme NBR10710/2006 valores máximos admissíveis de 40 ppm. Assim, este valor será considerado como ruim. Foram considerados cinco funções de pertinência demonstradas na Tabela 8, sendo elas Muito Ruim, Ruim, Regular, Bom e Muito Bom.

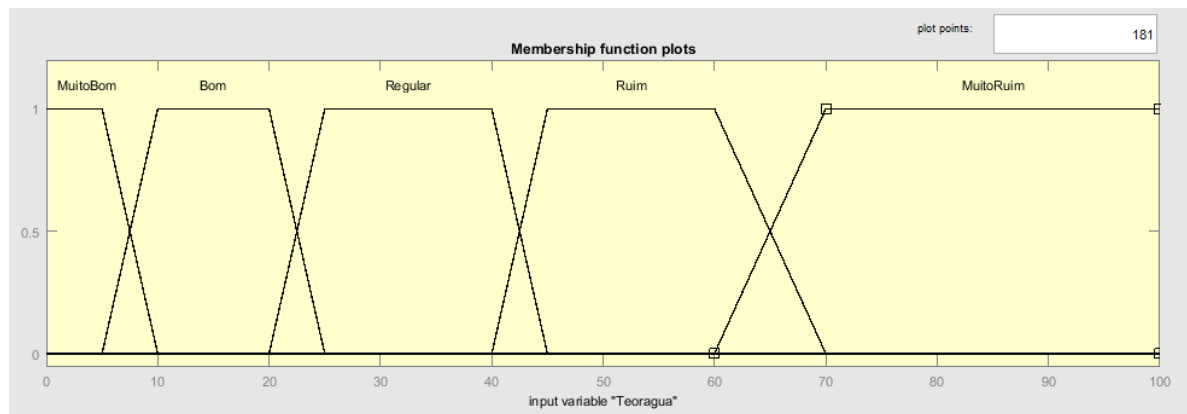
Tabela 8 – Parâmetros da Variável Teor de Água

Teor de Água		Valores (ppm)			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Bom	Trapezoidal	0	0	5	10
Bom	Trapezoidal	5	10	20	25
Regular	Trapezoidal	20	25	40	45
Ruim	Trapezoidal	40	45	60	70
Muito Ruim	Trapezoidal	60	70	100	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 19 transcreve os valores da Tabela 8 graficamente, para posterior aplicação da ferramenta Fuzzy adotada neste trabalho.

Figura 19 – Função de Pertinência da Variável Teor de Água



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Como opinião, os entrevistados consideraram o valor de 40 ppm, limite admitido pela norma, como Regular. O fato de este valor ser considerado aceitável pela NBR10710/2006 não impede de classificá-los de forma regular, pois nesta variável, os especialistas, consideraram apenas valores menores a 20 ppm como bom ou muito bom.

3.4.1.8 Fuzzyficação da Variável Rigidez Dielétrica

A variável rigidez dielétrica é analisada em kV e tem conforme NBR-IEC60156/2004 valores mínimos admissíveis de 40 kV. A Tabela 9 apresenta as funções de pertinência desta variável.

Tabela 9 – Parâmetros da Variável Rigidez Dielétrica

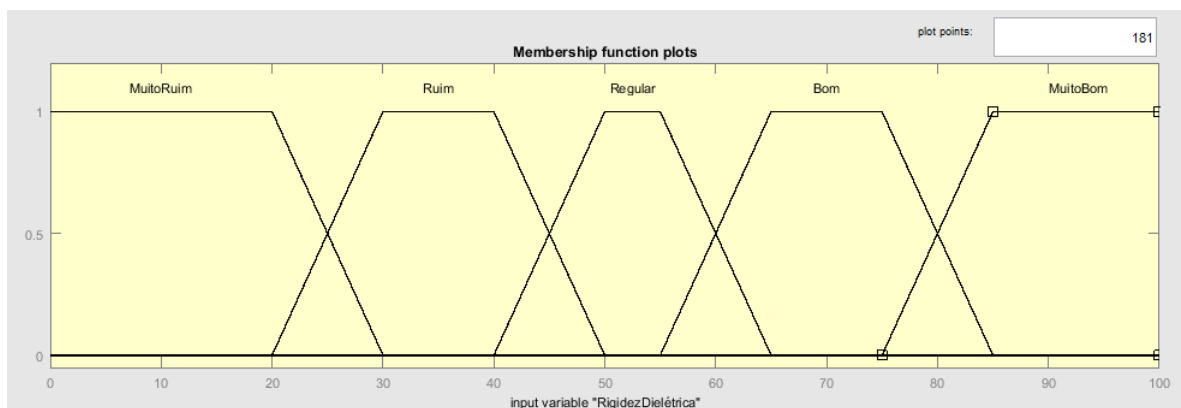
Rigidez Dielétrica		Valores (kV)			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Ruim	Trapezoidal	0	0	20	30
Ruim	Trapezoidal	20	30	40	50
Regular	Trapezoidal	40	50	55	65
Bom	Trapezoidal	55	65	75	85
Muito Bom	Trapezoidal	75	85	100	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os especialistas, com base em suas experiências, consideraram o valor mínimo admitido por norma como Ruim. Apenas valores de 65 a 75 kV tem seu pertencimento unitário na função Bom e valores maiores de 85 kV tem seu pertencimento unitário na função Muito Bom, sendo estes os valores desejados em uma classificação mais positiva do ensaio analisado na variável.

A Figura 20 transcreve os valores da Tabela 9 graficamente, apresentando as funções de pertencimento da referida variável.

Figura 20 – Função de Pertinência da Variável Rigidez Dielétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Desta forma foram apresentadas as oito variáveis de entrada e suas funções de pertencimento. Foram fuzzyficadas conforme a opinião dos especialistas e aplicadas no Toolbox Fuzzy do software Matlab.

3.4.2 Inferência

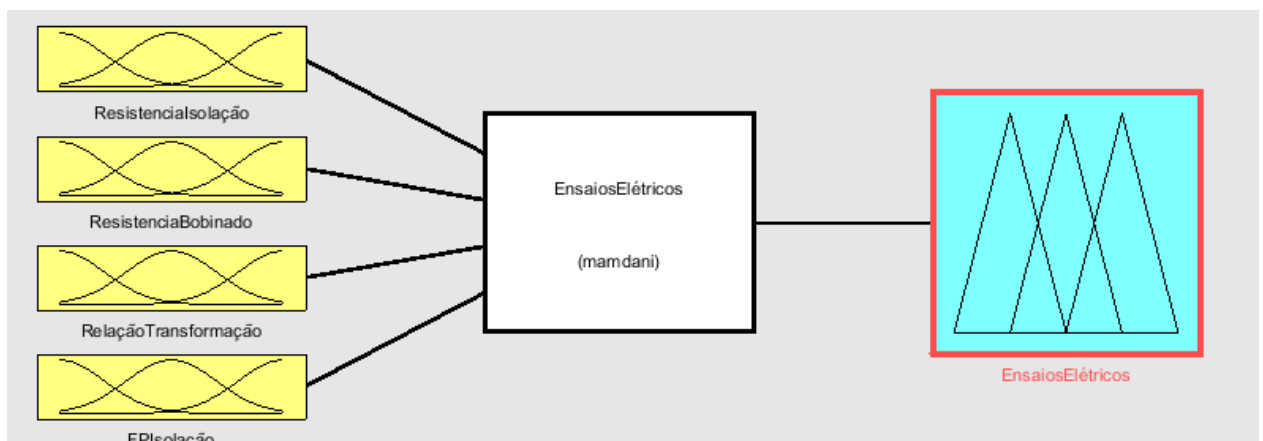
Nesta etapa serão aplicadas as regras criadas como base de conhecimento nas variáveis Fuzzyficadas. Serão criados três controladores Mandani para avaliação através do centro de gravidade das regras impostas. Os controladores serão chamados de Ensaio Elétrico, Histórico e Proteções Físicas, e Análise de Óleo.

Para a montagem das regras, foi classificada cada função de pertinência em cada variável de entrada, assim, as funções tiveram pesos atribuídos sendo 1 para as funções consideradas piores e aumentando uma unidade a cada função relativamente melhor que a anterior. Como exemplo, na variável Teor de Água, a função muito ruim ganhou peso 1 enquanto a função muito bom ganhou peso 5.

Desta maneira para formação da regra e classificação na variável de saída foram somados estes pesos e distribuídos proporcionalmente entre as possibilidades das funções da variável de saída. Serão apresentadas no Apêndice B deste trabalho as regras criadas, juntamente com algoritmo Fuzzy da programação do Matlab.

A Figura 21 apresenta a estrutura do controlador Ensaio Elétrico, com suas quatro variáveis de entrada resultando em uma de saída. Este controlador avalia todos os ensaios elétricos realizados em uma manutenção periódica deste equipamento. Este controlador tem 256 regras.

Figura 21 – Controlador Ensaio Elétrico

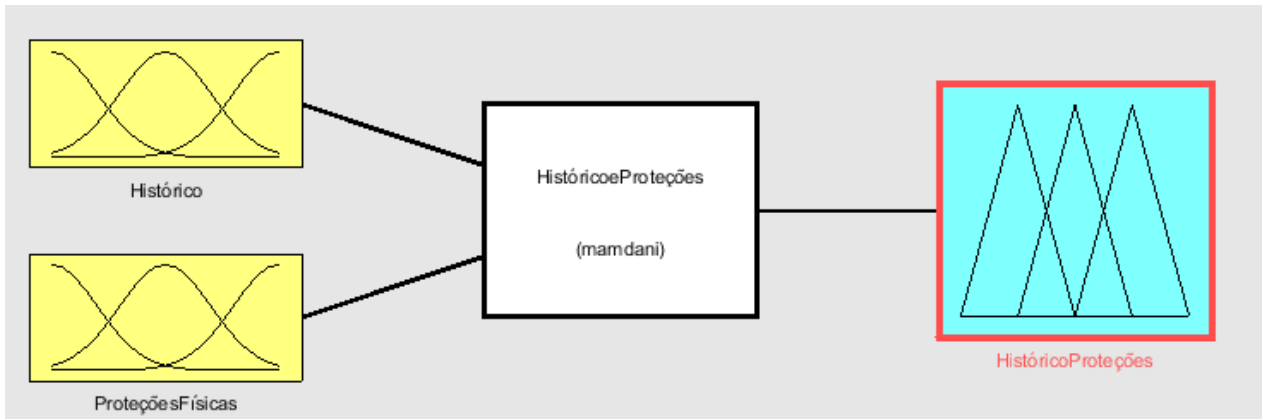


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 22 apresenta a estrutura do controlador Histórico e Proteções Físicas, com suas duas variáveis de entrada resultando em uma de saída. Este

controlador avalia todo o histórico de falhas do equipamento e atuações das proteções físicas dos transformadores de potência. Este controlador tem 16 regras.

