

LEONARDO DO NASCIMENTO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR MEIO  
DE TÉCNICAS DE *MACHINE LEARNING***

Versão corrigida  
São Paulo  
2023

LEONARDO DO NASCIMENTO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR MEIO  
DE TÉCNICAS DE *MACHINE LEARNING***

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências .

Versão corrigida  
São Paulo  
2023

LEONARDO DO NASCIMENTO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE  
DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR MEIO  
DE TÉCNICAS DE *MACHINE LEARNING***

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências .

Área de Concentração:

Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Giovanni Manassero Junior

Versão corrigida  
São Paulo  
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de Junho de 2023

Assinatura do autor: Leão

Assinatura do orientador: Giovanni Manduca Jr

#### Catálogo-na-publicação

Pereira, Leonardo do Nascimento

Avaliação da degradação de disjuntores de alta tensão por meio de técnicas de machine learning / L. N. Pereira -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

71 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Disjuntores 2.Manutenção preditiva 3.Análise de dados I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Aos meus pais, Antonio e Lilian

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus pelo privilégio de me ter concedido saúde e oportunidades de acesso à educação de qualidade. Em segundo lugar, agradeço aos meus pais por todo o esforço e dedicação para comigo ao longo de toda a minha vida.

Agradeço a minha noiva, Mariana, por cuidar tanto de mim, pela compreensão por todos os momentos em que ficamos afastados para que o presente trabalho pudesse ser realizado e pelo seu amor incondicional. Te amo ♡

A CPFL Energia, pela disponibilização dos dados para a realização deste trabalho. Agradeço também os gestores e colegas por contribuírem para que este trabalho tenha aplicação real no setor elétrico brasileiro, em especial a Helen Vendrameto e Wesley Fernandes pelo apoio em obter e estruturar a base de dados utilizada para este trabalho.

Agradeço o meu orientador, Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior, por todo o apoio ao longo da minha trajetória acadêmica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP). Agradeço também o meu amigo, Eng. Leonardo Ramos Pereira, por todos os seus ensinamentos e por toda a convivência que tivemos no L-Prot (Laboratório de Pesquisa em Proteção e Automação de Sistemas Elétricos) e ao meu amigo, Pedro Monasterio, pela ajuda na escolha da melhor técnica de *machine learning* para o problema tratado neste trabalho.

Por último, agradeço aos professores Fred e Salles pelas contribuições apresentadas no exame de qualificação desta dissertação e também aos professores George Lira e André Nunes pelas preciosas sugestões e contribuições para a escrita do trabalho final.

*“Com efeito, grandes coisas fez o Senhor por nós; por isso, estamos alegres.”*

-- Salmo 126:3

# RESUMO

O trabalho apresenta uma metodologia para avaliação da degradação de disjuntores de alta tensão ao longo de uma extensa janela temporal. Para isso, foram mapeados disjuntores de uma distribuidora de grande porte. Os disjuntores mapeados tiveram os seus ensaios de resistência de contato, tempo de abertura e tempo de fechamento avaliados. Por se tratar de uma extensa massa de dados, foram utilizadas técnicas de *machine learning* para clusterização dos disjuntores conforme o seu nível de degradação e, consequentemente, o risco de falha atrelado ao ativo. Foram analisados apenas disjuntores de 138kV isolados a gás SF<sub>6</sub>. Contudo, os padrões nominais de operação do disjuntor variam de acordo com fabricante e modelo. Neste sentido, fez-se uso de um algoritmo de *machine learning* (*K-Means*) para clusterizar as “n” observações dentre “k” grupos, onde cada observação pertence ao grupo mais próximo da média. Porém, antes da clusterização, foi aplicada uma técnica de redução de dimensão chamada *principal component analysis* (PCA). Com isso, é possível obter uma representação em duas dimensões da base de dados - diagrama de Voronoy - dos disjuntores. Finalmente, a análise das propriedades de cada *cluster* permite identificar equipamentos que apresentam comportamento diferente ao restante de sua família. Esses ativos apresentam um risco maior de falha. Diversos trabalhos foram publicados sobre o uso dos dados de disjuntores para monitoramento da condição, porém, o presente trabalho se diferencia dos demais por utilizar uma base de dados real de ensaios de campo, com grande variação temporal (1977-2021).

**Palavras-Chave** – Disjuntor, *K-Means*, PCA, Gestão de Ativos.



# ABSTRACT

This dissertation presents a methodology for evaluation of high voltage circuit breaker's degradation over a large time window. For this, circuit breakers of a large distribution company were mapped. The mapped circuit breakers had their contact resistance tests, opening time and closing time evaluated. Because it is a large mass of data, machine learning techniques were used to cluster the circuit breakers according to their level of degradation and, consequently, the operational risk linked to the asset. Only SF<sub>6</sub> gas insulated circuit breakers with rated operational voltage of 138kV were analyzed. However, the rated operating standards of the circuit breaker vary by manufacturer and model. In this sense, a machine learning algorithm (K-Means) was used to cluster "n" samples among "k" groups, where each sample belongs to the closest group. However, before clustering, a dimension reduction technic was applied (principal component analysis - PCA). Then, it is possible to obtain a two dimension representation of the original database which enables the creation of Voronoy's diagrams of the clusters. So, it is possible to identify equipment that behaves differently from the rest of their family. These assets have a higher risk of failure. Several works have been published on the use of circuit breaker data to monitor asset's condition, however, the present work differs from the others because it uses a real database of field testes, with wide temporal variation (1977-2021).

**Keywords** – Circuit Breaker, K-Means, PCA, Asset Management.

## LISTA DE FIGURAS

1	Tripé - Gestão de ativos . . . . .	16
2	Exemplo - Disjuntor tipo tanque-vivo . . . . .	23
3	Exemplo - Disjuntor tipo tanque-morto . . . . .	23
4	Disjuntor - <i>puffer</i> . . . . .	25
5	Disjuntor - <i>self-blast</i> . . . . .	26
6	Exemplo - Curva da silhueta . . . . .	39
7	Exemplo - Curva do cotovelo . . . . .	39
8	Diagrama de blocos da metodologia . . . . .	42
9	Base de dados - Ano de fabricação dos disjuntores . . . . .	43
10	Base de dados - Número de ensaios por ano . . . . .	44
11	Base de dados - Histograma do número de ensaios por idade do ativo em anos . . . . .	45
12	Matriz de correlação de Pearson . . . . .	46
13	<i>Boxplots</i> - Tempos de abertura e fechamento . . . . .	48
14	<i>Boxplots</i> - Resistência de contato . . . . .	49
15	Diagrama de blocos - Teste 1 - Redução de dimensão . . . . .	51
16	Diagrama de blocos - Teste 2 - Redução de dimensão . . . . .	52
17	Curva da Silhueta - Teste 1 e 2 . . . . .	54
18	Curva do Cotovelo - Teste 1 e 2 . . . . .	55
19	Base de dados pós redução de dimensão . . . . .	56
20	Curva da Silhueta . . . . .	57
21	Curva do cotovelo . . . . .	58
22	Diagrama de Voronoy - k=4 . . . . .	60
23	Diagrama de Voronoy - k=5 . . . . .	60

# LISTA DE TABELAS

1	Portfólio de disjuntores - Grupo CPFL Energia . . . . .	15
2	Principais falhas - Disjuntores . . . . .	27
3	Monitoramento da condição de disjuntores - Principais variáveis . . . . .	28
4	Funcionamento - <i>Principal Component Analysis (PCA)</i> . . . . .	35
5	Funcionamento - <i>K-Means</i> . . . . .	37
6	Estatística Descritiva . . . . .	50
7	Propriedades - Teste de redução de dimensão . . . . .	54
8	Propriedades - Clusterização . . . . .	61
9	Tempos de operação - Manual do fabricante . . . . .	62

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

**ABB** *Asea Brown Boveri*

**AHC** *agglomerative hierarchical clustering*

**ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica

**BBC** *Brown Boveri Company*

**CIGRÉ** *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*

**DEC** duração equivalente de interrupção por unidade consumidora

**DT** *decision trees*

**DWMO** *density-weighted minority oversampling*

**FEC** frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora

**FTA** *fault tree analysis*

**GIS** *gas insulated substation*

**IDE** *Integrated Development Environment*

**IEC** *International Electrotechnical Commission*

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**IMARC** *International Market Analysis Research and Consulting*

**ISO** *International Organization for Standardization*

**MV** *machine vision*

**ONS** Operador Nacional do Sistema

**PCA** *principal component analysis*

**RC** resistência de contato

**SCADA** *supervisory control and data acquisition*

**SF6** hexafluoreto de enxofre

**SVM** *support vector machine*

**TA** tempo de abertura

**TF** tempo de fechamento

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
1.1	Motivação . . . . .	14
1.1.1	Contextualização . . . . .	14
1.1.2	Gestão de ativos . . . . .	15
1.2	Objetivos . . . . .	18
1.3	Estrutura do texto . . . . .	19
1.4	Publicação acadêmica . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>21</b>
2.1	Funcionamento do disjuntor . . . . .	21
2.1.1	Evolução histórica . . . . .	22
2.1.2	Meio de extinção - SF <sub>6</sub> . . . . .	24
2.1.3	Aspectos construtivos do disjuntor isolado a gás SF <sub>6</sub> . . . . .	24
2.1.4	Mecanismos de operação . . . . .	26
2.2	Monitoramento da condição de disjuntores . . . . .	27
2.2.1	Estado-da-arte - Monitoramento da condição . . . . .	29
2.2.1.1	Métodos tradicionais . . . . .	29
2.2.1.2	Métodos baseados em inteligência artificial . . . . .	32
2.3	Contribuições do trabalho . . . . .	33
2.4	Técnicas de inteligência artificial utilizadas . . . . .	35
2.4.1	<i>Principal Component Analysis (PCA)</i> . . . . .	35
2.4.2	<i>K-Means</i> . . . . .	37
2.4.2.1	Método da silhueta . . . . .	38
2.4.2.2	Método da curva do cotovelo . . . . .	38

<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>41</b>
3.1	Base de dados . . . . .	42
3.1.1	Análise exploratória - Correlação de Pearson e <i>boxplots</i> . . . . .	45
3.2	Redução de dimensão . . . . .	50
3.3	Clusterização . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>64</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	65
	<b>Referências</b>	<b>67</b>
	<b>Apêndice A – Exemplo - Ficha</b>	<b>72</b>

# 1 INTRODUÇÃO

*“The only thing that kept me going was that I loved what I did”*

-- Steve Jobs

## 1.1 Motivação

### 1.1.1 Contextualização

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro passou por diversas mudanças estruturais. Do lado regulatório, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) continua a sua trajetória de cobrança pela busca por excelência operacional das distribuidoras, com uma expressiva melhora dos indicadores de continuidade (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC)) em praticamente todas as concessionárias. Ao mesmo tempo, o cenário atual pós-pandemia - de instabilidade econômica, escassez hídrica e alta carga tributária das tarifas de energia - estabelece um contexto de necessidade por modicidade tarifária em proporções nunca antes observadas.

Neste cenário, a alocação ótima de capital em manutenção e substituição de ativos de forma a contribuir com a melhora dos indicadores de continuidade com o menor custo possível é obrigatória, [1]. Além disso, soma-se a essa condição o fato do setor elétrico mundial estar com ativos envelhecidos em operação, [2]. Essa condição tem obrigado as concessionárias a gradativamente migrarem o seu plano de manutenção preventivo, para um plano baseado na condição do ativo, [3] e o seu processo de tomada de decisão de substituição de ativos para processos cada vez mais estruturados e sistematizados, [2], [4].

A estratégia de manutenção - preventiva e programada - é definida pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) como “a manutenção programada para controlar, conservar e restaurar um equipamento ou linha de transmissão, para que sejam mantidas suas condições satisfatórias de operação e, assim, prevenir ocorrências que acarretem a sua indisponibilidade”, [5]. A grande desvantagem do plano de manutenção preventivo é que ele não é otimizado do ponto de vista de alocação de capital, gestão de risco e



performance do ativo. Isso ocorre pois o plano de manutenção preventivo assume que todos os ativos de uma determinada concessionária de energia degradam com a mesma velocidade e intensidade. Porém, como os ativos são expostos a diferentes condições operacionais, na prática, é pouco provável que essa degradação ocorra de maneira uniforme no portfólio de equipamentos da concessionária.