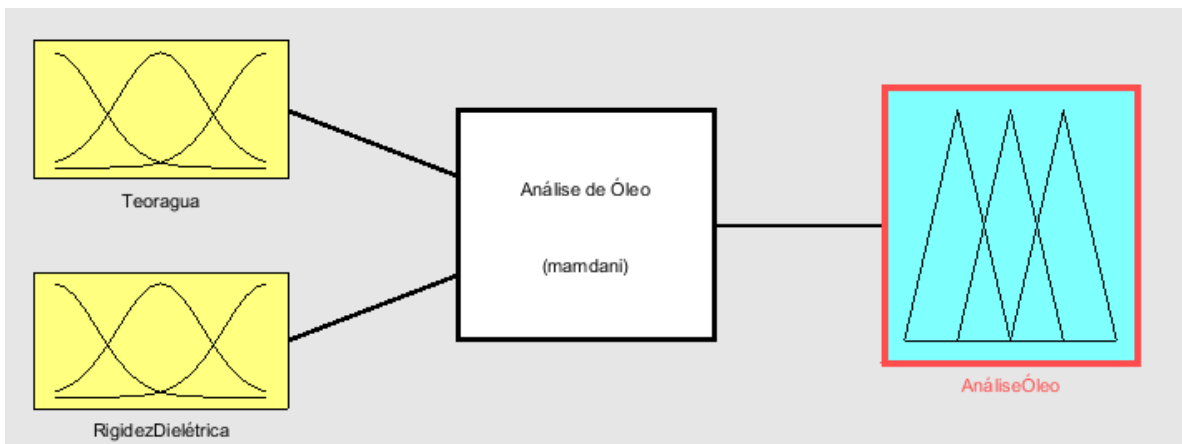
Figura 22 – Controlador Histórico e Proteções Físicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O controlador Análise de Óleo é formado por duas variáveis de entrada e uma de saída. Este controlador avalia os parâmetros do líquido isolante do transformador. A Figura 23 apresenta a estrutura do controlador. Este controlador tem 25 regras.

Figura 23 – Controlador Análise de Óleo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os três controladores Mamdani desenvolvidos e suas regras foram aplicadas de forma respectiva nos controladores criados no Toolbox Fuzzy no software Matlab.

3.4.3 Defuzzyficação

Após as etapas de Fuzzyficação e do processo de inferência Fuzzy, os três controladores Mandani utilizados terão seus resultados convertidos para um valor escalar e este será o indicador Fuzzy do controlador analisado. O resultado é obtido pela soma das integrais das funções de pertinência do sistema multiplicadas pelo seu centro de gravidade, sendo dividido pela soma das integrais das funções de pertinência. Será utilizado o programa Matlab para realização dos cálculos matemáticos para a determinação dos índices Fuzzy.

Para a Defuzzyficação foram criadas funções em cada controlador, sendo o índice Fuzzy referente aos Ensaio Elétricos parametrizados conforme a Tabela 10.

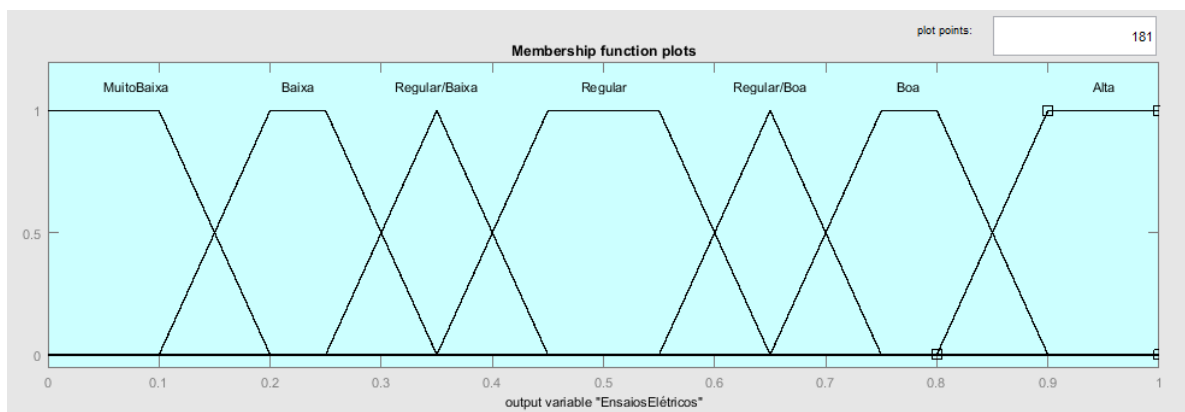
Tabela 10 – Parâmetros da Variável de saída Ensaio Elétricos

Ensaio Elétricos		Valores			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Baixa	Trapezoidal	0	0	0,1	0,2
Baixa	Trapezoidal	0,1	0,2	0,25	0,35
Regular/Baixa	Triangular	0,25	0,35	-	0,45
Regular	Trapezoidal	0,35	0,45	0,55	0,65
Regular/Boa	Triangular	0,55	0,65	-	0,75
Boa	Trapezoidal	0,65	0,75	0,8	0,9
Alta	Trapezoidal	0,8	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 24 demonstra graficamente as sete funções criadas, sendo elas Muito Baixa, Baixa, Regular/Baixa, Regular, Regular/Boa, Boa e Alta:

Figura 24 – Variável de Saída - Ensaio Elétricos



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por sua vez, o controlador Histórico e Proteções Físicas tem sua variável de saída dividida em cinco funções, Muito Baixa, Baixa, Regular, Boa e Alta. A Tabela 11 apresenta a parametrização do referida variável de saída.

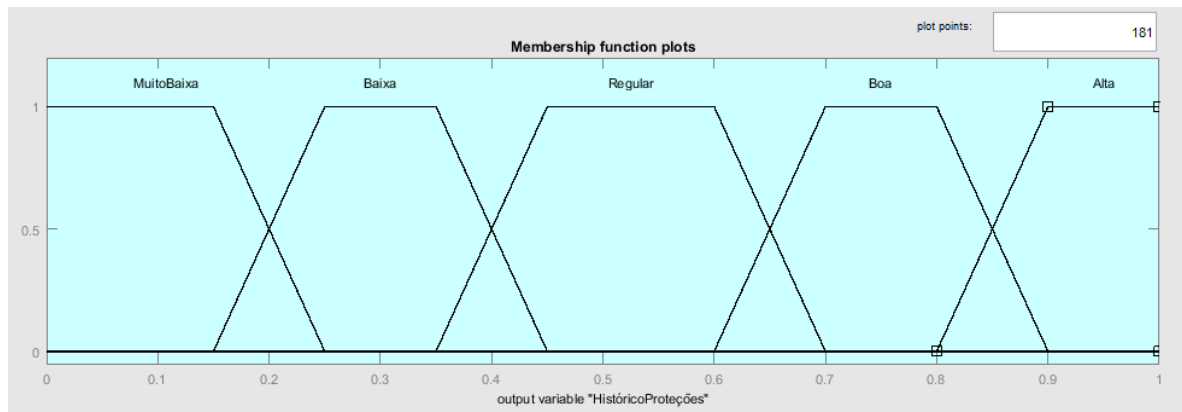
Tabela 11 – Parâmetros da Variável de Saída Histórico e Proteções Físicas

Histórico e Proteções Físicas		Valores			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Baixa	Trapezoidal	0	0	0,15	0,25
Baixa	Trapezoidal	0,15	0,25	0,35	0,45
Regular	Trapezoidal	0,35	0,45	0,6	0,7
Boa	Trapezoidal	0,6	0,7	0,8	0,9
Alta	Trapezoidal	0,8	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 25 demonstra graficamente as cinco funções trapezoidais elaboradas para a variável de saída Histórico e Proteções Físicas:

Figura 25 – Variável de Saída - Histórico e Proteções Físicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, o controlador Análise de Óleo tem sua variável de saída dividida em também cinco funções.

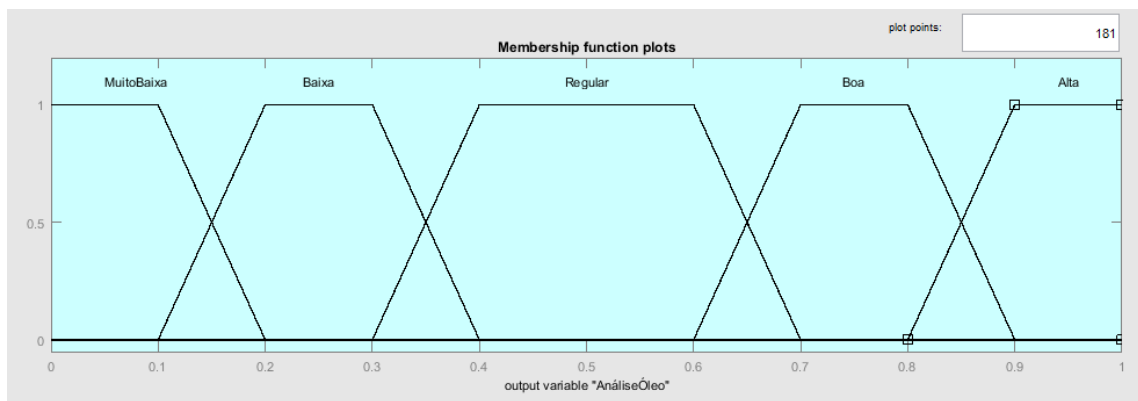
A Tabela 12 e a Figura 26 demonstram os parâmetros de saída:

Tabela 12 – Parâmetros da Variável de saída Análise de Óleo

Análise de Óleo		Valores			
Conjunto	Função	a	m	n	b
Muito Baixa	Trapezoidal	0	0	0,1	0,2
Baixa	Trapezoidal	0,1	0,2	0,3	0,4
Regular	Trapezoidal	0,3	0,4	0,6	0,7
Boa	Trapezoidal	0,6	0,7	0,8	0,9
Alta	Trapezoidal	0,8	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 26 – Variável de Saída - Análise de Óleo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após a defuzzyficação, onde se obtêm os três valores numéricos dos controladores Mandani, se inicia a classificação dos equipamentos conforme resultados em comparação a sua confiabilidade.

3.5 Análise de indicadores Fuzzy

A análise dos indicadores Fuzzy precede a análise do indicador final de confiabilidade. Uma vez que se obtêm os três valores numéricos dos controladores Mandani, se qualquer um dos indicadores Fuzzy apresentar valores inferiores a 20%, isto implicará a indicação de confiabilidade baixa no equipamento estudado, independentemente do valor calculado no indicador de confiabilidade de forma ponderada. Esta avaliação visa verificar sua confiabilidade em relação ao sistema de forma individualizada.

Após esta análise será calculado o indicador final de confiabilidade.

3.6 Indicador de Confiabilidade

O indicador de confiabilidade, índice final de estudo deste trabalho, será calculado através da média ponderada dos três indicadores criados através da ferramenta Fuzzy. Ainda nesse contexto, a opinião dos especialistas ajudou a ponderar o grau de importância de cada bloco de variáveis. A Tabela 13 apresenta os valores obtidos nas entrevistas.

Tabela 13 – Características dos transformadores

Bloco	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5
Ensaio Elétricos	5	4	4	4	4
Análise de Óleo	5	5	5	3	5
Histórico	4	3	3	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Tabela 13 cada especialista determinou o grau de importância de cada bloco analisado, seguindo a classificação 5 – extremamente importante; 4 – muito importante; 3 – importante; 2 – pouco importante; e 1 – nenhum pouco importante.

Assim, foram determinados os pesos de cada indicador Fuzzy no indicador final de confiabilidade, sendo eles apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Ponderação dos Indicadores Parciais

Controlador	Ponderação
Ensaio Elétricos	35%
Histórico e Proteções Físicas	20%
Análise de Óleo	45%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com base nos conhecimentos prévios dos controladores e da opinião dos especialistas o controlador Ensaio Elétricos terá peso de 35%. Seus valores são obtidos anualmente na manutenção preventiva e valores insatisfatórios podem ocasionar uma falha grave necessitando de manutenções corretivas com alto custo.

Já o controlador Histórico e Proteções Físicas terá peso de 20% uma vez que, no mínimo, são inspecionados os equipamentos semanalmente. Atuações deste bloco, embora gerem uma parada no equipamento, podem ser acompanhadas e detectadas rapidamente.

O controlador Análise de Óleo terá peso de 45%. Este bloco de variáveis também é obtido durante a manutenção preventiva anual. Contudo, há a

possibilidade de análises em períodos menores já que o registro é em local acessível. Valores insatisfatórios desta variável, embora gerem paradas de manutenção, podem ser corrigidas de forma mais simples, pois envolvem apenas o meio isolante.

Após a ponderação dos resultados o indicador de confiabilidade será convertido em uma classificação, sendo elas: Confiabilidade Baixa, Confiabilidade Regular, Confiabilidade Boa e Confiabilidade Alta.

A conversão deste valor será apresentada na Tabela 15:

Tabela 15 – Classificação do Indicador de Confiabilidade

Confiabilidade			
Baixa	Regular	Boa	Alta
<30%	Entre 30% e 60%	Entre 60% e 80%	>80%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O indicador de confiabilidade será definido conforme resultado apresentado na Tabela 15, sendo a Confiabilidade Alta resultados acima de 80%, Confiabilidade Boa com resultados entre 60% e 80%. Terá o indicador como Confiabilidade Regular em resultados entre 30% e 60% e em resultados abaixo de 30% o resultado será considerado como Confiabilidade Baixa.

A classificação da confiabilidade de cada equipamento gera uma determinada recomendação ao equipamento, Confiabilidade Alta determina um acompanhamento leve, onde a manutenção preventiva do equipamento pode passar de 12 para 24 meses. A Confiabilidade Boa, de mesma forma, e devido ao acompanhamento leve, se aumenta a periodicidade de manutenção em 6 meses, passando de 12 meses para 18. Já a Confiabilidade Regular, mantêm-se a periodicidade de manutenção em 12 meses, com um acompanhamento normal dos equipamentos enquadrados nesta classificação.

Por fim, os equipamentos classificados na Confiabilidade Baixa, devem passar por nova intervenção de forma imediata. O equipamento deve sofrer tratamento do líquido isolante, revisão das proteções físicas e, se necessário, revisão da parte ativa em oficina especializada. Ainda, após a realização desta manutenção corretiva e a obtenção de novos valores de entrada das variáveis dos controladores Ensaio Elétrico e Análise de Óleo a periodicidade de manutenção preventiva deste equipamento deverá ser inicialmente de 6 meses, independente da nova classificação de confiabilidade.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, será apresentada a aplicação da metodologia nos transformadores de potência instalados nas subestações de uma empresa de transporte urbano. Para isto serão utilizados dados reais coletados de planilhas de controle e relatórios de manutenção dos referidos equipamentos. Por fim, será feita uma análise dos índices de confiabilidade dos equipamentos estudados.

Para o estudo de caso, serão analisados doze transformadores de potência 3,3 MVA instalados, divididos em quatro subestações de AT. A análise detalhada do transformador SC1 é apresentada neste capítulo, para demonstração do método. As informações dos demais transformadores são apresentadas de forma resumida. O transformador SC1 pode ser visualizado na Fotografia 5.

Fotografia 5 – Transformador de Potência SC1



Fonte: Tiago Samuel Feix (2021).

Com o equipamento do estudo de caso definido aplica-se a metodologia deste trabalho para obtenção de seu resultado de confiabilidade.

4.1 Tratamento e Seleção de Dados

Os valores para o controlador Ensaio Elétrico foram obtidos através de relatórios da última manutenção preventiva realizada no equipamento. Estes valores, para a entrada Resistência de Isolação, conforme observado por norma, serão divididos pela classe de tensão do equipamento. A Tabela 16 apresenta os valores medidos durante o teste de resistência de isolação do transformador SC1.

Tabela 16 – Resistência de Isolação do Transformador SC1

SC1	Resistência (MΩ)	Classe de Isolação (kV)	Valor (MΩ/kV)
Primário x Massa	500	72,5	6,90
Secundário x Massa	125	3,6	34,72
Terciário x Massa	50	3,6	13,89
Primário x Secundário	6250	72,5	86,21
Primário x Terciário	6250	72,5	86,21

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após, para aplicação na ferramenta Fuzzy, é selecionado o menor valor resultante, sendo 6,9 MΩ/kV utilizado como valor de entrada na Variável Resistência de Isolação. Este procedimento é realizado em todos os equipamentos analisados neste trabalho.

Já para a Resistência do Bobinado, a Tabela 17 apresenta os valores medidos durante a última manutenção do transformador SC1, além dos valores calculados da variação percentual da resistência entre as bobinas.

Tabela 17 – Resistência do Bobinado do Transformador SC1

SC1	Primário (Ω)	Secundário (mΩ)	Terciário (mΩ)
Bobina 1	5,6	2,63	2,96
Bobina 2	5,77	2,61	2,95
Bobina 3	5,76	2,64	2,96
Variação (%)	3,04%	1,15%	0,34%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O maior valor percentual resultante, entre os três analisados, será utilizado como valor de entrada na Variável Resistência do Bobinado, sendo ele 3,04%. Este procedimento é realizado em todos os transformadores de potência 3,3 MVA das subestações da empresa e que estão sendo analisados neste trabalho.

A variável Relação de Transformação será avaliada conforme a Tabela 18, onde a maior variação percentual entre a relação teórica e a relação medida será utilizada na ferramenta Fuzzy, sendo ela 0,34%.

Os valores da última manutenção do transformador SC1 estão na Tabela 18:

Tabela 18 – Relação de Transformação do Transformador SC1

SC1	Primário x Secundário (Dd)	Primário x Terciário (Dy)
Calculado	56,735	98,267
Bobina 1	56,703	98,579
Bobina 2	56,694	98,583
Bobina 3	56,703	98,604
Variação (%)	0,07%	0,34%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, a última variável de entrada do controlador Ensaios Elétrico, é o Fator de Potência de Isolação. Os 14 testes realizados estão apresentados na Tabela 19. É utilizado o maior valor encontrado no relatório da última manutenção preventiva do transformador SC1, sendo ele 0,80%.

Tabela 19 – Fator de Potência de Isolação do Transformador SC1

SC1	Fator de Potência de Isolação (%)
Primário x Massa	0,17%
Secundário x Massa	0,23%
Terciário x Massa	0,33%
Primário x (Secundário+Massa)	0,17%
Primário x (Terciário+Massa)	0,16%
Primário x Secundário	0,31%
Primário x Terciário	0,80%
Secundário x (Primário+Massa)	0,23%
Terciário x (Primário+Massa)	0,33%
Secundário x Primário	0,21%
Terciário x Primário	0,25%
Bucha H1	0,51%
Bucha H2	0,51%
Bucha H3	0,40%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o controlador Histórico e Proteções, a quantidade de intervenções, sendo ela originada através de sinalizações das proteções físicas ou de paradas para manutenções corretivas, será o fator para determinar o valor de entrada da

variável. Estes valores foram obtidos através de planilhas de controle e históricos da empresa nos quais se localizam os transformadores de potência. Foram analisados os últimos cinco anos para a determinação da quantidade de falhas e intervenções.

Desta forma, para o transformador SC1, foram encontradas 2 paradas programadas para corretiva do equipamento e 1 falha de atuação das proteções. As paradas programadas foram para correção de vazamentos de óleo mineral isolante e a falha de atuação das proteções foi devido a defeito no sensor de temperatura causado por curto-circuito.

A Tabela 20 apresenta os valores que serão aplicados nas variáveis Histórico e Proteções Físicas:

Tabela 20 – Intervenções Históricas do Transformador SC1

SC1	Valores
Histórico	2
Proteções Físicas	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os valores para o controlador Análise de Óleo foram obtidos através de relatórios de coletas realizadas no equipamento. Foram verificados os valores de 8 ppm no ensaio de Teor de Água e 77 kV no ensaio de Rigidez Dielétrica.