Por exemplo, é esperado que dois disjuntores - do mesmo modelo e fabricante - ao serem instalados em duas localidades diferentes - uma região urbana de um município localizado no litoral, com elevado nível cerâmico, grande quantidade de desligamentos temporários e com uma extensa rede a jusante e outra região rural de um município em região serrana, com baixo nível cerâmico, poucos desligamentos e com uma curta rede a jusante - sejam exigidos pelo sistema de proteção de forma muito diferente. Logo, é esperado que a degradação dos ativos ocorra em velocidades diferentes, o que naturalmente exigirá um plano de manutenção mais frequente para o primeiro cenário em comparação com o segundo cenário.

### 1.1.2 Gestão de ativos

Para saber a frequência ótima para a realização da manutenção em cada cenário é necessário a utilização de um plano de manutenção preditivo, isto é, baseado na condição do ativo. Este plano de manutenção é definido pela *International Organization for Standardization* (ISO) em sua norma 13372 de 2012 da [6], como toda manutenção que é direcionada a partir de sistemas de monitoramento da condição dos ativos.

O grande desafio da implementação de um plano de manutenção baseado na condição do ativo é que cada equipamento deve ser analisado individualmente. Esta tarefa torna-se complexa ao considerar-se o grande volume de ativos das concessionárias do setor elétrico. Na tabela 1, têm-se a quantidade aproximada de disjuntores do Grupo CPFL Energia em 2022 divididos por nível de tensão. Ao todo, as 571 subestações possuem mais de mil disjuntores de alta tensão (138-230kV).

Tabela 1: Portfólio de disjuntores - Grupo CPFL Energia

Tipo de ativo	CPFL Paulista	CPFL Piratininga	CPFL Santa Cruz	RGE	Quantidade Total
Subestações Próprias	286	58	74	153	571
Disjuntores de 138 - 230kV	741	182	62	98	1083
Disjuntores de 34,5 - 88kV	167	42	146	565	920

Nesse contexto, para a implementação sistêmica de políticas de gestão do ativo, as con-

cessionárias baseiam-se na ISO 55000:2014(EN), [7]. Essa norma define o termo “gestão de ativo” como um processo sistemático de gestão de risco financeiro e operacional de companhias a partir da exploração da performance ótima de seus ativos, de forma a gerar o maior valor possível para os acionistas da organização. Ativos são tudo o que tem potencial de gerar valor para uma organização. Eles são divididos em duas categorias: ativos físicos (por exemplo, equipamentos e maquinário) e ativos não-físicos (por exemplo, ativos financeiros, propriedades intelectuais e capital humano). No setor de infraestrutura, e em especial no setor elétrico, políticas de gestão de ativos são aplicadas majoritariamente em ativos físicos.

Para a gestão de ativos físicos, a ISO 55000 define um tripé, 1, onde o objetivo é o de demonstrar que ativos físicos bem geridos geram mais valor para ao longo do seu ciclo de vida quando são otimizados em performance, custo e risco. Para isso, deve haver um balanço entre essas três variáveis visto que elas são antagônicas. Neste contexto, quanto mais informações estiverem disponíveis sobre o ativo, melhor será a decisão a ser tomada para a sua gestão.

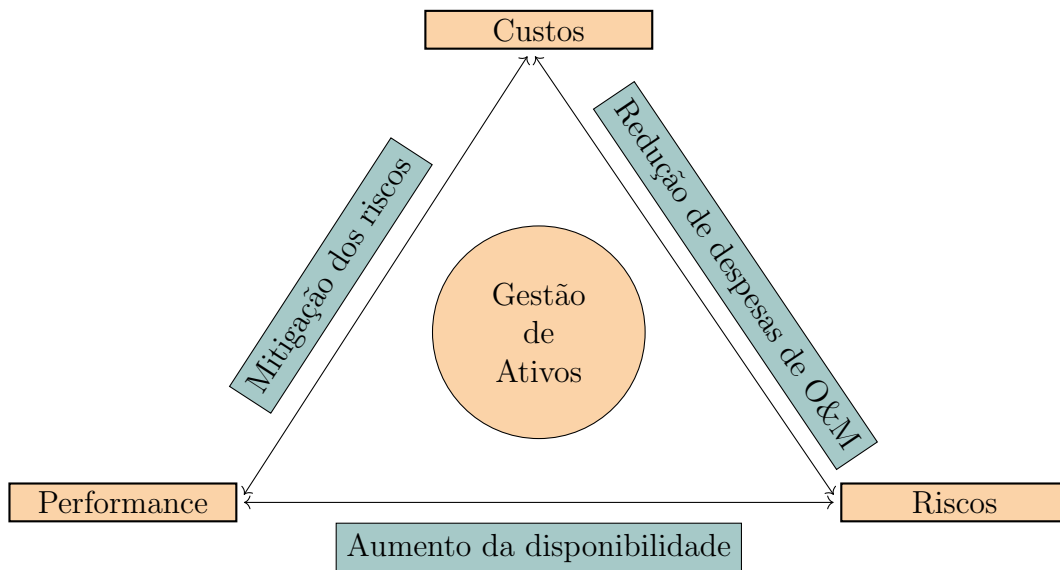


Figura 1: Tripé - Gestão de ativos

Por isso, um dos grandes desafios atualmente é a geração de informações a partir do grande volume de dados disponíveis. Nas últimas décadas, o setor elétrico brasileiro vem se digitalizando, existe uma crescente digitalização das informações, tanto de dados em tempo real (por meio de telemedições disponíveis nos sistemas *supervisory control and data acquisition* (SCADA) das concessionárias) quanto de dados amostrados humanamente (por meio de *tablets*, drones, câmeras termográficas e etc), [8]. Dentre os equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência, a digitalização e o monitoramento

da condição do ativo teve início com os equipamentos mais críticos, principalmente os transformadores de potência devido ao alto valor financeiro associado. Porém, na última década, as subestações digitais permitiram que o monitoramento contínuo e periódico da condição fosse estendido a outros equipamentos críticos sem grandes custos adicionais.

Dentre esses equipamentos, os disjuntores de alta tensão têm sido reconhecidos como um dos componentes mais importantes para a operação do sistema elétrico devido a sua função principal de seccionar o fluxo de energia elétrica protegendo os outros equipamentos de danos causados por altas correntes (curto-circuitos ou sobrecargas), [9].

No sistema elétrico de potência, o disjuntor é um dos equipamentos que compõem o sistema de proteção. Por isso, em caso de um curto-circuito em outro equipamento, se o disjuntor a montante falhar, a área isolada será ainda maior, [10], [11]. Além disso, outra característica do disjuntor que reforça a sua criticidade é o fato dele ser o único equipamento capaz de mudar a topologia da rede elétrica, [2], permitindo, por exemplo, transferência de carga em situações de emergência.

Neste contexto, o funcionamento e o aspecto construtivo do disjuntor é diferente de outros equipamentos. Por exemplo, ao compará-lo com outro equipamento de seccionamento, como a chave fusível, que opera apenas uma vez e então precisa ser substituída, o disjuntor pode operar diversas vezes. Esta característica obriga os componentes do disjuntor a resistirem a múltiplos esforços de grande concentração de energia – tanto térmicos quanto eletromagnéticos - causados naturalmente pela formação de arco elétrico durante o processo de interrupção do fluxo de energia elétrica. Os esforços térmicos ocorrem devido ao aquecimento da câmara de extinção do arco enquanto os esforços eletromagnéticos ocorrem devido ao campo eletromagnético gerado pelo arco elétrico formado durante o processo de interrupção do fluxo de energia elétrica, [12].

O comprimento do arco elétrico é proporcional à tensão de operação enquanto a energia é proporcional à corrente de falta, [13], [14]. Neste contexto, nota-se que o desenvolvimento sistemas elétricos de alta tensão que conhecemos hoje só foi possível graças ao desenvolvimento de disjuntores capazes de conter, resfriar e extinguir o arco elétrico de forma segura e controlada, suportando grandes esforços de grande concentração térmica e eletromagnética, [15].

Do ponto de vista de mercado, dados da consultoria de pesquisa de mercado *International Market Analysis Research and Consulting* (IMARC), [16], de 2022 estimam que o mercado global de disjuntores de alta tensão atingiu 8,6 bilhões de dólares no último ano. Para o futuro, a consultoria espera que o mercado atinja 10,6 bilhões de dólares em 2028.

Segundo a consultoria, o crescimento no volume de disjuntores instalados ocorre devido a três principais motivos:

- Necessidade de prover maior resiliência e flexibilidade para a operação de sistemas elétricos em alta tensão existentes;
- Substituição de ativos depreciados instalados nas décadas de 1960-1980;
- Expansão das redes elétricas devido ao aumento populacional e capacidade de geração.

Portanto, o disjuntor é um equipamento de extrema importância para garantir a integridade e segurança do sistema elétrico e dos equipamentos que o formam. Além disso, do ponto de vista financeiro, este equipamento também representa um ativo financeiro de alto valor agregado e crucial para a modernização do setor elétrico.

O entendimento de como e em qual intensidade o disjuntor tem as suas principais propriedades de performance deterioradas em função da exposição a esses esforços é estratégica pois permite a avaliação da condição do ativo, contribuindo para o processo de tomada de decisão na manutenção, diminuindo os riscos de operação e tornando mais eficiente a despesa de capital atrelado à manutenção desses equipamentos.

Assim, é possível atender simultaneamente as necessidades regulatórias de melhora dos indicadores de continuidade e de modicidade tarifária.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho pretende contribuir com um novo método para avaliação da degradação de disjuntores de alta tensão. Para as empresas do setor elétrico, sejam elas de geração, transmissão ou distribuição, os disjuntores constituem um dos ativos mais importantes técnica e economicamente.

Neste contexto, a metodologia apresentada contribui para a gestão da manutenção dos disjuntores pois torna possível a utilização do histórico de fichas de manutenção preventiva para a obtenção de informações que possibilitam a realização de manutenção preditiva. O principal ganho obtido é a redução do risco operacional ao identificar disjuntores que apresentam um comportamento diferente de outros disjuntores do mesmo modelo e fabricante.

É importante ressaltar que um dos principais objetivos para este trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia que não exigisse investimentos financeiros extras com novos sistemas de manutenção. Pelo contrário, a metodologia apresentada utiliza dados que já eram de posse da concessionária há décadas. Por se tratar de um trabalho desenvolvido a partir de uma base de dados real, a metodologia apresentada também contribui para identificar a degradação dos disjuntores ao longo do tempo visto que são analisados não só equipamentos com mais de 30 anos de operação, mas também disjuntores recém comissionados.

### 1.3 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em capítulos, que são descritos a seguir:

- **Capítulo 1 (Introdução):** Inicialmente, é feita uma introdução do cenário atual do setor elétrico e da importância do tema. Para isso, é feita uma breve contextualização da gestão de ativos no setor elétrico; Em seguida, são apresentados os objetivos do trabalho, a estrutura do texto e a publicação acadêmica.
- **Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica):** apresentação do funcionamento do disjuntor, do estado da arte no monitoramento da condição de disjuntores de alta tensão e das aplicações de técnicas de *machine learning* no setor elétrico (PCA e *K-Means*)
- **Capítulo 3 (Metodologia):** apresentação do diagrama de blocos da metodologia, apresentação e análise exploratória da base de dados e detalhamento da metodologia proposta de redução de dimensão e clusterização dos disjuntores.
- **Capítulo 4 (Resultados):** apresentação dos resultados obtidos após a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3. Análise dos diagramas de Voronoy e das propriedades de cada *cluster*.
- **Capítulo 5 (Conclusões):** conclusões finais sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

### 1.4 Publicação acadêmica

- Pereira, Leonardo do N.; Vendrameto, Helen V.; Manassero Jr., Giovanni; Fernandes, Wesley S.; **Avaliação da Degradação e da Confiabilidade de Disjuntores de Alta Tensão Utilizando Técnicas de *Data Science***; XXVI SNPTEE

- Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2022, Rio de Janeiro.