A Tabela 21 apresenta os valores que serão utilizados nas variáveis Teor de Água e Rigidez Dielétrica:

Tabela 21 – Análise de Óleo do Transformador SC1

SC1	Valores
Teor de Água (ppm)	8
Rigidez Dielétrica (kV)	77

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Desta forma, encontramos todos os valores necessários para a aplicação na ferramenta Fuzzy que são aplicados no próximo tópico deste trabalho.

4.2 Aplicação dos Dados na Ferramenta Fuzzy

Com os dados verificados e coletados no subcapítulo anterior pode-se iniciar a análise na ferramenta Fuzzy. Desta forma, com o auxílio do programa Matlab,

versão R2015b, foram aplicados os valores conforme Tabela 22 nas respectivas variáveis e nos respectivos controladores Mandani.

Tabela 22 – Valores das Variáveis de Entrada dos Transformadores

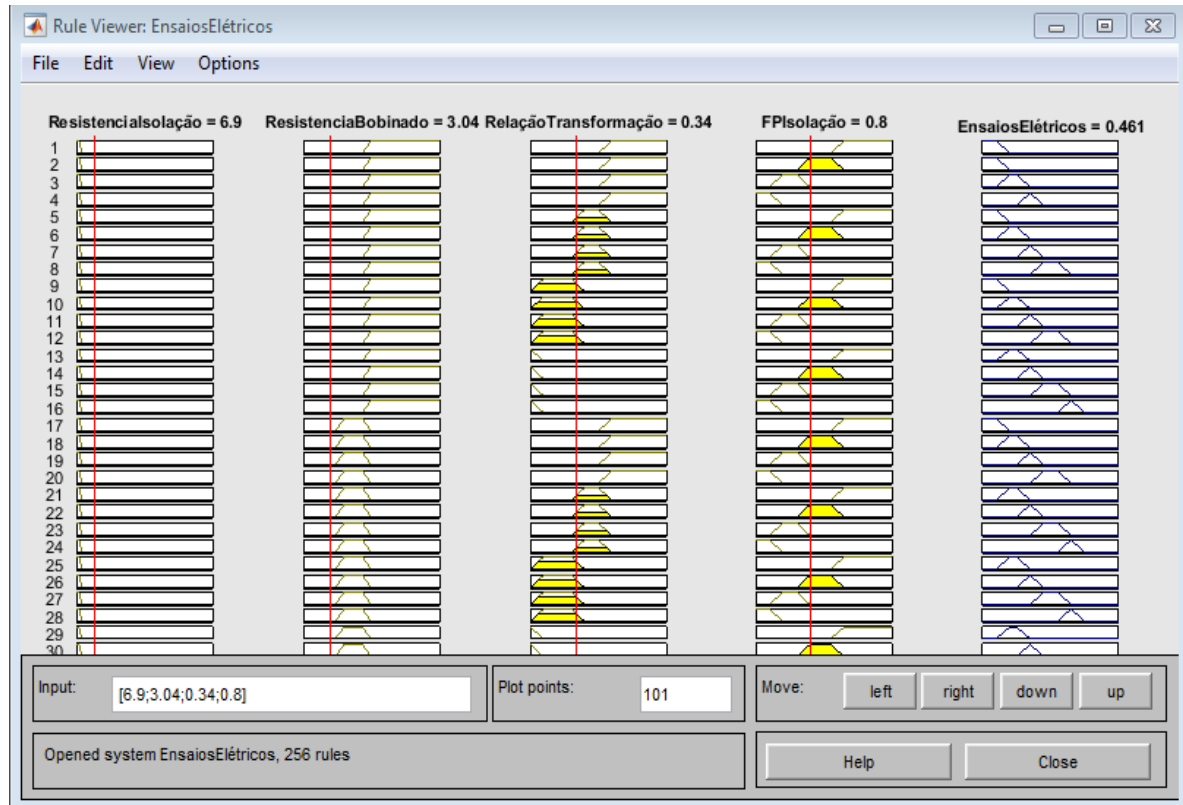
Variável de Entrada	Transformador											
	FR1	FR2	FR3	SL1	SL2	SL3	SC1	SC2	SC3	LB1	LB2	LB3
Resistência de Isolação (MΩ/kV)	3,64	6,07	371,7	1,81	3,62	24,3	6,9	3,31	4,55	23,7	7,91	96,1
Resistência do Bobinado (%)	2,82	1,61	6,87	2,09	1,67	2,15	3,04	1,43	3,18	2,81	1,72	0,91
Relação de Transformação (%)	0,01	0,36	0,01	0,04	0,13	0,1	0,34	0,02	0,1	0,01	0,03	0,42
Fator de Potência de Isolação (%)	2,65	1,38	0,84	0,39	0,75	0,66	0,8	0,53	0,96	0,54	0,38	0,31
Histórico	2	1	2	1	2	1	1	0	0	1	1	0
Proteção Física	0	0	0	0	2	0	2	1	1	0	0	0
Teor de Água (ppm)	18	9	20	10	10	7	8	8	10	6	4	6
Rigidez Dielétrica (kV)	77	75	71	67	75	76	77	79	75	75	66	75

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando os valores obtidos no transformador SC foi constatado que o controlador Ensaio Elétrico teve os quatro valores aplicados conforme a respectiva variável de entrada e após a análise das 256 regras deste obteve o indicador 0,461, ou seja, 46,1% na variável de saída Ensaio Elétrico. A variável de entrada Resistência de Isolação assumiu valores na função de pertinência Ruim e Regular/Bom, sendo respectivamente 0,62 e 0,38 o grau de pertencimento em cada função. Já a variável de entrada Resistência do Bobinado pertence apenas a função Bom da respectiva variável. A variável Relação de Transformação também está dividida entre duas funções, a função Bom assume o valor de pertencimento de 0,6 enquanto a função Regular/Ruim tem o pertencimento em 0,4. Por fim, a variável Fator de Potência de Isolação tem pertencimento unitário na função Regular/Ruim.

Desta forma, com as regras criadas no controlador Mandani, no qual quatro são aplicadas conforme valores de entrada, a variável de saída Ensaio Elétrico tem o valor de saída de forma proporcional e centralizada, conforme o enquadramento das funções de saída resultante e seu cálculo de integral conforme especificado anteriormente. A Figura 27 apresenta a aplicação deste bloco no transformador SC1.

Figura 27 – Aplicação Ferramenta Fuzzy – Variável Ensaio Elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após análise de todos os equipamentos a Tabela 23 apresenta de forma resumida os valores de saída do controlador Ensaio Elétrico.

Tabela 23 – Valores de Saída do Controlador Ensaio Elétrico

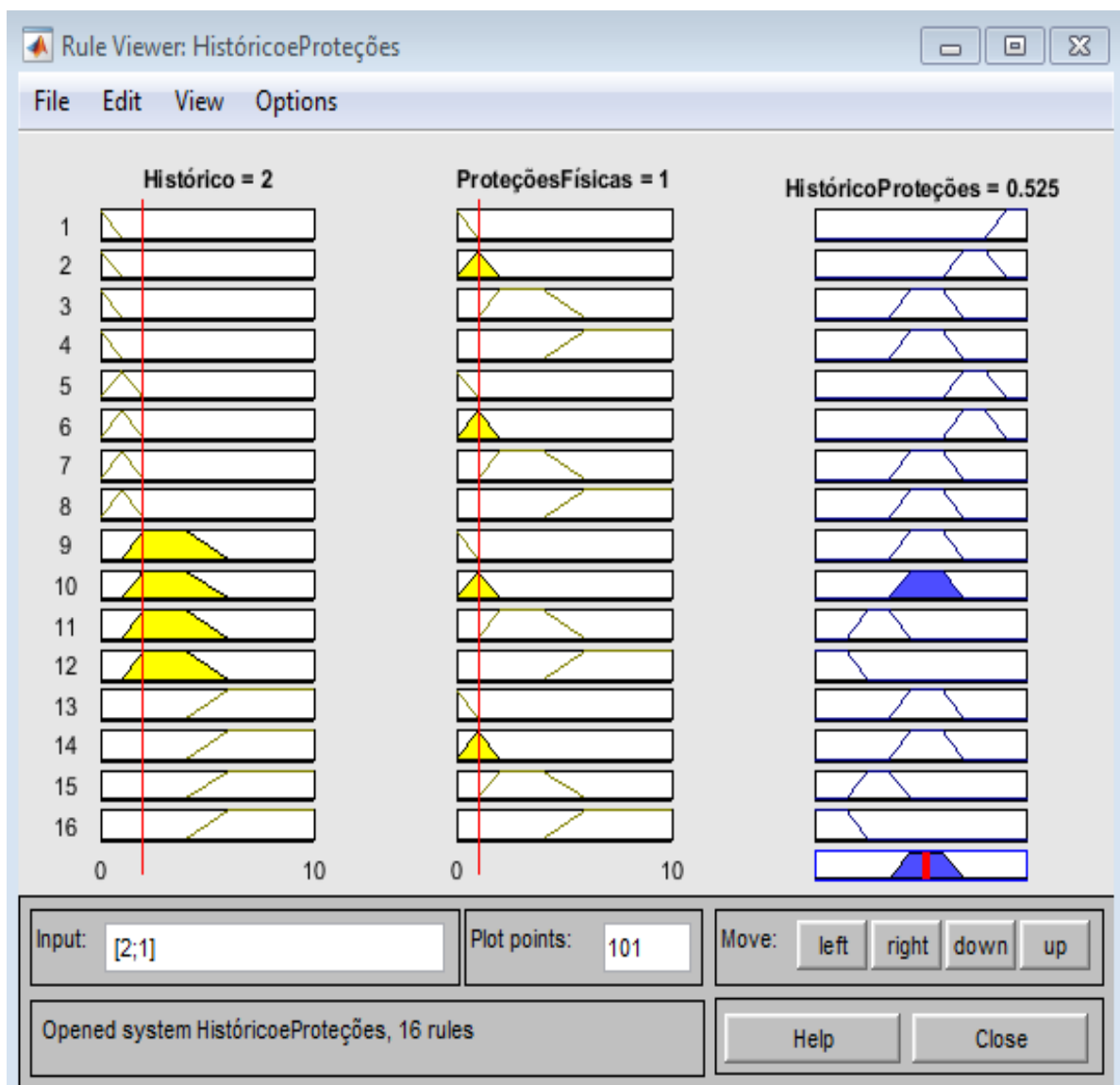
Transformador	Ensaio Elétrico
FR1	0,350
FR2	0,265
FR3	0,500
SL1	0,664
SL2	0,524
SL3	0,576
SC1	0,461
SC2	0,650
SC3	0,500
LB1	0,650
LB2	0,676
LB3	0,720

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De mesma forma, o bloco Histórico e Proteções Físicas teve os valores aplicados conforme a respectiva variável de entrada e obteve o indicador de 0,525, ou seja, 52,5%.

A variável de entrada Histórico assumiu valores na função de pertinência Regular/Ruim e a variável de entrada Proteções Físicas da função Bom. Desta forma apenas uma regra das criadas no controlador Mandani foi executada. Assim a variável de saída Histórico e Proteções Físicas teve o valor acima atribuído. A Figura 28 apresenta a aplicação deste bloco no transformador SC1.

Figura 28 – Aplicação Ferramenta Fuzzy – Variável Histórico e Proteções Físicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após análise de todos os equipamentos a Tabela 24 apresenta de forma resumida os valores de saída do controlador Histórico e Proteções Físicas.

Tabela 24 – Valores de Saída da Variável Histórico e Proteções Físicas

Transformador	Histórico e Proteções Físicas
FR1	0,525
FR2	0,750
FR3	0,525
SL1	0,750
SL2	0,300
SL3	0,750
SC1	0,525
SC2	0,750
SC3	0,750
LB1	0,750
LB2	0,750
LB3	0,925

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

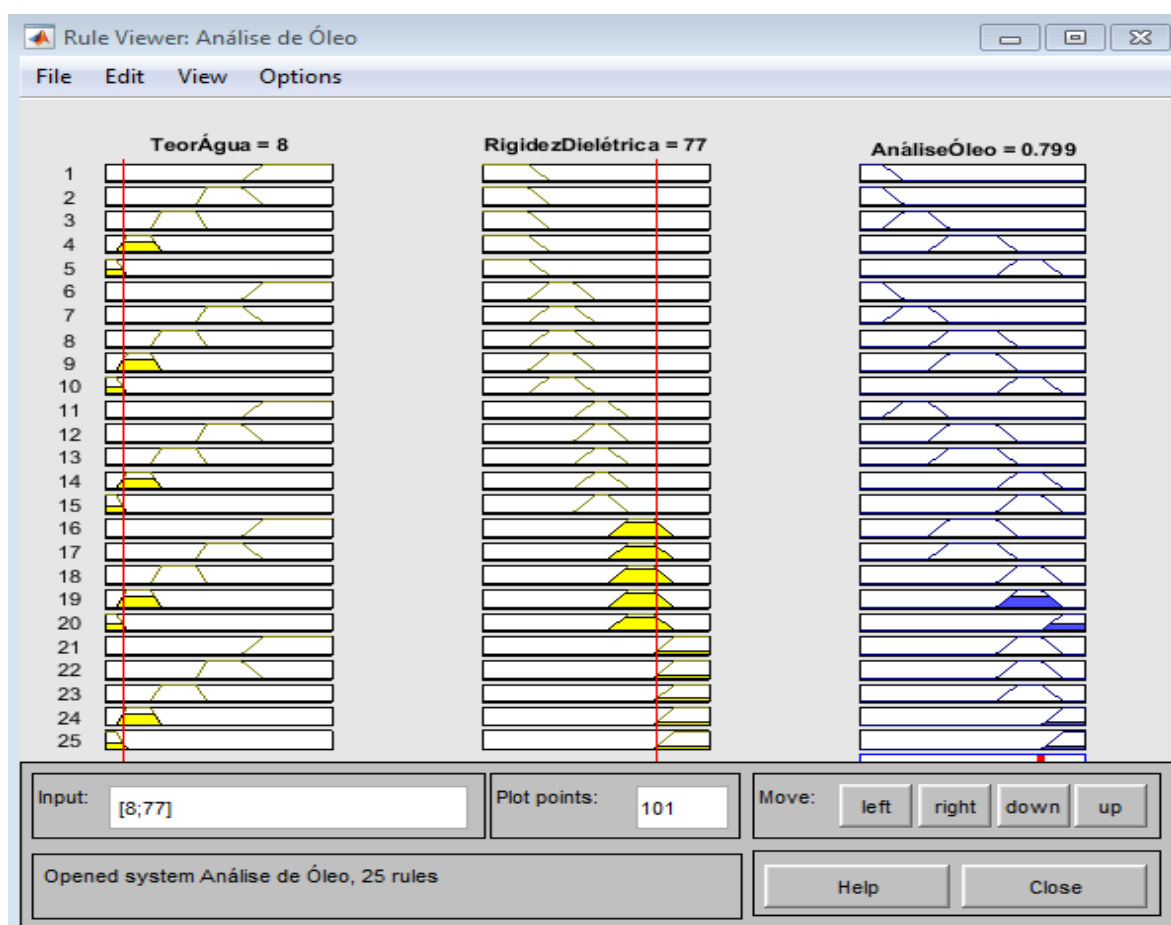
Por fim, o terceiro controlador, Análise de Óleo, teve os valores aplicados conforme a respectiva variável de entrada. A variável de entrada Teor de Água assumiu valores na função de pertinência Muito Bom e Bom, sendo respectivamente 0,4 e 0,6 o grau de pertencimento em cada função, respectivamente.

Já a variável de entrada Rigidez Dielétrica também está dividida entre duas funções, a função Bom assume o valor de pertencimento de 0,8 enquanto a função Muito Bom tem o pertencimento em 0,2. Assim a variável de saída Análise de Óleo teve o valor de 0,799 atribuído, ou seja 79,9%.

Desta forma, quatro regras são ativadas no respectivo controlador Mandani. A variável de saída Análise de Óleo tem o valor de saída de forma proporcional e centralizado após o cálculo de integral conforme especificado anteriormente.

A Figura 29 apresenta a aplicação deste bloco no transformador SC1.

Figura 29 – Aplicação Ferramenta Fuzzy – Variável Análise de Óleo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após análise de todos os equipamentos a Tabela 25 apresenta de forma resumida os valores de saída do controlador Análise de Óleo.

Tabela 25 – Valores de Saída da Variável Análise de Óleo

Transformador	Análise de Óleo
FR1	0,773
FR2	0,773
FR3	0,750
SL1	0,750
SL2	0,750
SL3	0,832
SC1	0,799
SC2	0,799
SC3	0,750
LB1	0,872
LB2	0,925
LB3	0,872

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Após a defuzzyficação, onde se obtêm os três valores numéricos dos controladores Mandani de todos os transformadores, se inicia a classificação dos equipamentos conforme a metodologia elaborada.

4.3 Análise dos Indicadores

A primeira etapa da análise do indicador é relativa aos indicadores Fuzzy. Com os valores defuzzyficados coletados na etapa anterior verificamos se algum deles apresenta valores inferiores a 20%. Se algum dos equipamentos analisados apresentar este requisito, será classificado diretamente com o indicador de confiabilidade Baixo. A Tabela 26 apresenta os valores do indicador Fuzzy do transformador SC1.

Tabela 26 – Indicador de Confiabilidade Transformador SC1

SC1	Indicador Fuzzy	Ponderação	Parcela do Indicador de Confiabilidade
Ensaio Elétrico	0,461	35%	0,16
Histórico e Proteção Física	0,525	20%	0,11
Análise de Óleo	0,799	45%	0,36
Indicador de Confiabilidade: 62,6%			

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Neste caso, conforme a Tabela 26, nenhum indicador Fuzzy ficou abaixo de 20%, podendo então, classificá-lo de maneira ponderada, chegando ao valor de 62,6%. O indicador de confiabilidade, índice final de estudo deste trabalho, para o transformador SC1 é classificado como Confiabilidade Boa.

Assim, pode-se analisar todos os demais equipamentos fruto deste estudo. A Tabela 27 apresenta o valor do índice de confiabilidade de todos demais transformadores de potência 3,3 MVA das subestações da empresa de transporte público.

Tabela 27 – Índices Fuzzy e Índice de Confiabilidade

Transformador	Ensaio Elétricos	Histórico e Proteções Físicas	Análise de Óleo	Índice de Confiabilidade
FR1	0,350	0,525	0,773	57,5%
FR2	0,265	0,750	0,773	59,1%
FR3	0,500	0,525	0,750	61,8%
SL1	0,664	0,750	0,750	72,0%
SL2	0,524	0,300	0,750	58,1%
SL3	0,576	0,750	0,832	72,6%
SC1	0,461	0,525	0,799	62,6%
SC2	0,650	0,750	0,799	73,7%
SC3	0,500	0,750	0,750	66,3%
LB1	0,650	0,750	0,872	77,0%
LB2	0,676	0,750	0,925	80,3%
LB3	0,720	0,925	0,872	82,9%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Desta forma, é possível verificar a classificação do índice de confiabilidade dos transformadores e analisar os resultados da aplicação desta ferramenta.

4.4 Análise dos Resultados

Observando os valores dos indicadores individuais dos três controladores Mandani, nenhum transformador de potência apresenta, de forma isolada em um bloco avaliado, valores inferiores a 20%, o que caracterizaria de imediato, a confiabilidade baixa do equipamento.

Além do mais, os valores do índice de confiabilidade calculados estão todos dentro de parâmetros aceitáveis para o funcionamento dos transformadores. O pior caso, no transformador chamado FR1, tem uma confiabilidade regular, contudo o valor do índice encontra-se próximo do limite superior da classificação adotada.

A Tabela 28 apresenta os índices de confiabilidade encontrados e sua respectiva classificação.

Tabela 28 – Classificação do Indicador de Confiabilidade

Transformador	Índice de Confiabilidade	Classificação
FR1	57,5%	Confiabilidade Regular
FR2	59,1%	Confiabilidade Regular
FR3	61,8%	Confiabilidade Boa
SL1	72,0%	Confiabilidade Boa
SL2	58,1%	Confiabilidade Regular
SL3	72,6%	Confiabilidade Boa
SC1	62,6%	Confiabilidade Boa
SC2	73,7%	Confiabilidade Boa
SC3	66,3%	Confiabilidade Boa
LB1	77,0%	Confiabilidade Boa
LB2	80,3%	Confiabilidade Alta
LB3	82,9%	Confiabilidade Alta

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conforme apresentado na Tabela 28 é possível verificar que dos 12 transformadores submetidos à análise via ferramenta elaborada, três apresentam a Confiabilidade Regular. Outros dois apresentam Confiabilidade Alta e os demais estão em valores intermediários a estes blocos, estando com a classificação de Confiabilidade Boa.