- Trabalho apresentado no Grupo de Subestações e Equipamentos (GSE) e premiado com o primeiro lugar (menção honrosa).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*“Why do bad things happen to good people?  
That only happened once and He volunteered”*

-- R. C. Sproul

Como visto no Capítulo 1, o disjuntor é um ativo crítico para a operação segura do sistema elétrico. Neste capítulo, será apresentado o funcionamento do disjuntor. Este equipamento possui um complexo sistema de operação e extinção do arco elétrico que ao ser exposto a grandes esforços mecânicos e eletromagnéticos degrada a performance do equipamento.

Após a apresentação do funcionamento, serão apresentadas as principais causas de falhas nesses equipamentos e o estado-da-arte no monitoramento da condição de variáveis relacionadas a degradação desse ativo. Em seguida, é feita uma comparação entre as diferenças do estado da arte do monitoramento de disjuntores de alta tensão e a metodologia que será apresentada no Capítulo 3.

Por fim, ao final do capítulo, a teoria das técnicas de *machine learning* que serão utilizadas no Capítulo 3 é apresentada.

### 2.1 Funcionamento do disjuntor

Para compreender a degradação da performance dos disjuntores, é necessário primeiramente apresentar o comportamento ideal do disjuntor. Por isso, com o objetivo de contextualizar o leitor acerca do seu funcionamento, o autor decidiu por brevemente apresentar um resumo da evolução histórica, do método de funcionamento e os mecanismos de operação dos disjuntores.

Para introduzir esse conceito, o autor utilizou três das principais referências acerca do funcionamento de disjuntores encontradas durante a pesquisa bibliográfica. As subseções da seção 2.1 são, portanto, baseadas nos livros abaixo:

- *Power Circuit Breaker Theory and Design*, [17];

- *High Voltage Circuit Breakers Design and Applications*, [18];
- *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*, [19].

As figuras desta seção, quando reproduzidas, são referenciadas aos respectivos livros.

### 2.1.1 Evolução histórica

O primeiro disjuntor de alta tensão, tal como conhecemos hoje, capaz de interromper correntes de 400A a 40kV, foi desenvolvido por Kelman e data de 1901. Desde então, diversos tipos e tecnologias de disjuntores foram desenvolvidas para as mais diversas aplicações. Por isso, existem diversas formas de classificar os disjuntores. As principais divisões são:

- Aspecto estrutural: tanque-vivo e tanque-morto. O que diferencia esses dois tipos construtivos é a câmara de extinção. Enquanto os disjuntores do tipo tanque-vivo apresentam a câmara no potencial elétrico da tensão de operação, os equipamentos do tipo tanque-morto apresentam a câmara de extinção no potencial do solo. A grande vantagem do disjuntor do tanque-morto é a possibilidade de adicionar-se medidores de corrente (TCs) em cada lado do equipamento, permitindo a sobreposição da zona protegida da linha de transmissão;
- Nível de tensão: baixa e alta tensão. Segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC), disjuntores com tensão nominal de operação acima de 1000V são classificados como disjuntores de alta tensão;
- Meio isolante: óleo, ar-comprimido, vácuo e SF<sub>6</sub>;
- Mecanismo de operação: mola, pneumático e hidráulico.

Nas figuras 2 e 3, são apresentadas fotos de disjuntores do Grupo CPFL Energia do tipo tanque-vivo e tanque-morto, respectivamente. Ambos os disjuntores possuem tensão nominal de operação de 138kV, são isolados a gás SF<sub>6</sub> e o mecanismo de operação é a mola.

Como o trabalho foi desenvolvido a partir de uma base de dados composta exclusivamente de disjuntores com tensão nominal de operação de 138kV isolados a gás SF<sub>6</sub>, nas próximas duas subseções, dar-se-á mais detalhes sobre esse meio de extinção e sobre os mecanismos de operação.





Figura 2: Exemplo - Disjuntor tipo tanque-vivo



Figura 3: Exemplo - Disjuntor tipo tanque-morto

### 2.1.2 Meio de extinção - SF<sub>6</sub>

O disjuntor isolado a gás SF<sub>6</sub> teve os seus primeiros equipamentos desenvolvidos pela empresa *Westinghouse* em 1957 nos Estados Unidos e por Delle Alsthom em 1964 na França. O primeiro modelo foi comercializado em 1959.

O hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) é um meio isolante, incombustível, atóxico, incolor, inodoro, altamente inerte e estável até a temperatura de 500°C pois apresenta uma estrutura molecular simétrica.

Essa estrutura torna o gás eletronegativo o que contribui para que tenha uma alta taxa de redução da sua condutância na passagem de corrente elétrica pelo seu valor nulo, ou seja, ele possui uma capacidade de capturar elétrons livres, removendo-os do arco elétrico.

Além disso, esse gás possui uma baixa temperatura de ionização e uma grande capacidade de troca de calor. Quando comparado ao ar atmosférico, a extinção de um arco elétrico é cem vezes mais rápida com o SF<sub>6</sub>. Ele apresenta também uma rigidez dielétrica 2.5 maior que a do ar atmosférico. Essa rigidez dielétrica é diretamente proporcional à pressão que o gás está submetido, dessa forma, quando a pressão aumenta, a rigidez dielétrica do gás também aumenta.

Por conta de todas essas propriedades e, em especial, a última propriedade, o gás SF<sub>6</sub> é hoje o principal meio de extinção de disjuntores de alta tensão.

Porém, o gás também apresenta as suas desvantagens. A principal delas é o impacto ambiental causado quando o gás é liberado para a atmosfera. O gás SF<sub>6</sub> é o gás com maior criticidade para o efeito estufa. O seu potencial de dano ao meio ambiente é da ordem de 20.000 vezes maior que o CO<sub>2</sub>.

### 2.1.3 Aspectos construtivos do disjuntor isolado a gás SF<sub>6</sub>

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade operacional e reduzir a energia gasta para a extinção do arco elétrico, diversos mecanismos de operação foram desenvolvidos para disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>, os principais são: *puffer* e *self-blast*.

- *Puffer*: possui um contato fixo e um contato móvel. O contato móvel é constituído de um pistão e um cilindro de compressão. No evento de abertura, o sistema mecânico assopra o gás para contato com o arco e, conforme o contato móvel se afasta, o cilindro comprime o gás dentro da câmara de extinção - aumentando assim a rigidez dielétrica do gás. Esse tipo de disjuntor é também subdividido entre sopro

simples e duplo, referente a construção física com uma ou duas câmaras de gás - uma de alta e outra de baixa pressão.

- *Self-blast*: possui apenas uma câmara de gás onde localizam-se os contatos. Quando o contato abre, ocorre um aumento de pressão na câmara devido ao calor gerado pelo arco.

Nas figuras 2 e 3, pode-se identificar que o disjuntor tanque-vivo é do tipo *puffer* enquanto o disjuntor tanque-morto é do tipo *self-blast*. A principal diferença entre o aspecto construtivo dos disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub> é que enquanto o *puffer* utiliza a energia mecânica disponibilizada pelo mecanismo de atuação para comprimir o gás, o *self-blast* utiliza o calor liberado pelo arco elétrico para aumentar a pressão do gás. Historicamente, o primeiro tipo é utilizado para disjuntores de tensões menores enquanto o segundo tipo é utilizado em tensões acima de 230kV. Porém, na última década, observa-se que o *puffer* tem sido o método preferido dos fabricantes para quase todos os níveis de tensão acima de 138kV.

Na figura 4 adaptada de [18], tem-se o princípio de funcionamento do disjuntor *puffer* com o contato fixo e o contato móvel composto pelo cilindro e o pistão de compressão.

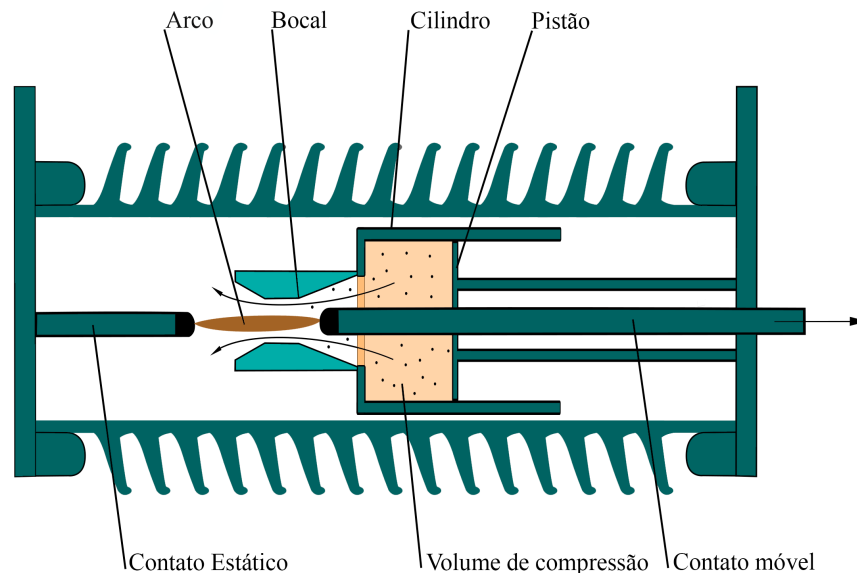


Figura 4: Disjuntor - *puffer*

Na figura 5 adaptada de [18], tem-se o princípio de operação do sistema *self-blast* onde (a) é o disjuntor fechado, (b) é o disjuntor fechado com o contato móvel em movimento e

o início do arco elétrico e, por último, em (c), tem-se a extinção do arco elétrico.

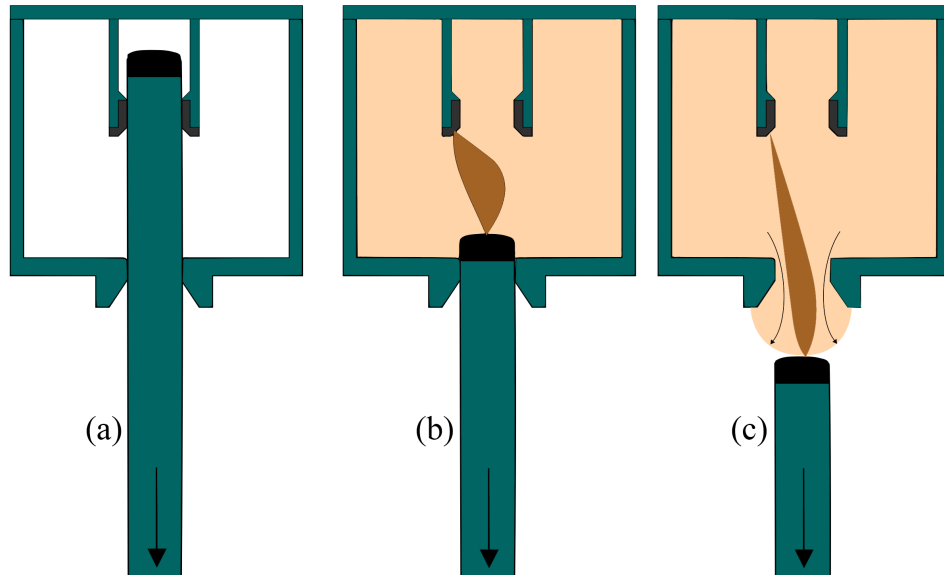


Figura 5: Disjuntor - *self-blast*

#### 2.1.4 Mecanismos de operação

Os três principais mecanismos de operação são: mola, hidráulico e pneumático.

A mola é tida como o mecanismo mais simples e confiável. Porém, ela geralmente é aplicada em condições onde a corrente de curto-circuito é inferior a 40kA. Acima disso, sistemas hidráulicos e pneumáticos são preferidos devido a quantidade de energia necessária para compressão do gás em dispositivos do tipo *puffer*.

Sistemas pneumáticos têm a sua origem nos disjuntores cujo meio de extinção é o ar comprimido. Nesse tipo de equipamento, o fechamento dos contatos é feito com a aplicação de ar em alta pressão sobre o pistão conectado ao contato móvel.

Existem sistemas pneumáticos em que tanto a abertura quanto o fechamento são feitos por ar comprimido e também existem sistemas em que durante o fechamento - por via pneumática - molas de abertura são carregadas e, para a abertura do equipamento, um solenoide é energizado ativando essas molas.

Tipicamente, esse aspecto construtivo possui um reservatório de ar comprimido suficiente para a realização de pelo menos 5 operações sem a necessidade de recarga da pressão entre essas operações.

Finalmente, os sistemas hidráulicos são uma variação dos sistemas pneumáticos. Ao invés de utilizar ar comprimido, esse mecanismo armazena nitrogênio em alta pressão para a movimentação dos contatos. Essa característica torna o sistema hidráulico mais compacto que o sistema pneumático.

As principais vantagens do sistema pneumático e hidráulico frente a mola é que a inércia de atuação é mais baixa. Porém, para disjuntores de 138kV, a grande maioria dos sistemas de operação são do tipo mola.

## 2.2 Monitoramento da condição de disjuntores

Historicamente, a manutenção do disjuntor de alta tensão é realizada em função do tempo em operação ou do número de operações que o equipamento realizou, o que ocorrer primeiro. Ou seja, é um plano de manutenção planejado com frequência dependente do tempo. Tipicamente, a periodicidade deste plano é definida pelo fabricante do equipamento e varia de modelo para modelo. Porém, para a migração do plano de manutenção tradicional para um plano de manutenção baseado na condição do ativo, é necessário entender as causas das principais falhas.

As principais causas para falhas em disjuntores são apresentadas na tabela 2, [20]:

Tabela 2: Principais falhas - Disjuntores

Tipo	Subtipo	Causa
Mecânica	Contatos móveis	Falta de lubrificação
Mecânica	Contatos móveis	Lubrificação endurecida ou pegajosa
Mecânica	Contatos móveis	Corrosão (inclui poeira e sujeira)
Mecânica	Contatos móveis	Partes dobradas ou quebradas
Mecânica	Contatos móveis	Desalinhamento
Mecânica	Interruptor auxiliar	Conexão dos pistão do contato móvel com o fixo
Mecânica	Interruptor auxiliar	Pinos faltando em junções
Mecânica	Interruptor auxiliar	Contatos principais grudados
Mecânica	Interruptor auxiliar	Travamento do mecanismo de fechamento
Elétrica	Falta de tensão	Fusível queimados
Elétrica	Falta de tensão	Cabo rompido
Elétrica	Falta de tensão	Cabo aterrado
Elétrica	Baixa tensão	Cabo comprimido
Elétrica	Baixa tensão	Conexões soltas
Elétrica	Baixa tensão	Conexões corroídas

Neste contexto, um estudo, [21], realizado na segunda maior concessionária de energia elétrica da China ao longo de dois anos obteve algumas conclusões após analisar disjuntores

com tensão nominal acima de 110kV que apresentaram defeito. Em primeiro lugar, foi identificado que as falhas aumentam com o aumento da tensão nominal de operação e com o tempo em operação do equipamento. Em segundo lugar, os autores também concluíram que os disjuntores operados unicamente por mola são os mais confiáveis, enquanto os modelos hidráulico-mola apresentam as maiores taxas de falha.

Uma vez entendido as principais falhas e como elas se comportam ao longo do tempo e por nível de tensão, é necessário entender o comportamento de variáveis críticas associadas a elas. Estudos globais conduzidos pelo *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ) sobre falhas em disjuntores de alta tensão - iniciados nos anos 1970 e atualizados em 2014 - indicam que 50% das falhas nesses equipamentos são de origem mecânica, 25% são relacionadas ao sistema de controle e serviço auxiliar e 25% podem ser atribuídas ao sistema de interrupção da corrente, [22], [23], [24], [25], [26]. Por isso, o estado-da-arte no monitoramento da condição de disjuntores concentra-se no estudo das variáveis que influenciam o comportamento mecânico do equipamento.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) também publicou diversos materiais sobre disjuntores. As formas de medição da resistência de contato são definidas na IEEE C37.10.1-2018, [27], que também apresenta orientações sobre o monitoramento de disjuntores (IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers), [28],[29]. Já em 2011, [30], o IEEE publicou um guia para investigação e análise de falhas em disjuntores. Nesses materiais, as principais variáveis estudadas são apresentadas na tabela 3, [9]:

Tabela 3: Monitoramento da condição de disjuntores - Principais variáveis

Descrição	Tipo	Unidade
Tempo de abertura por fase	Valor absoluto	[ms]
Tempo de fechamento por fase	Valor absoluto	[ms]
Número de operações	Valor absoluto	Quantidade de operações
Resistência de contato por fase	Valor absoluto	$[\mu\Omega]$
Vibração	Valor absoluto	$[m/s^2]$
Soma das corrente de curto-circuito “n”	Valor absoluto	$\sum_{n=1}^n I_n^2 t [A^2 s]$
Pressão de gás SF <sub>6</sub>	Valor absoluto	[MPa]
Corrente de carregamento da bobina	Oscilografia	Não se aplica
<i>Travel curve</i>	Oscilografia	Não se aplica

Das variáveis acima, a literatura, [24], indica que o monitoramento dos tempos de abertura & fechamento e a soma das correntes de curto-circuito & resistência de contato são bons parâmetros para indicar desgaste mecânico e corrosão dos contatos, respectivamente.

Outro fator importante a ser observado sobre as variáveis monitoradas dos disjuntores é que a primeira a apresentar degradação das suas propriedades é a resistência de contato, [12]. Por isso, os estudos sobre o monitoramento da condição de disjuntores concentram-se nesta última propriedade. Existem trabalhos sobre a integridade dos contatos do disjuntor desde 1969, [31].

Sobre o monitoramento em tempo-real da condição de disjuntores de alta tensão isolados a gás SF<sub>6</sub>, um dos primeiros trabalhos publicados é de 1989, [32]. Neste trabalho, o autor já utiliza as seguintes variáveis em sua análise: tempos de abertura/fechamento e pressão de gás SF<sub>6</sub>.

## 2.2.1 Estado-da-arte - Monitoramento da condição

Existem diversas técnicas para monitoramento da condição de disjuntores. Essas técnicas também podem ser divididas em diversas categorias. Neste trabalho, optou-se por segregar as técnicas de monitoramento da condição em técnicas baseadas em modelos tradicionais e técnicas baseadas em modelos de inteligência artificial.

### 2.2.1.1 Métodos tradicionais

Em [15], Mohammadhosein apresenta uma metodologia para avaliar de forma online a perda de massa dos contatos de disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>. Em sua conclusão, o autor propõe um equacionamento para cálculo da perda de massa dos contatos em função da corrente máxima de curto-circuito, do tempo de duração do arco elétrico e da energia do arco elétrico. Essa erosão causada nos contatos reflete-se indiretamente no ensaio elétrico de resistência de contato.

Em [33], Liu aborda uma das fragilidades do ensaio dinâmico de resistência de contato: este ensaio é influenciado pelo desgaste da meio mecânico de atuação. Em disjuntores de alta tensão isolados a gás SF<sub>6</sub>, esses meios são principalmente a mola e/ou pressão hidráulica. Se a mola estiver fatigada ou houver uma baixa pressão hidráulica no momento do teste, os resultados serão influenciados. Neste contexto, o autor realizou diversos ensaios em velocidades diferentes de abertura do disjuntor e, com uma abordagem baseada no método dos elementos finitos, concluiu que quanto maior a velocidade de abertura, maior a resistência de contato dinâmica e que o calor gerado pelo seccionamento da corrente é muito maior do que o calor gerado devido à fricção dos contatos.

Neste contexto, [34], Landry apresenta uma nova forma de realizar o ensaio dinâmico



de resistência de contato. O autor defende que em disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>, os fluoretos metálicos (partículas brancas e cinzas formadas nos contatos durante o processo de extinção do arco elétrico) impedem a correta medição da resistência de contato. Por isso, o autor apresenta uma metodologia baseada em três principais variáveis: a velocidade dos contatos do disjuntor, a corrente injetada e a presença de fluoretos metálicos depositados nos contatos do disjuntor. Landry, [35], também apresentou uma técnica de ensaio dinâmico da resistência de contato utilizando não só disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub> como também disjuntores a ar-comprimido.

Ainda sobre a resistência de contato dinâmica, em [36], Khoddam avalia a performance dos disjuntores a partir da correlação entre vários níveis de degradação dos contatos e as formas de onda obtidas nos ensaios dinâmicos de resistência de contato. Por último, a autora calcula também o *health-index* dos disjuntores.

Acerca da oscilografia da *Travel curve*, Bokoro, [37], apresenta uma metodologia estatística feita em 40 disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>. Neste trabalho, o autor realiza uma análise de variância para identificação de anomalias.

Bokoro também estudou os tempos de abertura e fechamento do disjuntor, [38]. Neste trabalho, Bokoro concluiu que os tempos de abertura e fechamento obedecem uma distribuição normal, o que permitiu a realização de testes de hipótese para identificação do desvio aceitável entre fases do disjuntor. O autor conclui que na base de dados observada - composta por 40 disjuntores de 72,5kV isolados a gás SF<sub>6</sub> de um mesmo modelo e fabricante - o desvio máximo permitido é de 0,661ms.

Em [39], Meier demonstra a capacidade de monitoramento dos tempos de abertura do disjuntor por meio de um sistema radiométrico. O trabalho concentrou-se em disjuntores de subestações isoladas a gás (*gas insulated substation* (GIS)) pois, devido a sua natureza fechada os desafios para instalação de sistemas de monitoramento são maiores em relação a subestações isoladas a ar. Para isso, os autores inicialmente demonstram como é feito a identificação da ignição e da extinção do arco elétrico a partir dos pulsos eletromagnéticos emitidos e como os autores utilizam essa informação para avaliar a integridade do disjuntor.

Oliveira também utiliza monitoramento radiométrico durante operações de abertura de disjuntor, [40]. Desta forma, o autor consegue calcular diversos parâmetros do disjuntor, dentre eles, a duração e a energia do arco elétrico, que são analisados por meio de uma abordagem estatística para correlacionar os parâmetros calculados com a degradação dos contatos do disjuntor. A técnica foi utilizada utilizando 9 equipamentos diferentes.



Em [41], Guo apresenta uma abordagem baseada em *fault tree analysis* (FTA) para avaliar a probabilidade de falha de disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>. Esta abordagem é multivariável, isto é, ela modela diversos tipos de falha que podem acontecer em disjuntores de alta tensão, desde falhas na mola, até falha nos contatos do equipamento. Por fim, o autor calcula o *health-index* do equipamento utilizando a probabilidade de falha de cada subsistema do ativo.

Zhong também desenvolveu um modelo multivariável do disjuntor, [42]. Esse modelo considera diversas propriedades do disjuntor e é inserido em uma Cadeia de Markov para posterior aplicação dentro de um modelo de confiabilidade geral da subestação.

Em [10], Bagherpoor defende que a câmara de extinção é a parte mais sensível do disjuntor e que o monitoramento online é difícil do ponto de vista técnico devido à alta concentração de ruído eletromagnético e à presença de tensões transitórias de recuperação. Neste contexto, o autor propõe uma técnica de avaliação da condição da câmara de extinção a partir da medição da tensão durante abertura e fechamento do disjuntor e uma expectativa de vida útil remanescente do disjuntor baseado na somatória das correntes de curto-circuito.

Em [23], Razi-Kazemi propõe uma metodologia para identificação de falhas na corrente de carregamento da bobina de disjuntores. O autor reforça porém que para melhor entendimento de falhas de disjuntores, deve ser melhor estudado a relação entre a curva de carregamento da bobina e os tempos de abertura e fechamento do disjuntor.

Em [3], Dehghanian apresenta uma avaliação do ciclo de vida de disjuntores utilizando dados obtidos por sistemas de monitoramento da condição em tempo-real. A estratégia utilizada para essa avaliação é probabilística e, assim como Razi-Kazemi, baseada na oscilografia da corrente de carregamento da bobina.

Em [24], Rudd realiza um ranqueamento de uma base de dados de disjuntores a partir da prioridade de manutenção calculada em função de dados de temperatura e pressão de gás SF<sub>6</sub>. O autor desenvolve esse ranking a partir de regressões que predizem quando a pressão do disjuntor estará próximo ao limite definido pelo fabricante. Essa informação é estratégica para o planejamento da manutenção do ativo pois permite que a manutenção de vazamento do disjuntor seja programada com outras tarefas do disjuntor, otimizando o tempo em que o ativo fica desconectado da rede para manutenção.