Ainda, os transformadores fabricados mais recentemente e que estão instalados na subestação LB e denominados LB1, LB2 e LB3 tem os maiores índices de confiabilidade, indicando que, a idade do equipamento pode interferir no índice obtido.

Os valores obtidos no controlador Análise de Óleo foram extremamente elevados, pois nos laudos avaliados da coleta de óleo, todos transformadores apresentavam valores muito bons nos itens teor de água e rigidez dielétrica. Este fato contribui para elevar o índice de confiabilidade do equipamento, uma vez que este indicador é o mais importante conforme opiniões de especialistas.

Individualmente os transformadores FR1 e FR2 que são classificados com Confiabilidade Regular, apresentam valores baixos no indicador Fuzzy Ensaio Elétrico, sendo os menores entre os equipamentos analisados. Ambos têm valores de entrada na variável Fator de Potência de Isolação acima do permitido por norma (1%), o que colabora para a classificação de Confiabilidade Regular do equipamento.

Já o transformador SL2, que também é classificado com Confiabilidade Regular, tem o pior histórico entre os equipamentos avaliados. Este transformador apresenta quatro intervenções nos últimos cinco anos, sendo duas para a variável de entrada Histórico, devido a intervenções programadas, e outras duas devido a intervenções emergenciais, que foram utilizadas na variável de entrada Proteções Físicas.

Com a classificação destes três transformadores em Confiabilidade Regular, pode-se concluir que a ferramenta utilizada classifica, de forma correta, os equipamentos com valores baixos em ao menos um dos índices Fuzzy utilizados. Esta classificação indica a permanência da periodicidade de manutenção preventiva em 12 meses conforme o plano de manutenção.

Avaliando os transformadores classificados com Confiabilidade Alta, foi constatado que os equipamentos LB2 e LB3 tem os maiores índices nos três controladores criados para a criação da ferramenta, estes equipamentos são classificados como, no mínimo, Bom nas oito variáveis de entrada dos três controladores Fuzzy aplicados neste trabalho. Assim, a ferramenta classifica com Confiabilidade Alta de forma correta, indicando a possibilidade a aumentar a periodicidade de manutenção destes transformadores para 24 meses, gerando economia para a empresa de transporte.

Os equipamentos classificados com Confiabilidade Boa apresentam valores intermediários nos índices Fuzzy aplicados neste trabalho. Avaliando os valores das variáveis de entrada, verifica-se que todos estão dentro dos valores admitidos pelas normas dos respectivos testes, contudo, a proximidade destes valores com os limites admitidos e as funções de pertencimento criadas devido a experiência dos especialistas classificou estes transformadores como Confiabilidade Boa. Assim, se determina o aumento da periodicidade da manutenção preventiva destes equipamentos de 12 para 18 meses, gerando também, economia para a empresa de transporte.

Desta forma, neste capítulo, foram realizadas as análises dos transformadores de potência objeto deste trabalho, aplicada a ferramenta Fuzzy elaborada e avaliado os resultados obtidos.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou a confiabilidade de funcionamento de transformadores de potência 3,3 MVA instalados em quatro subestações de uma empresa do setor de transporte público.

A motivação para a realização deste trabalho foi a falta de ferramenta para avaliar a confiabilidade de equipamentos instalados nas subestações e a importância dos transformadores objeto desta análise, uma vez que, são os equipamentos mais importantes da subestação, de difícil reposição devido suas características técnicas e seu alto valor econômico.

O objetivo geral foi elaborar uma ferramenta de análise da confiabilidade de transformadores de potência, baseado na Lógica Fuzzy, a partir de informações coletadas durante os diferentes tipos de manutenção, com a finalidade de otimizar o plano de manutenção destes equipamentos. Para atingir o objetivo geral, a metodologia proposta conclui algumas etapas como realizar o levantamento de dados dos equipamentos instalados - assim como os valores obtidos na última manutenção preventiva em relação aos ensaios elétricos e análise de óleo, realizar o levantamento de dados históricos das falhas dos transformadores, desenvolver uma ferramenta que identifique a confiabilidade dos equipamentos estudados através de fatores críticos determinados por especialistas e verificar a eficácia da ferramenta elaborada sugerindo, inclusive, ações de melhoria no cronograma de manutenção.

A elaboração da ferramenta foi baseada na Lógica Fuzzy, onde oito variáveis de entrada divididas em três controladores determinaram os valores que posteriormente foram ponderados para a criação do índice de confiabilidade. A possibilidade de se trabalhar com diversas entradas obtidas em diversos tipos de unidade de medida e transformá-las em um índice numérico único corroboraram para sua escolha.

A ferramenta elaborada e o índice de confiabilidade obtido podem ser considerados nas tomadas de decisão de intervenções nestes equipamentos, podendo inclusive alterar a periodicidade de manutenção de anual para bienal nos mesmos, por exemplo. Contudo, para isto, se faz necessário um controle rigoroso dos dados históricos do equipamento e da avaliação dos resultados dos testes realizados nos transformadores. Repetindo assim, a aplicação da ferramenta sempre que um ou mais parâmetros de entrada sejam alterados.

Como continuidade deste trabalho, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros voltados a análise de confiabilidade.

- Adaptar as variáveis de entrada e aplicar o método utilizando Lógica Fuzzy em outros equipamentos das subestações;
- Considerar variáveis de entrada não utilizadas neste primeiro momento, que poderão agregar mais precisão ao modelo, como por exemplo: Temperatura, análise cromatográfica, transitórios e tensão interfacial;
- Aplicar uma análise de sensibilidade nas variáveis de entrada para verificar o impacto das alterações de cada variável no indicador final de confiabilidade;
- Utilizar outros métodos para a ponderação dos indicadores Fuzzy dos controladores estudados, como por exemplo, através do *Analytic Hierarchy Process*.

REFERÊNCIAS

AGUADO, A. L.; CONTANHEDE, M. A. **Lógica Fuzzy**. 12p. Universidade Estadual de Campinas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10202**: Buchas de tensões nominais de 72,5 kV – 145 kV e 242 kV para transformadores e reatores de potência – Características elétricas, construtivas dimensionais e gerais. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10576**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - Diretrizes para supervisão e manutenção. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformadores de potência. 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7036**: Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência para distribuição, imersos em líquidos isolantes. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7274**: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço. 2012.

BARROS, Benjamim Ferreira; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luís. **Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2014.

BARROS, Benjamim Ferreira; GEDRA, Ricardo Luís. **Cabine Primária Subestações de Alta Tensão de Consumidor**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2010.

FOGLIATTO, Flavio S; RIBEIRO, Jose L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GEGRÓRIO, Gabriela F. P. **Engenharia de Manutenção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R. R.; Tanscheid, R. **Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações**. Sixth Internacional Fuzzy Systems Association World Congress – IFSA95. p 1-38, 1995.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção - Função Estratégica**. 4ª Ed. Rio De Janeiro: Editora Qualitymark Ltda, 2012.

LAFRAIA, João R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark , 2001.

LANZILLOTTI, Regina S.; LANZILLOTTI, Haydeé S. **Lógica Fuzzy uma abordagem para o reconhecimento de padrão**. Jundiaí: Paco Editorial, 2014.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

MARRO, A. A.; SOUZA, A. M. C.; CAVALCANTE, E.R. S.; BEZERRA, G. S.; NUNES, R.O. **Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações**. 23p. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MENEGAZ, Gabriela Lima. **Planejamento, Controle e Confiabilidade na Manutenção**. Brasília, 117 páginas

MOUBRAY, JOHN. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Ed. Brasileira. Aladon, 2000.

NASCIMENTO JR. Geraldo Carvalho. **Máquinas Elétricas**. 1ª Ed. São Paulo: Érica, 2014.

PEZZATO, Alan Thomas. **Sistemas de Controle de Qualidade**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

RHEINHEIMER, Jonas; **Modelo de Avaliação da Confiabilidade de Disjuntores de Média Tensão para Otimização de Manutenções Preventivas em Uma Unidade Petroquímica**. 2019. 71p. – UNISINOS, São Leopoldo, 2019.

RIGONI, Emerson; **Metodologia para Implantação da Manutenção Centrada na Confiabilidade: uma abordagem fundamentada em sistemas baseados em conhecimento e lógica fuzzy**. 2009. 342p. – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SIMÕES, M. G; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2ª Ed. São Paulo: Blucher, 2007.

SIQUEIRA, Yoni P. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implantação**. 1ª Ed. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SOEIRO, Marcus V. de Abreu; OLIVIO, Amauri; LUCATO, André V. R. **Gestão da Manutenção**. Londrina: Educacional S.A.,2017.

STOCCO, M. **Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica**. 2009. 129 p. – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2009.

UBERTI, Vinícius André; **Lógica Fuzzy Para Avaliação de Eficiência Energética em Sistema de Irrigação de Lavouras de Arroz**. 2017. 174p. – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley** 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE ENTREVISTA COM ESPECIALISTAS

Questionário sobre os transformadores de tração 3,3MVA para formulação de regras Fuzzy.

- a) Qual a importância de ter um alto índice de confiabilidade no funcionamento dos transformadores de potência 3,3MVA das subestações da empresa?
- b) Seria importante ter um índice de acompanhamento desta confiabilidade destes equipamentos?
- c) De acordo com a sua experiência, classifique os blocos de ensaio, em relação à manutenção e a confiabilidade do funcionamento dos transformadores 3,3MVA, sendo:
- 1- Nenhum Pouco Importante
 - 2- Pouco Importante
 - 3- Importante
 - 4- Muito Importante
 - 5- Extremamente Importante

	1	2	3	4	5
Ensaio Elétrico: resistência de isolamento, resistência ôhmica dos enrolamentos, relação de transformação – TTR e Fator de potência de isolamento.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coleta de Óleo: análise físico-química – Teor de água; Rigidez Dielétrica;	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Histórico de falhas e Proteções Físicas: Falhas antigas do transformador que podem causar paradas.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- d) De acordo com a sua experiência, qual a classificação entre os blocos apresentados acima, enumerando de 1 a 4, sendo 1 o mais importante e 4 o menos importante:

Bloco analisado	Avaliação
Ensaio Elétrico:	
Coleta de Óleo:	
Histórico de falhas e Proteções Físicas:	

- e) Em relação aos ensaios de Resistência de isolação, em sua opinião, a partir de quais valores, os resultados, podem ser considerados como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

Obs.: Lembrando que pela NBR 7036/90 o valor mínimo admissível é de 1,5MΩ/kV.