### 2.2.1.2 Métodos baseados em inteligência artificial

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram feitos sobre a utilização de técnicas de Inteligência Artificial para monitoramento da condição de equipamentos do setor elétrico, e em especial, de disjuntores [2].

Técnicas de Inteligência Artificial (IA) são tecnologias que conseguem simular capacidades humanas ligadas à inteligência. Elas são capazes, por exemplo, de aprender a reconhecer padrões, ou de forma similar, a identificar anomalias. Esta capacidade tem sido cada vez mais explorada em diversas áreas do setor elétrico. Como visto no Capítulo 1, o setor elétrico se digitalizou ao longo dos últimos 20 anos e isso criou grandes massas de dados que agora podem ser processadas computacionalmente com o objetivo de obtenção de informações estratégicas .

Por um lado, a principal vantagem da utilização dessas técnicas está no fato de que o diagnóstico de falhas em disjuntores é um problema de classificação multi variável o que o torna difícil de ser analisado humanamente. Além disso, os disjuntores apresentam um comportamento dependente da característica mecânica do ativo (e, conseqüentemente, do modelo/fabricante) o que torna a análise ainda mais difícil, [43]. Por outro lado, um dos desafios é o fato que o disjuntor comporta-se corretamente na maior parte do tempo, [44], por isso, abordagens baseados em inteligência artificial devem contornar a condição de grande desbalanceamento na amostra de dados.

Em [43] e [45], Razi-Kazemi apresenta um sistema de monitoramento online a partir da análise das formas de onda da *Travel curve* de disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>. Essa abordagem. é defendida devido a facilidade de acessar a informação de forma não invasiva. O autor então aplica um processo de mineração de dados (data-mining) utilizando o algoritmo *agglomerative hierarchical clustering* (AHC) para clusterizar as formas de onda em comparação a formas de onda anteriores do mesmo equipamento. Por fim, o autor apresenta uma abordagem probabilística para classificar o risco operacional de cada equipamento.

Em [44], Chen propõe uma solução para dados desbalanceados, ele aplica o algoritmo *density-weighted minority oversampling* (DWMO) para balancear os dados por meio de amostras sintéticas, e então, analisa a *Travel curve* de disjuntores isolados a gás SF<sub>6</sub>.

Em [2], Khalyasmaa aborda a utilização de técnicas de *machine learning* para identificar correlações implícitas e automatizar o processo de tomada de decisão da manutenção de disjuntores. O método baseia-se no algoritmo *decision trees* (DT). A autora também

reforça a utilização de dados reais coletados em ensaios de campo.

Em [46], Deng apresenta uma metodologia que aplica o algoritmo MV (machine vision) em imagens obtidas a partir de câmeras de alta performance para obter a *Travel curve* do equipamento. Ao comparar os valores obtidos por meio do algoritmo MV com a oscilografia real da *Travel curve*, o autor obteve um erro de apenas 4%.

Em [47], Liu apresenta uma metodologia para avaliação da condição mecânica de disjuntores de alta tensão por meio de testes na mola do equipamento. Para isso, o autor utiliza diversos algoritmos de *machine learning* - *support vector machine* (SVM), *random forest* e *deep neural networks* - com o objetivo de identificar a condição do ativo. Em sua conclusão, por meio de matrizes de confusão, autor pondera que o algoritmo *random forest* foi o que apresentou a melhor acurácia e com o menor tempo de processamento.

Em [48], Rong apresenta uma metodologia para reconhecimento da condição mecânica de disjuntores de média tensão baseado em redes neurais artificiais. Neste trabalho, o autor também realiza uma comparação entre dados simulados e dados reais medidos em laboratório, e conclui que as simulações podem ser uma alternativa em virtude da dificuldade prática em remover um ativo de campo para testes em laboratório.

Em [49], Boyaci apresenta uma metodologia baseada em vibração para identificação de falhas em disjuntores de média tensão. No total, foram feitos 291 operações de abertura e fechamento e os sinais de vibração foram então medidos. Com essa base de dados, o autor aplicou uma técnica de *deep learning* chamada de *Autoencoder* para identificar comportamentos anômalos.

## 2.3 Contribuições do trabalho

O método proposto se diferencia dos demais em:

- Base de dados:
  - Enquanto os trabalhos de Bokoro, Landry e Razi-Kazemi apresentam metodologias de monitoramento da condição baseados em estudos feitos em disjuntores específicos, o trabalho apresenta um estudo com espaço amostral diverso em relação ao tipo do equipamento. Isto é, conforme seção 3.2, a base de dados utilizada é composta por disjuntores de 9 diferentes fabricantes, tanto de disjuntores do tipo tanque-vivo quanto disjuntores do tipo tanque-morto. No estudo realizado, as únicas variáveis fixadas são o nível de tensão (138kV) e o

meio de extinção (gás SF<sub>6</sub>).

- Enquanto os trabalhos de Bagherpoor, Dehghanian e Liu propõem sistemas de monitoramento em tempo real, o trabalho utiliza as fichas de ensaio da concessionária ao longo de uma grande janela temporal (17 anos). Dessa forma, o estudo compara disjuntores novos - que entraram em operação em 2017 - e disjuntores antigos - que entraram em operação em 1977;
  - Enquanto Mohammadhosein, Bokoro, Razi-Kazemi, Landry e Deng desenvolvem as suas metodologias a partir de ensaios obtidos em laboratório, o trabalho utiliza uma base de dados obtida por meio de ensaios reais realizados em campo.
- Quanto ao método utilizado:
    - Semelhantemente a Guo e Zhong, o método apresenta uma abordagem multivariável - o modelo utiliza 9 variáveis por disjuntor. Porém, Guo e Zhong não utilizam técnicas de redução de dimensão - o que dificulta a interpretação humana;
    - Semelhantemente a Chen, o método proposto contorna a condição de desequilíbrio entre dados “saudáveis” e “degradados”. Porém, ao invés de criar dados artificiais a partir de técnicas de *oversampling*, o método realiza uma clusterização baseada na distância entre as variáveis de cada disjuntor, conforme seção 3.5;
    - Enquanto os métodos apresentados na seção 2.2 concentram-se na estratégia de avaliar a degradação do equipamento ao longo do tempo (o que indica uma perda da performance do equipamento) o método proposto no Capítulo 3 apresenta uma estratégia diferente. O autor propõe que ao clusterizar uma grande base real e diversa de disjuntores, é possível obter as famílias de disjuntores em cada *cluster*. Dessa forma, a identificação de disjuntores com perda de performance ocorre de forma diferente aos trabalhos existentes: o disjuntor que pertence a uma família e não foi clusterizado no *cluster* onde a maioria dos disjuntores da sua família estão apresenta uma degradação diferente do restante da família e, portanto, precisa ser avaliado. Adiciona-se que durante a etapa de revisão bibliográfica, não foram encontrados, nos principais periódicos de sistemas elétricos de potência, trabalhos sobre o monitoramento da condição de disjuntores de alta tensão utilizando técnicas de clusterização multivariável.

Por isso, o método proposto contribui com:

- Facilidade na identificação da degradação da performance de disjuntores, em especial, disjuntores isolados a gás SF6 com tensão nominal de 138kV;
- Permitir visualizar graficamente a performance de todo o parque de disjuntores da concessionária;
- Permitir a utilização de 9 variáveis diferentes do disjuntor para melhor identificar o seu comportamento, o que permite futuros estudos com a mesma metodologia e adição de novas variáveis;
- Aplicação real de técnicas de *machine learning* (redução de dimensão e clusterização) na gestão de ativos de equipamentos elétricos de alta tensão.

## 2.4 Técnicas de inteligência artificial utilizadas

Nesta seção, o autor optou por apresentar a teoria das técnicas de *machine learning* que serão utilizadas no capítulo de metodologia deste trabalho.

### 2.4.1 *Principal Component Analysis (PCA)*

É uma técnica de redução de dimensão desenvolvida de forma independente por Karl Pearson e Harold Hotelling em 1901 e 1930, respectivamente, [50], [51], [52]. Esta técnica consiste em transformar um conjunto de dados iniciais de “d” variáveis correlacionadas em um novo conjunto de dados composto por variáveis não correlacionadas. O novo conjunto é formado por combinações lineares das “d” variáveis originais. A principal vantagem em realizar essa transformação é que o conjunto de saída possui uma ordem decrescente de importância. Isto é, o primeiro vetor representa a maior parte da variância. Desta forma, é possível realizar uma redução da dimensão sem gerar perda de informação, [53].

A tabela 4 apresenta o passo a passo para a implementação desse método.

Tabela 4: Funcionamento - *Principal Component Analysis (PCA)*

Passo	Descrição
1	Obter base de dados ( $X$ ) com “n” amostras e “d” dimensões
2	Calcular a média de cada vetor (amostra)
3	Calcular a matriz de covariância da base de dados
4	Calcular os autovalores e os autovetores da matriz de covariância
5	Ordenar os autovetores pelos autovalores em ordem decrescente
6	Transformar a base de dados original utilizando os “t” autovetores escolhidos

- Primeiro passo: considere um banco de dados ( $X$ ) de “d” variáveis e “n” amostras. É possível escrever essa base de dados por meio de uma matriz  $n \times d$ :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1d} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nd} \end{bmatrix}$$

- Segundo passo: calcular a média de cada vetor, 2.1:

$$\bar{\mathbf{X}} = [\bar{x}_{11} \quad \bar{x}_{12} \quad \bar{x}_{13} \quad \dots \quad \bar{x}_{dn}]$$

onde

$$\bar{x}_{id} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n x_{id}, \text{ para cada coluna “d”} \quad (2.1)$$

- Terceiro passo: em seguida, é obtida a matriz de covariância “C” por meio da fórmula 2.2:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \quad (2.2)$$

- Quarto passo: cálculo dos autovalores e autovetores da matriz de covariância, 2.3:

$$cov(x, y) \times T = \lambda \times T \quad (2.3)$$

onde  $\lambda$  e  $T$  são respectivamente os autovalores e os autovetores da matriz  $cov(x, y)$

- Quinto passo: ordenar os autovetores a partir dos autovalores em ordem decrescente. Desta forma, os primeiros autovetores representam a maior parte da variância da matriz  $X$ . Se os autovalores forem próximos de zero, eles representam componentes sem representação na variância e, portanto, podem ser descartados.
- Sexto passo: transformar a base de dados original multiplicando a matriz original com a matriz de autovetores obtida no passo 5. Essa nova base de dados,  $PCA$  - 2.4, é de dimensão “t”, onde  $t < d$ .

$$PCA_{nt} = X_{nd} \times T_{dt} \quad (2.4)$$

Desta forma, é possível obter a redução da dimensão da base de dados inicial  $X_{nd}$  com “d” colunas para uma nova base  $PCA_{nt}$  com o mesmo número de amostras “n” mas agora com “t” colunas, sendo  $t < d$ .

## 2.4.2 *K-Means*

*K-Means* é um algoritmo apresentado primeiramente por Stuart Lloyd em 1957, [54]. O algoritmo foi independentemente desenvolvido e publicado por Edward W. Forgy em 1965, [55]. Porém, o nome “*K-Means*” só foi utilizado por James MacQueen em 1967, [56]. A sua aplicação principal é distinguir dados, o que torna possível a sua aplicação para a detecção de anomalias, [57]. Por isso, há registro de aplicações desta técnica em diversas áreas da ciência, desde astronomia, imagem computacional, até análises de mercado.

O algoritmo apresenta diversas vantagens. Em primeiro lugar, o fato de ser um método iterativo baseado na distância para segregação de um conjunto de dados o torna de fácil compreensão. Além disso, o método é relativamente rápido se comparado a outros algoritmos de clusterização, [58], [57]. Porém, o *K-Means* também apresenta desvantagens, a principal delas é que conforme o número de variáveis de entrada aumenta, o algoritmo converge para um valor constante. Por isso, a aplicação do *K-Means* quase sempre está associada a um pré-tratamento para redução da dimensão. Uma outra vantagem, em realizar a redução de dimensão, está na possibilidade de visualização gráfica em duas dimensões dos *clusters* obtidos, o que permite a análise e interpretação humana.

O funcionamento do algoritmo *K-Means* é descrito na tabela 5:

Tabela 5: Funcionamento - *K-Means*

Passo	Descrição
1	Input: o número de <i>clusters</i> “k” e uma base de “n” amostras
2	Escolha “k” pontos da sua base de dados como centróides iniciais
3	Aloque cada amostra “n” ao centróide mais próximo
4	Calcule a distância de cada amostra “n” até o centróide mais próximo
5	Recalcule o centróide de cada <i>cluster</i>
6	Repita o processo até que os centróides converjam (não se alterem)

No step 4, a distância da amostra “n”,  $d_n$ , é calculada utilizando a fórmula da distância euclidiana, 2.5, onde  $(x_n, y_n)$  são as coordenadas da amostra “n” e  $(x_k, y_k)$  são as coordenadas do centróide “k” mais próximo. O algoritmo inicialmente foi apresentado utilizando-se a distância Euclidiana, mas ele também pode utilizar a distância de Mahalanobis ou outras funções de distância, [57].

$$d_n = \sqrt{(x_n - x_k)^2 + (y_n - y_k)^2} \quad (2.5)$$

O principal ajuste a ser feito no algoritmo é, no primeiro passo, a escolha do número de *clusters* “k”. Existem duas formas de escolher a quantidade “k” de *clusters* ideal para cada base de dados: a análise da silhueta e o método da curva do cotovelo (*Elbow Method*). Em ambos os métodos, testa-se diversos valores de “k” para escolher o número de *clusters* ótimo para cada base de dados.

#### 2.4.2.1 Método da silhueta

O método da análise da silhueta foi proposto pelo estatístico belga Peter Rousseeuw em 1987, [59]. Ele é uma medida de quão similar as amostras são dentro do *cluster* “k” em relação as outras amostras fora do *cluster* “k”. Matematicamente, essa relação pode ser expressa por, 2.6:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max \{a(i), b(i)\}} \quad (2.6)$$

Onde:

- $S(i)$  é o coeficiente de silhueta da amostra “i”;
- $a(i)$  é a média da distância entre a amostra “i” e todas as amostras que pertencem ao *cluster* “k”;
- $b(i)$  é a média da distância da amostra “i” até todas as amostras que não estão no *cluster* em que a amostra “i” faz parte.

Assim, é possível obter um gráfico onde o eixo x é o número de *clusters* testado e o eixo y é a soma da silhueta de cada amostra, figura 6.

O valor da silhueta está no intervalo aberto  $[-1,1]$  e quanto mais próximo de 1, mais compacto e coeso estão os dados. Por isso, o valor de k que apresentar o maior valor de silhueta é o ideal para ser utilizado no primeiro passo da tabela 5.

Por exemplo, na figura 6 o método possui valor máximo para  $k = 4$  ( $S = 0.8$ ), portanto, o número ideal de *clusters* para essa base hipotética é quatro. Na figura, o valor da silhueta foi calculado para “k” variando entre 2 a 10 *clusters*

#### 2.4.2.2 Método da curva do cotovelo

O método da curva do cotovelo descreve a distorção medida pela soma do erro quadrático ( $\epsilon_q$ ) a cada valor de “k” testado, [60]. A sua fórmula é, 2.7:



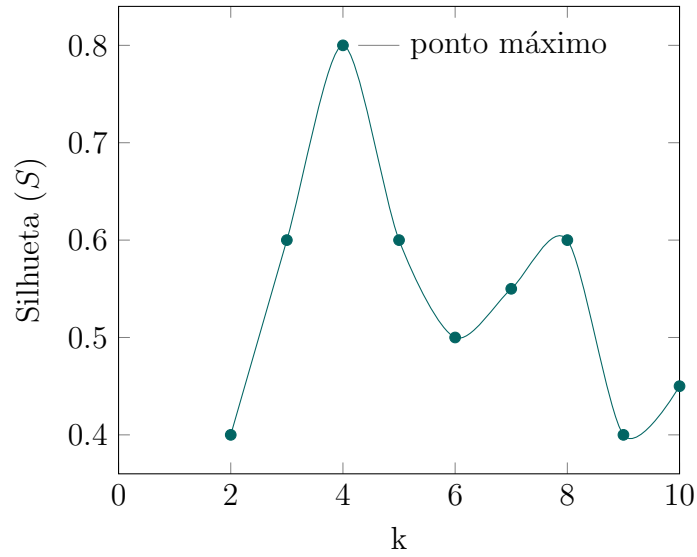


Figura 6: Exemplo - Curva da silhueta

$$\epsilon_q = \sum_{k=1}^k \sum_{n=1}^n d_{n,k}^2 \quad (2.7)$$

Onde  $\epsilon_q$  é soma do erro quadrático e  $d_{n,k}$  é a distância de cada amostra “n” ao seu respectivo centróide “k”. Ou seja, quanto menor o valor da soma do erro quadrático, mais próximos estão as amostras dos seus respectivos centróides.

Desta forma, é possível obter um gráfico onde o eixo x é o número de *clusters* testado e o eixo y é a soma do erro quadrático. O método consiste então em escolher como “k” o “ponto ótimo” onde um “k” maior iniciaria a apresentar *overfitting*. Diferentemente do método da silhueta, o método da curva do cotovelo é, portanto, um método visual.

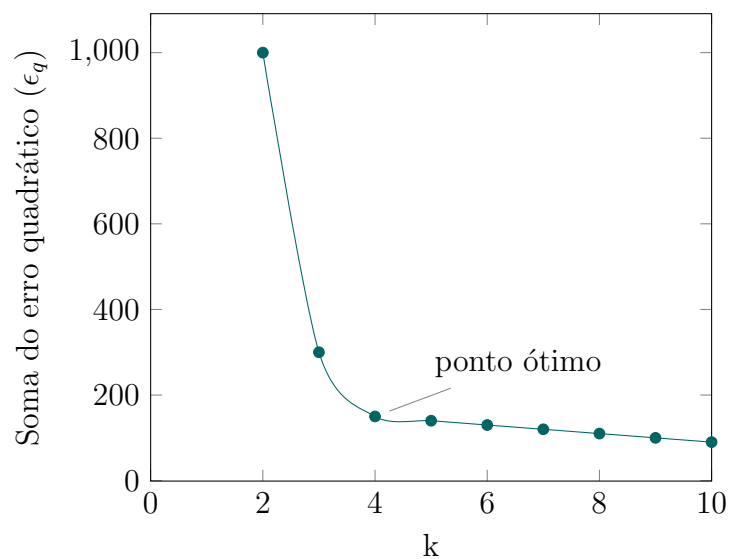


Figura 7: Exemplo - Curva do cotovelo

Por exemplo, na figura 7, o número de *clusters* a partir do qual começa a ocorrer *overfitting* é  $k = 4$ , portanto, o número ideal de *clusters* para essa base hipotética é quatro.

Devido a sua semelhança a um cotovelo, o método é chamado de curva do cotovelo.

### 3 METODOLOGIA

*“O temor do Senhor é o princípio do saber,  
mas os loucos desprezam a sabedoria e o  
ensino.”*

-- Provérbios 1:7

Conforme figura 8, o capítulo de metodologia é composto por três seções que representam as três etapas utilizadas no desenvolvimento da metodologia deste trabalho.

- Etapa 1 - Base de dados:

A primeira etapa é o entendimento da base de dados. Inicialmente foi realizada uma análise de correlação entre as variáveis com o objetivo de entender como elas se relacionam entre si. Em seguida, foi realizada uma análise estatística descritiva com o objetivo de entender a distribuição das variáveis. Na etapa de análise descritiva, foram produzidos *boxplots* das variáveis de entrada. Desta forma, foi possível estabelecer a melhor estratégia de clusterização dos dados.

- Etapa 2 - Redução de dimensão:

A segunda etapa consiste na preparação para a clusterização. Para isso, o autor fez dois testes para obter a melhor forma de reduzir a dimensão da base de dados sem distorcer a distância entre as variáveis dos disjuntores.

- Etapa 3 - Clusterização:

Após a redução da dimensão, a última etapa é a clusterização da base de dados. Para isso, são aplicadas duas técnicas para escolha do número ideal de *clusters*. Após a aplicação das técnicas, foi feita uma análise baseada no comportamento dos sistemas elétricos de potência para a escolha do número ideal de *clusters*.

A matriz de correlação de Pearson, os *boxplots*, a redução de dimensionalidade utilizando o PCA e a clusterização utilizando o *K-Means* foram implementados no *IDE Spyder* utilizando a linguagem de programação *Python*. As bibliotecas utilizadas foram: *pandas*, *seaborn*, *matplotlib* e *scikit-learn*.

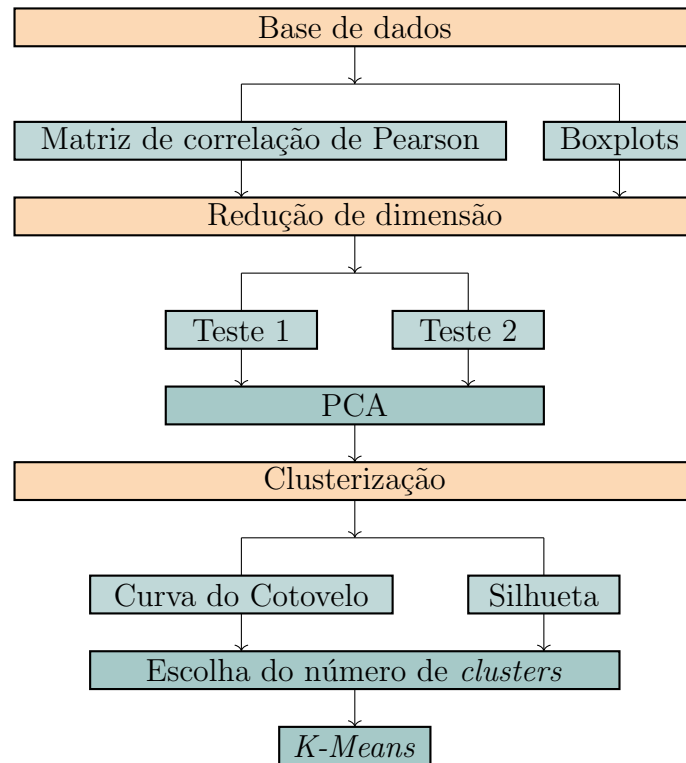


Figura 8: Diagrama de blocos da metodologia

### 3.1 Base de dados

A base de dados foi formada utilizando um histórico de ensaios elétricos e mecânicos realizados em disjuntores de 138kV isolados a gás ( $\text{SF}_6$ ) das distribuidoras do Grupo CPFL Energia entre os anos de 2007 e 2021 - ver Apêndice A. Essa base de dados representa os ensaios que foram digitalizados no período e não a totalidade dos ensaios realizados.

Conforme figura 9, a base de dados é composta por disjuntores fabricados em um intervalo de 40 anos - entre 1977 e 2017. Os anos de 1991, 2010, 2011 e 2012 são os anos em que mais disjuntores foram fabricados, com uma média de 23 equipamentos ao ano.

Desta forma, foi possível obter uma base de dados composta por 226 ensaios. O portfólio de equipamentos é composto por nove fabricantes diferentes: ABB, Alstom, Areva, Brown Boveri Company, Croptom Greaves, Lorenzetti, Merlin Gerin, Schneider Electric e Siemens. No total, existem 25 modelos diferentes. Os dois principais modelos representam juntos 107 equipamentos, ou seja, 47% da base de dados.

Na figura 10, é possível ver o número de ensaios realizados a cada ano para a formação da base de dados. Ela foi elaborada ao longo dos últimos 14 anos - entre os anos de 2007 e 2021. O ano de 2018 foi o ano com mais ensaios, um total de 42 equipamentos.