- f) Em relação aos ensaios de Resistência de Ôhmica do bobinado, em sua opinião, a partir de quais valores, os resultados, podem ser considerados como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

Obs.: Lembrando que pela NBR 5356/14 o valor máximo admissível é de 10%.

- g) Em relação aos ensaios de Relação de transformação, em sua opinião, a partir de quais valores, os resultados, podem ser considerados como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

Obs.: Lembrando que pela NBR 5356/14 o valor máximo admissível é de 0,5%.

- h) Em relação aos ensaios de Fator de Potência de Isolação, em sua opinião, a partir de quais valores, os resultados, podem ser considerados como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

Obs.: Lembrando que o valor máximo admissível é de 1%.

- i) Em relação aos valores obtidos na coleta de óleo – Teor de Água, em sua opinião, a partir de quais valores, o resultado, pode ser considerado como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

Obs.: Lembrando que pela NBR 10710/06 o valor máximo admissível é de 40ppm.

- j) Em relação aos valores obtidos na coleta de óleo – Rigidez Dielétrica, em sua opinião, a partir de quais valores, o resultado, pode ser considerado como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

Obs.: Lembrando que pela NBR-IEC-60156 o valor mínimo admissível é de 40kV.

- k) De acordo com sua opinião, há algum outro ensaio ou teste que deve ser considerado como muito importante para a confiabilidade de funcionamento do transformador de potência 3,3MVA?
- l) Em relação à manutenção preditiva, em sua opinião, a partir de que quantidade de alarmes ou atuações nas proteções físicas, além de falhas de circulação de óleo nos radiadores, substituições de vedações etc. pode-se considerar o equipamento como “muito ruim”, “ruim”, “regular”, “bom” e “muito bom”?

Definição	Avaliação
Muito ruim	
Ruim	
Regular	
Bom	
Muito bom	

APÊNDICE B – ALGORITMO FUZZY

```

[System]
Name='EnsaioElétricos'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=4
NumOutputs=1
NumRules=256
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='ResistenciaIsolação'
Range=[0 50]
NumMFs=4
MF1='MuitoRuim':'trapmf',[0 0 1 2]
MF2='Ruim':'trapmf',[0 3 5 10]
MF3='Regular/Bom':'trapmf',[5 10 25 30]
MF4='MuitoBom':'trapmf',[25 30 50 50]

[Input2]
Name='ResistenciaBobinado'
Range=[0 15]
NumMFs=4
MF1='MuitoBom':'trapmf',[0 0 0.5 1.5]
MF2='Bom':'trapmf',[0.5 1.5 3.5 4.5]
MF3='Regular/Ruim':'trapmf',[3.5 4.5 6.5 7.5]
MF4='MuitoRuim':'trapmf',[6.5 7.5 15 15]

[Input3]
Name='RelaçãoTransformação'
Range=[0 1]
NumMFs=4
MF1='MuitoBom':'trimf',[-0.4 0 0.1]
MF2='Bom':'trapmf',[0 0.1 0.3 0.4]
MF3='Regular/Ruim':'trapmf',[0.3 0.4 0.5 0.6]
MF4='MuitoRuim':'trapmf',[0.5 0.6 1 1000]

[Input4]
Name='FPIsolação'
Range=[0 2]
NumMFs=4
MF1='Regular/Ruim':'trapmf',[0.6 0.8 1.1 1.3]
MF2='MuitoRuim':'trapmf',[1.1 1.3 2 20]
MF3='MuitoBom':'trapmf',[0 0 0.2 0.4]
MF4='Bom':'trapmf',[0.2 0.4 0.6 0.8]

[Output1]
Name='EnsaioElétricos'
Range=[0 1]
NumMFs=7
MF1='MuitoBaixa':'trapmf',[0 0 0.1 0.2]
MF2='Baixa':'trapmf',[0.1 0.2 0.25 0.35]
MF3='Regular/Baixa':'trimf',[0.25 0.35 0.45]
MF4='Regular':'trapmf',[0.35 0.45 0.55 0.65]

```

```
MF5='Regular/Boa': 'trimf', [0.55 0.65 0.75]
MF6='Boa': 'trapmf', [0.65 0.75 0.8 0.9]
MF7='Alta': 'trapmf', [0.8 0.9 1 1]
```

```
[Rules]
```

```
1 4 4 2, 1 (1) : 1
1 4 4 1, 1 (1) : 1
1 4 4 4, 2 (1) : 1
1 4 4 3, 3 (1) : 1
1 4 3 2, 1 (1) : 1
1 4 3 1, 2 (1) : 1
1 4 3 4, 3 (1) : 1
1 4 3 3, 4 (1) : 1
1 4 2 2, 1 (1) : 1
1 4 2 1, 2 (1) : 1
1 4 2 4, 3 (1) : 1
1 4 2 3, 4 (1) : 1
1 4 1 2, 2 (1) : 1
1 4 1 1, 3 (1) : 1
1 4 1 4, 4 (1) : 1
1 4 1 3, 5 (1) : 1
1 3 4 2, 1 (1) : 1
1 3 4 1, 2 (1) : 1
1 3 4 4, 3 (1) : 1
1 3 4 3, 4 (1) : 1
1 3 3 2, 2 (1) : 1
1 3 3 1, 3 (1) : 1
1 3 3 4, 4 (1) : 1
1 3 3 3, 5 (1) : 1
1 3 2 2, 2 (1) : 1
1 3 2 1, 3 (1) : 1
1 3 2 4, 4 (1) : 1
1 3 2 3, 5 (1) : 1
1 3 1 2, 2 (1) : 1
1 3 1 1, 3 (1) : 1
1 3 1 4, 4 (1) : 1
1 3 1 3, 5 (1) : 1
1 2 4 2, 2 (1) : 1
1 2 4 1, 3 (1) : 1
1 2 4 4, 4 (1) : 1
1 2 4 3, 5 (1) : 1
1 2 3 2, 2 (1) : 1
1 2 3 1, 3 (1) : 1
1 2 3 4, 4 (1) : 1
1 2 3 3, 5 (1) : 1
1 2 2 2, 3 (1) : 1
1 2 2 1, 4 (1) : 1
1 2 2 4, 5 (1) : 1
1 2 2 3, 6 (1) : 1
1 2 1 2, 3 (1) : 1
1 2 1 1, 4 (1) : 1
1 2 1 4, 5 (1) : 1
1 2 1 3, 6 (1) : 1
1 1 4 2, 2 (1) : 1
1 1 4 1, 3 (1) : 1
1 1 4 4, 4 (1) : 1
1 1 4 3, 5 (1) : 1
1 1 3 2, 2 (1) : 1
1 1 3 1, 3 (1) : 1
1 1 3 4, 4 (1) : 1
1 1 3 3, 5 (1) : 1
```

1 1 2 2, 3 (1) : 1
 1 1 2 1, 4 (1) : 1
 1 1 2 4, 5 (1) : 1
 1 1 2 3, 6 (1) : 1
 1 1 1 2, 3 (1) : 1
 1 1 1 1, 4 (1) : 1
 1 1 1 4, 5 (1) : 1
 1 1 1 3, 6 (1) : 1
 2 4 4 2, 1 (1) : 1
 2 4 4 1, 2 (1) : 1
 2 4 4 4, 3 (1) : 1
 2 4 4 3, 4 (1) : 1
 2 4 3 2, 2 (1) : 1
 2 4 3 1, 3 (1) : 1
 2 4 3 4, 4 (1) : 1
 2 4 3 3, 5 (1) : 1
 2 4 2 2, 2 (1) : 1
 2 4 2 1, 3 (1) : 1
 2 4 2 4, 4 (1) : 1
 2 4 2 3, 5 (1) : 1
 2 4 1 2, 2 (1) : 1
 2 4 1 1, 3 (1) : 1
 2 4 1 4, 4 (1) : 1
 2 4 1 3, 5 (1) : 1
 2 3 4 2, 2 (1) : 1
 2 3 4 1, 3 (1) : 1
 2 3 4 4, 4 (1) : 1
 2 3 4 3, 5 (1) : 1
 2 3 3 2, 2 (1) : 1
 2 3 3 1, 3 (1) : 1
 2 3 3 4, 4 (1) : 1
 2 3 3 3, 5 (1) : 1
 2 3 2 2, 2 (1) : 1
 2 3 2 1, 3 (1) : 1
 2 3 2 4, 4 (1) : 1
 2 3 2 3, 5 (1) : 1
 2 3 1 2, 2 (1) : 1
 2 3 1 1, 3 (1) : 1
 2 3 1 4, 4 (1) : 1
 2 3 1 3, 5 (1) : 1
 2 2 4 2, 2 (1) : 1
 2 2 4 1, 3 (1) : 1
 2 2 4 4, 4 (1) : 1
 2 2 4 3, 5 (1) : 1
 2 2 3 2, 2 (1) : 1
 2 2 3 1, 3 (1) : 1
 2 2 3 4, 4 (1) : 1
 2 2 3 3, 5 (1) : 1
 2 2 2 2, 3 (1) : 1
 2 2 2 1, 4 (1) : 1
 2 2 2 4, 5 (1) : 1
 2 2 2 3, 6 (1) : 1
 2 2 1 2, 3 (1) : 1
 2 2 1 1, 4 (1) : 1
 2 2 1 4, 5 (1) : 1
 2 2 1 3, 6 (1) : 1
 2 1 4 2, 2 (1) : 1
 2 1 4 1, 3 (1) : 1
 2 1 4 4, 4 (1) : 1
 2 1 4 3, 5 (1) : 1
 2 1 3 2, 2 (1) : 1