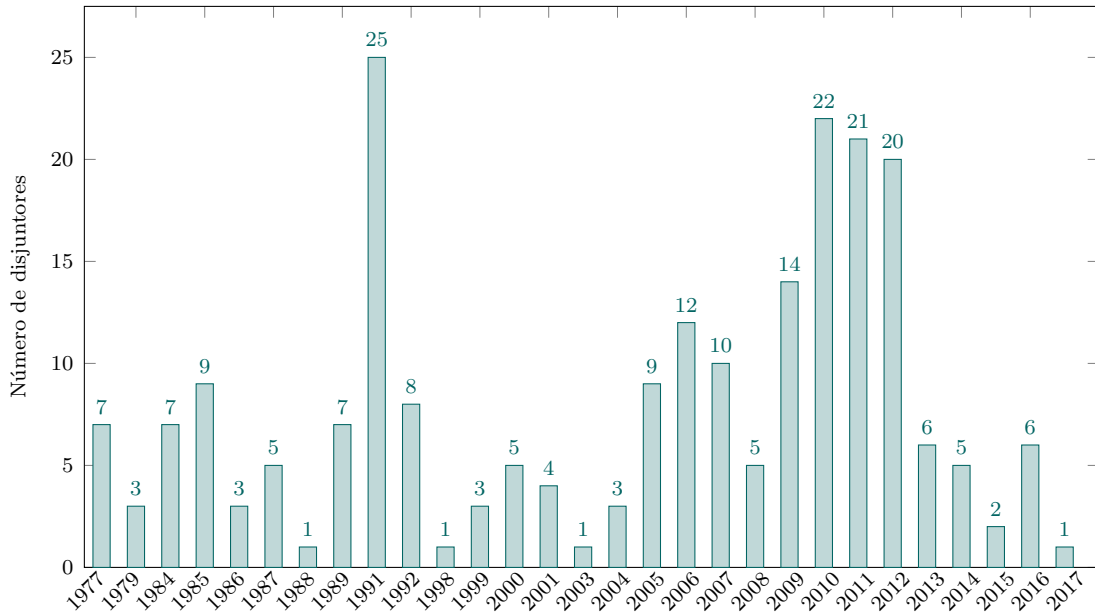


Figura 9: Base de dados - Ano de fabricação dos disjuntores

Neste ponto, vale destacar que o objetivo de utilizar esta base de dados é avaliar a degradação dos disjuntores ao longo do tempo. Por isso, optou-se por não detalhar quais modelos apresentam pior e melhor performance.

Como visto na figura 9, a base de dados é composta por disjuntores com uma janela temporal de data de fabricação de 40 anos. É impraticável, portanto, compará-los sob a ótica do valor absoluto de cada variável. Por isso, a metodologia aborda uma estratégia de clusterização dos dados. Essa estratégia foi adotada com o objetivo de obter *clusters* para cada característica construtiva de disjuntor e também contornar a condição de dados desbalanceados.

Neste contexto, a figura 11 apresenta um histograma da idade dos equipamentos no momento do ensaio. Na concessionária, esses ensaios são realizados em cada disjuntor com um intervalo médio de 5 anos, por isso, existe maior concentração de ensaios no intervalo entre 6 a 10 anos (frações de ano foram arredondadas para o maior número inteiro).

A figura 11 permite analisar também o balanceamento dos dados quanto a idade dos ativos. É possível observar que 144 equipamentos (63% da base de dados) apresentavam uma idade inferior a 16 anos no momento do ensaio, ou seja, aproximadamente dois terços da base de dados é formada por ativos relativamente novos. De forma análoga, 36% da base é formada por disjuntores com mais de 16 anos em operação. É interessante destacar também que 7,5% da base (17 equipamentos) é formada por disjuntores com mais de 30 anos em operação. Além disso, é válido pontuar que, do ponto de vista regulatório, a vida

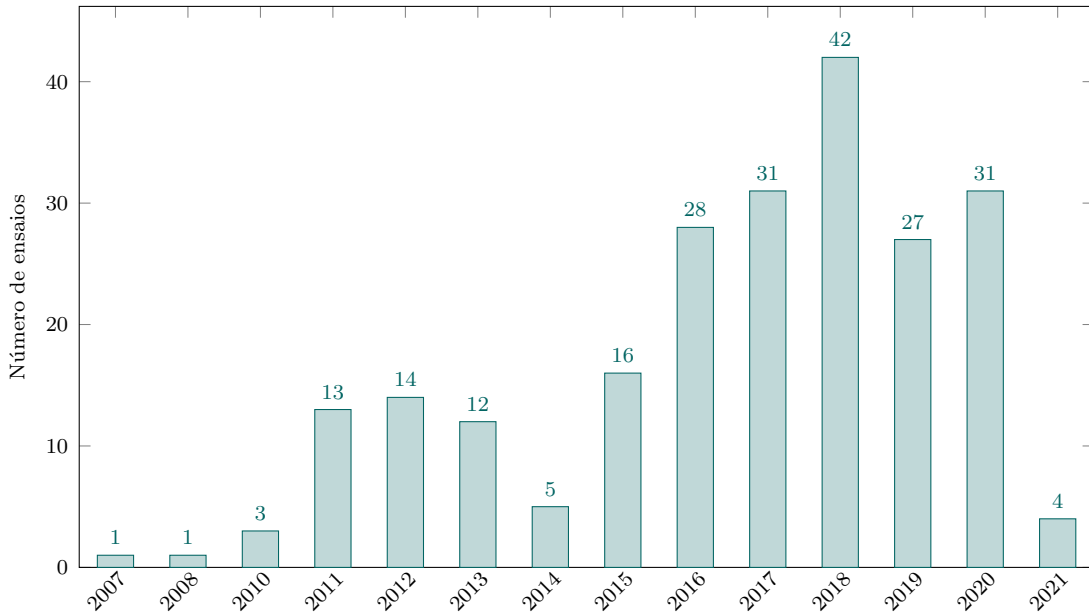


Figura 10: Base de dados - Número de ensaios por ano

útil econômica dos disjuntor de alta tensão é de 33 anos.

Por conta desse portfólio diverso na base de dados - que como visto no Capítulo 2 apresentam características construtivas diferentes - na seção de resultados, são apresentados apenas os dois mais representativos no parque instalado atual.

Conforme o capítulo de revisão bibliográfica, a corrente é proporcional à energia e a tensão é proporcional ao comprimento do arco-elétrico. Neste contexto, neste trabalho, todos os disjuntores operam em 138kV, tornando os arcos-eletricos da mesma ordem de grandeza entre si. Entretanto, o valor da corrente de falta, que passou pelo disjuntor, é uma variável difícil de ser historiada para cada operação do equipamento.

De modo a suprir essa deficiência, existem variáveis auxiliares que representam a corrente de falta, como por exemplo o tempo em operação do equipamento. Assume-se que, quanto maior o número de operações e a idade do ativo, maior será a energia total acumulada ( $\sum_{n=1}^n I_n^2 t [A^2 s]$ ) que o equipamento suportou.

Em relação às variáveis qualitativas disponíveis, tem-se 3 variáveis que são apontadas pelo CIGRÉ, desde 1982 [22], como itens a serem analisados durante a manutenção de disjuntores de alta tensão:

- Tempo de abertura (TA) do disjuntor por fase (azul, vermelha e branca) [ms];
- Tempo de fechamento (TF) do disjuntor por fase (azul vermelha e branca) [ms];
- Resistência de contato (RC) do disjuntor por fase (azul, vermelha e branca) [ $\mu\Omega$ ].

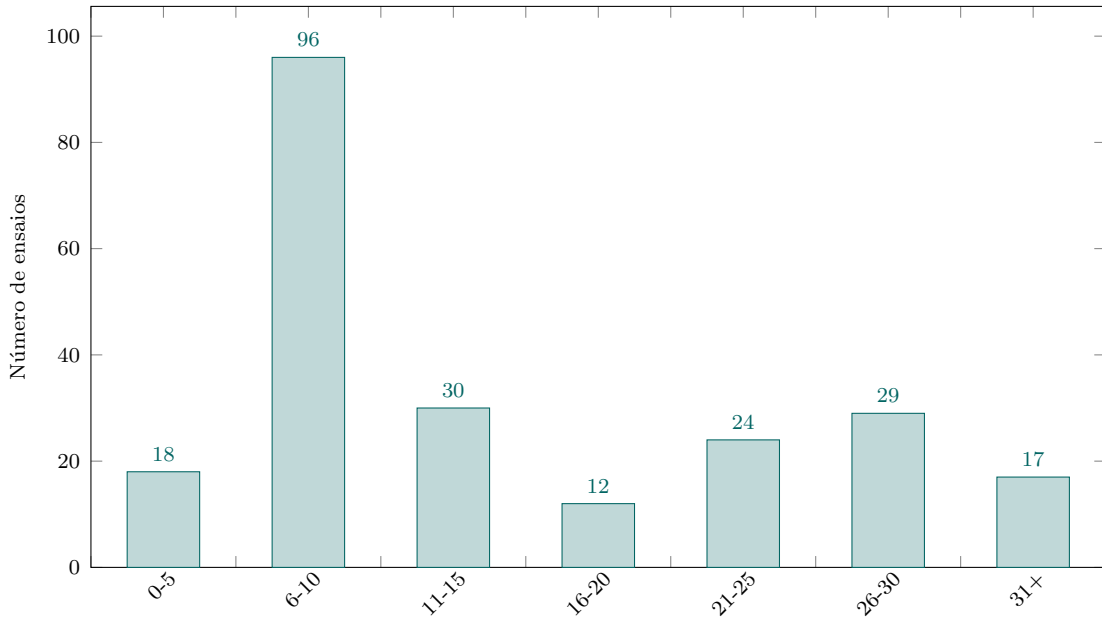


Figura 11: Base de dados - Histograma do número de ensaios por idade do ativo em anos

Outras variáveis auxiliares disponíveis são:

- Local de instalação (concessionária, regional, cidade, subestação);
- Dados de equipamento (fabricante, modelo, ano de fabricação, número de série);
- Corrente nominal do disjuntor / Capacidade de ruptura;
- Temperatura ambiente e Umidade relativa, antes e após o ensaio;

Um exemplo da ficha de ensaios elétricos está disponível no Apêndice A deste trabalho.

Para a resistência de contato, os valores típicos estão abaixo de  $100 \mu\Omega$ , porém, disjuntores de alta tensão do tipo  $SF_6$  tipicamente apresentam resistências de contato maiores, quando comparado aos disjuntores a vácuo de tensões mais baixas, pois, quanto maior for o nível de tensão, maior é o valor da resistência de contato [61].

### 3.1.1 Análise exploratória - Correlação de Pearson e *boxplots*

Após a explicação da formação da base de dados, a etapa seguinte é o entendimento de como a base de dados se comporta. Para isso, a primeira abordagem foi o entendimento de como cada variável se relaciona entre si.

A figura 12 apresenta a matriz de correlação de Pearson. Esta ferramenta permite observar a correlação das variáveis, na forma de um mapa de calor.

TA - VM	1.00	1.00	0.94	0.12	0.12	0.12	-0.11	-0.10	-0.02
TA - BR	1.00	1.00	0.94	0.10	0.10	0.10	-0.10	-0.10	-0.01
TA - AZ	0.94	0.94	1.00	0.10	0.10	0.10	-0.11	-0.10	-0.03
TF - VM	0.12	0.10	0.10	1.00	0.99	0.99	0.01	0.02	0.05
TF - BR	0.12	0.10	0.10	0.99	1.00	1.00	0.02	0.02	0.05
TF - AZ	0.12	0.10	0.10	0.99	1.00	1.00	0.02	0.02	0.05
RC - VM	-0.11	-0.10	-0.11	0.01	0.02	0.02	1.00	0.89	0.85
RC - BR	-0.10	-0.10	-0.10	0.02	0.02	0.02	0.89	1.00	0.84
RC - AZ	-0.02	-0.01	-0.03	0.05	0.05	0.05	0.85	0.84	1.00
	TA - AZ	TA - BR	TA - VM	TF - AZ	TF - BR	TF - VM	RC - AZ	RC - BR	RC - VM

Figura 12: Matriz de correlação de Pearson

Matematicamente, o coeficiente de Pearson,  $\rho$ , para duas variáveis é dado por, 3.1:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

onde:

- $n$  é o tamanho da amostra
- $x_i$  e  $y_i$  são as amostras de 1 a  $n$
- $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n x_i$ , é a média (e analogamente é  $\bar{y}$ )

Importante destacar que os valores resultantes acima de 0.7 indicam alto grau de correlação entre as variáveis.

Analisando a figura 12, é possível extrair da matriz as seguintes informações:

- Existe correlação muito alta (0.94 1.00) entre os tempos de abertura de cada fase;



- Existe correlação muito alta (0.99 1.00) entre os tempos de fechamento de cada fase;
- Existe correlação alta (0.84 0.89) entre as resistências de contato de cada fase.