2 1 3 1, 3 (1) : 1
 2 1 3 4, 4 (1) : 1
 2 1 3 3, 5 (1) : 1
 2 1 2 2, 3 (1) : 1
 2 1 2 1, 4 (1) : 1
 2 1 2 4, 5 (1) : 1
 2 1 2 3, 6 (1) : 1
 2 1 1 2, 3 (1) : 1
 2 1 1 1, 4 (1) : 1
 2 1 1 4, 5 (1) : 1
 2 1 1 3, 6 (1) : 1
 3 4 4 2, 2 (1) : 1
 3 4 4 1, 3 (1) : 1
 3 4 4 4, 4 (1) : 1
 3 4 4 3, 5 (1) : 1
 3 4 3 2, 2 (1) : 1
 3 4 3 1, 3 (1) : 1
 3 4 3 4, 4 (1) : 1
 3 4 3 3, 5 (1) : 1
 3 4 2 2, 2 (1) : 1
 3 4 2 1, 3 (1) : 1
 3 4 2 4, 4 (1) : 1
 3 4 2 3, 5 (1) : 1
 3 4 1 2, 3 (1) : 1
 3 4 1 1, 4 (1) : 1
 3 4 1 4, 5 (1) : 1
 3 4 1 3, 6 (1) : 1
 3 3 4 2, 2 (1) : 1
 3 3 4 1, 3 (1) : 1
 3 3 4 4, 4 (1) : 1
 3 3 4 3, 5 (1) : 1
 3 3 3 2, 3 (1) : 1
 3 3 3 1, 4 (1) : 1
 3 3 3 4, 5 (1) : 1
 3 3 3 3, 6 (1) : 1
 3 3 2 2, 3 (1) : 1
 3 3 2 1, 4 (1) : 1
 3 3 2 4, 5 (1) : 1
 3 3 2 3, 6 (1) : 1
 3 3 1 2, 3 (1) : 1
 3 3 1 1, 4 (1) : 1
 3 3 1 4, 5 (1) : 1
 3 3 1 3, 6 (1) : 1
 3 2 4 2, 2 (1) : 1
 3 2 4 1, 3 (1) : 1
 3 2 4 4, 4 (1) : 1
 3 2 4 3, 5 (1) : 1
 3 2 3 2, 3 (1) : 1
 3 2 3 1, 4 (1) : 1
 3 2 3 4, 5 (1) : 1
 3 2 3 3, 6 (1) : 1
 3 2 2 2, 3 (1) : 1
 3 2 2 1, 4 (1) : 1
 3 2 2 4, 5 (1) : 1
 3 2 2 3, 6 (1) : 1
 3 2 1 2, 3 (1) : 1
 3 2 1 1, 4 (1) : 1
 3 2 1 4, 5 (1) : 1
 3 2 1 3, 6 (1) : 1
 3 1 4 2, 3 (1) : 1
 3 1 4 1, 4 (1) : 1

3 1 4 4, 5 (1) : 1
 3 1 4 3, 6 (1) : 1
 3 1 3 2, 3 (1) : 1
 3 1 3 1, 4 (1) : 1
 3 1 3 4, 5 (1) : 1
 3 1 3 3, 6 (1) : 1
 3 1 2 2, 4 (1) : 1
 3 1 2 1, 5 (1) : 1
 3 1 2 4, 6 (1) : 1
 3 1 2 3, 7 (1) : 1
 3 1 1 2, 4 (1) : 1
 3 1 1 1, 5 (1) : 1
 3 1 1 4, 6 (1) : 1
 3 1 1 3, 7 (1) : 1
 4 4 4 2, 2 (1) : 1
 4 4 4 1, 3 (1) : 1
 4 4 4 4, 5 (1) : 1
 4 4 4 3, 4 (1) : 1
 4 4 3 2, 2 (1) : 1
 4 4 3 1, 3 (1) : 1
 4 4 3 4, 4 (1) : 1
 4 4 3 3, 5 (1) : 1
 4 4 2 2, 3 (1) : 1
 4 4 2 1, 4 (1) : 1
 4 4 2 4, 5 (1) : 1
 4 4 2 3, 6 (1) : 1
 4 4 1 2, 3 (1) : 1
 4 4 1 1, 4 (1) : 1
 4 4 1 4, 5 (1) : 1
 4 4 1 3, 6 (1) : 1
 4 3 4 2, 2 (1) : 1
 4 3 4 1, 3 (1) : 1
 4 3 4 4, 4 (1) : 1
 4 3 4 3, 5 (1) : 1
 4 3 3 2, 3 (1) : 1
 4 3 3 1, 4 (1) : 1
 4 3 3 4, 5 (1) : 1
 4 3 3 3, 6 (1) : 1
 4 3 2 2, 3 (1) : 1
 4 3 2 1, 4 (1) : 1
 4 3 2 4, 5 (1) : 1
 4 3 2 3, 6 (1) : 1
 4 3 1 2, 3 (1) : 1
 4 3 1 1, 4 (1) : 1
 4 3 1 4, 5 (1) : 1
 4 3 1 3, 6 (1) : 1
 4 2 4 2, 3 (1) : 1
 4 2 4 1, 4 (1) : 1
 4 2 4 4, 5 (1) : 1
 4 2 4 3, 6 (1) : 1
 4 2 3 2, 3 (1) : 1
 4 2 3 1, 4 (1) : 1
 4 2 3 4, 5 (1) : 1
 4 2 3 3, 6 (1) : 1
 4 2 2 2, 4 (1) : 1
 4 2 2 1, 5 (1) : 1
 4 2 2 4, 6 (1) : 1
 4 2 2 3, 7 (1) : 1
 4 2 1 2, 4 (1) : 1
 4 2 1 1, 5 (1) : 1
 4 2 1 4, 6 (1) : 1

```

4 2 1 3, 7 (1) : 1
4 1 4 2, 2 (1) : 1
4 1 4 1, 3 (1) : 1
4 1 4 4, 4 (1) : 1
4 1 4 3, 5 (1) : 1
4 1 3 2, 3 (1) : 1
4 1 3 1, 4 (1) : 1
4 1 3 4, 5 (1) : 1
4 1 3 3, 6 (1) : 1
4 1 2 2, 3 (1) : 1
4 1 2 1, 5 (1) : 1
4 1 2 4, 6 (1) : 1
4 1 2 3, 7 (1) : 1
4 1 1 2, 4 (1) : 1
4 1 1 1, 5 (1) : 1
4 1 1 4, 6 (1) : 1
4 1 1 3, 7 (1) : 1

```

```

[System]
Name='HistóricoeProteções'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=16
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

```

```

[Input1]
Name='Histórico'
Range=[0 10]
NumMFs=4
MF1='MuitoBom': 'trimf', [0 0 1]
MF2='Regular/Ruim': 'trapmf', [1 2 4 6]
MF3='MuitoRuim': 'trapmf', [4 6 10 20]
MF4='Bom': 'trimf', [0 1 2]

```

```

[Input2]
Name='ProteçõesFísicas'
Range=[0 10]
NumMFs=4
MF1='MuitoBom': 'trimf', [0 0 1]
MF2='Bom': 'trimf', [0 1 2]
MF3='Regular/Ruim': 'trapmf', [1 2 4 6]
MF4='MuitoRuim': 'trapmf', [4 6 10 20]

```

```

[Output1]
Name='HistóricoProteções'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='MuitoBaixa': 'trapmf', [0 0 0.15 0.25]
MF2='Regular': 'trapmf', [0.35 0.45 0.6 0.7]
MF3='Alta': 'trapmf', [0.8 0.9 1 1]
MF4='Boa': 'trapmf', [0.6 0.7 0.8 0.9]
MF5='Baixa': 'trapmf', [0.15 0.25 0.35 0.45]

```

```
[Rules]
1 1, 3 (1) : 1
1 2, 4 (1) : 1
1 3, 2 (1) : 1
1 4, 2 (1) : 1
4 1, 4 (1) : 1
4 2, 4 (1) : 1
4 3, 2 (1) : 1
4 4, 2 (1) : 1
2 1, 2 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
2 3, 5 (1) : 1
2 4, 1 (1) : 1
3 1, 2 (1) : 1
3 2, 2 (1) : 1
3 3, 5 (1) : 1
3 4, 1 (1) : 1
```

```
[System]
Name='Análise de Óleo'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=25
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='TeorÁgua'
Range=[0 100]
NumMFs=5
MF1='MuitoBom': 'trapmf', [0 0 5 10]
MF2='Bom': 'trapmf', [5 10 20 25]
MF3='Regular': 'trapmf', [20 25 40 45]
MF4='Ruim': 'trapmf', [40 45 60 70]
MF5='MuitoRuim': 'trapmf', [60 70 100 100]
```

```
[Input2]
Name='RigidezDielétrica'
Range=[0 100]
NumMFs=5
MF1='MuitoRuim': 'trapmf', [0 0 20 30]
MF2='Ruim': 'trapmf', [20 30 40 50]
MF3='MuitoBom': 'trapmf', [75 85 100 100]
MF4='Bom': 'trapmf', [55 65 75 85]
MF5='Regular': 'trapmf', [40 50 55 65]
```

```
[Output1]
Name='AnáliseÓleo'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='MuitoBaixa': 'trapmf', [0 0 0.1 0.2]
MF2='Baixa': 'trapmf', [0.1 0.2 0.3 0.4]
MF3='Regular': 'trapmf', [0.3 0.4 0.6 0.7]
MF4='Boa': 'trapmf', [0.6 0.7 0.8 0.9]
MF5='Alta': 'trapmf', [0.8 0.9 1 1]
```


[Rules]
5 1, 1 (1) : 1
4 1, 1 (1) : 1
3 1, 2 (1) : 1
2 1, 3 (1) : 1
1 1, 4 (1) : 1
5 2, 1 (1) : 1
4 2, 2 (1) : 1
3 2, 3 (1) : 1
2 2, 3 (1) : 1
1 2, 4 (1) : 1
5 5, 2 (1) : 1
4 5, 3 (1) : 1
3 5, 3 (1) : 1
2 5, 4 (1) : 1
1 5, 4 (1) : 1
5 4, 3 (1) : 1
4 4, 3 (1) : 1
3 4, 4 (1) : 1
2 4, 4 (1) : 1
1 4, 5 (1) : 1
5 3, 4 (1) : 1
4 3, 4 (1) : 1
3 3, 4 (1) : 1
2 3, 5 (1) : 1
1 3, 5 (1) : 1