Porém, nota-se que a correlação das resistências de contato é menor, quando comparado aos tempos de abertura e fechamento. Isto indica que existe alta variabilidade nos dados de resistência de contato.

Após a análise da matriz de correlação de Pearson conclui-se que é possível correlacionar as variáveis, porém ainda é preciso melhor entender o comportamento de cada variável, em especial, as resistências de contato, pois estas variáveis apresentaram valores menores de correlação. Para isso, o passo seguinte da metodologia foi realizar uma análise exploratória das variáveis qualitativas.

Desta forma, criou-se um *boxplot* para cada variável. O *boxplot* é um método visual alternativo ao histograma para representar os dados. A grande vantagem do *boxplot* é permitir visualizar a distribuição e *outliers*. Ele fornece informação sobre as seguintes características do conjunto de dados: mediana, limite máximo e mínimo (desconsiderando *outliers*) e os quartis ( $Q1$ ,  $Q2$  e  $Q3$ ).

O entendimento da distribuição da base de dados é importante principalmente na análise de *outliers*. Os *outliers* podem ser: erros humanos no processo de digitação ou medidas discrepantes reais que indicam degradação das propriedades do equipamento. Matematicamente, o *boxplot* considera como *outliers* as amostras que estão acima do limite superior e abaixo do limite inferior. Esses limites são definidos como:

- Limite Inferior (LI):  $LI = Q1 - 1.5 \times IQR$
- Limite Superior (LS):  $LS = Q3 + 1.5 \times IQR$

Onde  $IQR$  é o intervalo interquartil, definido por  $IQR = Q3 - Q1$ .

Caso haja uma grande presença de *outliers*, é necessário o tratamento da base, pois podem afetar a performance dos algoritmos de *machine learning*, que serão utilizados nas etapas seguintes. Esse cuidado foi necessário, pois, como a base de dados é composta de dados digitados a partir das fichas de ensaio, cujo preenchimento é realizado manualmente pelas equipes de campo, existe a hipótese de alta concentração de erros humanos no processo.

Na figura 13 tem-se os *boxplots* dos tempos de abertura e fechamento. Nota-se que os tempos de abertura estão concentrados em 30 ms. Já o tempo de fechamento apresenta

uma distribuição maior, entre 60 ms (1º quartil) e 90 ms (3º quartil).

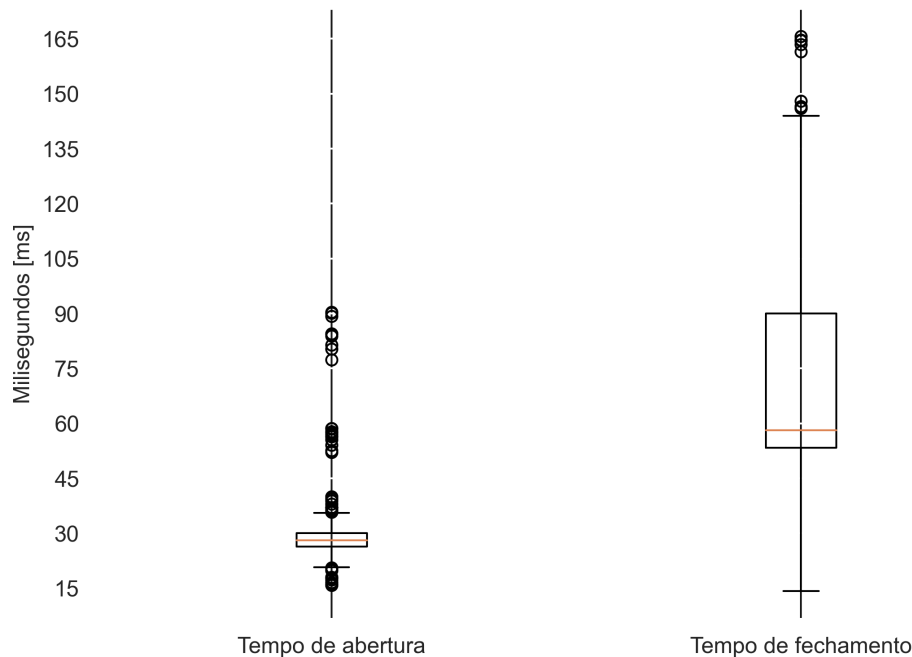


Figura 13: *Boxplots* - Tempos de abertura e fechamento

Já a figura 14 apresenta o boxplot da resistência de contato. As resistências de contato também apresentam uma distribuição maior, entre 30  $\mu\Omega$  (1º quartil) e 80  $\mu\Omega$  (3º quartil). O único tratamento na base de dados adotado pelo autor foi a remoção de ensaios com dados faltantes, mantendo-se os *outliers*. Esta decisão foi tomada pois o percentual de dados acima do limite superior ou abaixo do limite inferior é relativamente baixo, da ordem de 15%. Além disso, os *outliers* mantidos são de valores condizentes tecnicamente os manuais dos fabricantes, isto é, do ponto de vista de engenharia de manutenção de sistemas de potência, os dados são consistentes. Desta forma, a base final passou de 226 para 150 ensaios.

Na tabela 6, há um consolidado da estatística descritiva de cada variável utilizada onde, além dos parâmetros do *boxplot* são acrescentados também a média, a moda, o desvio padrão e a quantidade de amostras. É possível observar que foram utilizados 468 tempos de abertura, 453 tempos de fechamento e 680 resistências de contato para a criação dos *boxplots* das figuras 13 e 14. Esse número é maior do que o número de disjuntores analisados pois para cada ficha de ensaio existem 3 medições de tempo de abertura, 3 medições de tempo de fechamento e três medições de resistência de contatos relativas a cada uma das fases do equipamento.

Ao analisar a tabela 6, é possível observar que o a média, a mediana e a moda do tempo de abertura são muito próximas (30,04, 28,02 e 27,20 ms, respectivamente). O

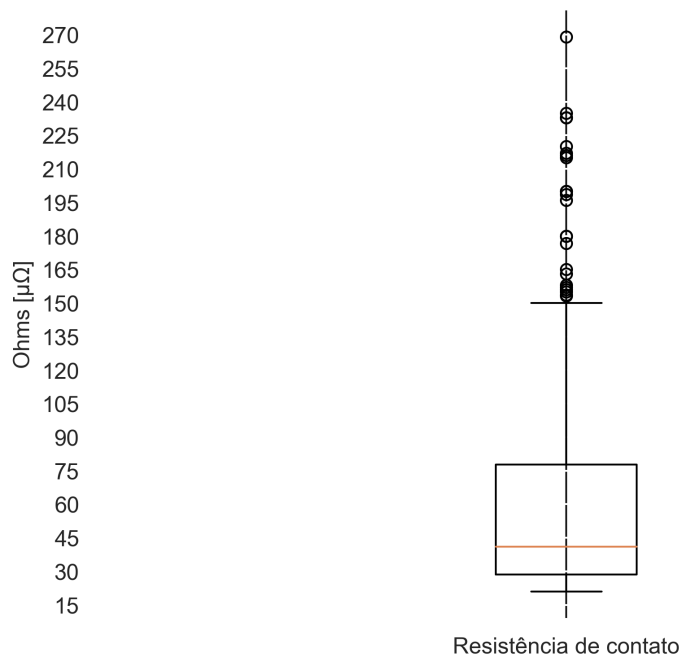


Figura 14: *Boxplots* - Resistência de contato

tempo de fechamento e a resistência de contato não apresentam esse comportamento. Além disso, o desvio padrão do tempo de abertura é também o mais baixo entre as três variáveis. Por isso, pode-se afirmar que o tempo de abertura é a variável que menos contribui para a variabilidade da amostral da base de dados. Esse fato estatístico observado está diretamente relacionado com o funcionamento do disjuntor. Isso ocorre pois o tempo de abertura é a variável mais importante do ponto de vista do funcionamento do disjuntor. Desta forma, é de se esperar que o equipamento seja construído para apresentar a menor variação possível dessa variável ao longo do tempo visto que é imprescindível que o disjuntor abra o mais rápido possível.

De forma análoga, ao analisar-se o comportamento do tempo de fechamento, é possível observar um comportamento diferente - a média, a mediana e a moda do tempo de fechamento são discrepantes (68,95, 58,17 e 90,00 ms, respectivamente). Isso ocorre pela tecnologia construtiva do equipamento. Durante a etapa de revisão bibliográfica, o autor pode analisar os manuais de diversos modelos de disjuntor e um fato observado foi que enquanto o tempo de abertura pouco diminuiu ao longo das últimas 4 décadas, o tempo de fechamento dos disjuntores evoluiu muito. Os manuais de disjuntores do fim do século XX apresentam valores de referência para o tempo de fechamento da ordem de  $100 \pm 5$ ms enquanto que nos disjuntores modernos esse valor é da ordem de  $55 \pm 6$ ms. Dessa forma, o tempo de fechamento é uma variável que contribui em grau médio para a variabilidade amostral da base de dados.

Por último, ao analisar-se a resistência de contato, é possível observar um comportamento semelhante ao do tempo de fechamento, o desvio padrão é o maior entre as três variáveis ( $39,07 \mu\Omega$ ). Aqui, porém, a fonte de variabilidade não está na evolução tecnológica do ativo, mas sim no seu aspecto construtivo e no tempo em operação do ativo. Isso ocorre pois, em primeiro lugar, disjuntores do tipo “tanque-morto” apresentam resistências maiores do que disjuntores do tipo “tanque-vivo”, [62], [63], [64], [56]. Em segundo lugar, como visto no Capítulo 2, a resistência de contato é a primeira variável do disjuntor a apresentar alteração em decorrência da degradação do equipamento pois, conforme o ativo é acionado, ocorre a erosão dos contatos e, portanto, a resistência de contato aumenta. Dessa forma, a resistência de contato é a variável que contribui em maior grau para a variabilidade amostral da base de dados pois ela fornece informações sobre o aspecto construtivo do equipamento e sobre a quantidade de operações do equipamento (o que indiretamente está relacionado à idade do ativo).

Tabela 6: Estatística Descritiva

Estatística Descritiva	TA [ms]	TF [ms]	RC [ $\mu\Omega$ ]
Média	30,04	68,95	56,66
Mediana	28,02	58,17	41,00
Moda	27,20	90,00	40,00
Desvio Padrão	10,30	28,74	39,07
Máximo	90,40	165,70	269,00
Mínimo	15,80	14,20	21,00
Quantidade de amostras	468	453	680

TA - Tempo de Abertura; TF - Tempo de Fechamento; RC - Resistência de Contato

## 3.2 Redução de dimensão

Após entendimento dos dados, a próxima etapa consiste em reduzir a dimensão da base. Para isso, faz-se uso da técnica PCA. No trabalho, existem 9 variáveis como dados de entrada no modelo e, como visto no Capítulo 2, a desvantagem do *K-Means* é a perda de precisão do modelo quando o número de variáveis de entrada é alto, pois causa uma convergência da distância média entre os pontos e o centróide.

Este fenômeno, conhecido por “maldição da dimensionalidade”, foi primeiramente abordado por Richard Bellman, [65]. Segundo Bellman, o grande desafio de trabalhar-se com bases de dados de alta dimensão é que conforme ela aumenta, o volume espacial da amostra aumenta de forma mais rápida, fazendo com que os dados fiquem mais dispersos,

e portanto, menos significativos. Por isso, a forma tradicional de contornar esse problema é obter uma base de dados com mais amostras, o que nem sempre é possível quando tratamos de uma base de dados real.

Neste trabalho, optou-se por reduzir a base de dados para duas variáveis de forma a facilitar a interpretação humana. A possibilidade de redução para três variáveis foi descartada por conta da dificuldade de interpretação de gráficos tridimensionais com o tamanho da base de dados disponível.

Por isso, foi testada a precisão do algoritmo frente a diferentes entradas de dados. Os testes realizados são esquematizados conforme diagrama de blocos das figuras 15 e 16:

- Teste 1: Aplicação do *PCA* para redução das 9 variáveis (3 tempos de abertura, 3 tempos de fechamento e 3 resistências de contato) em 2 variáveis;

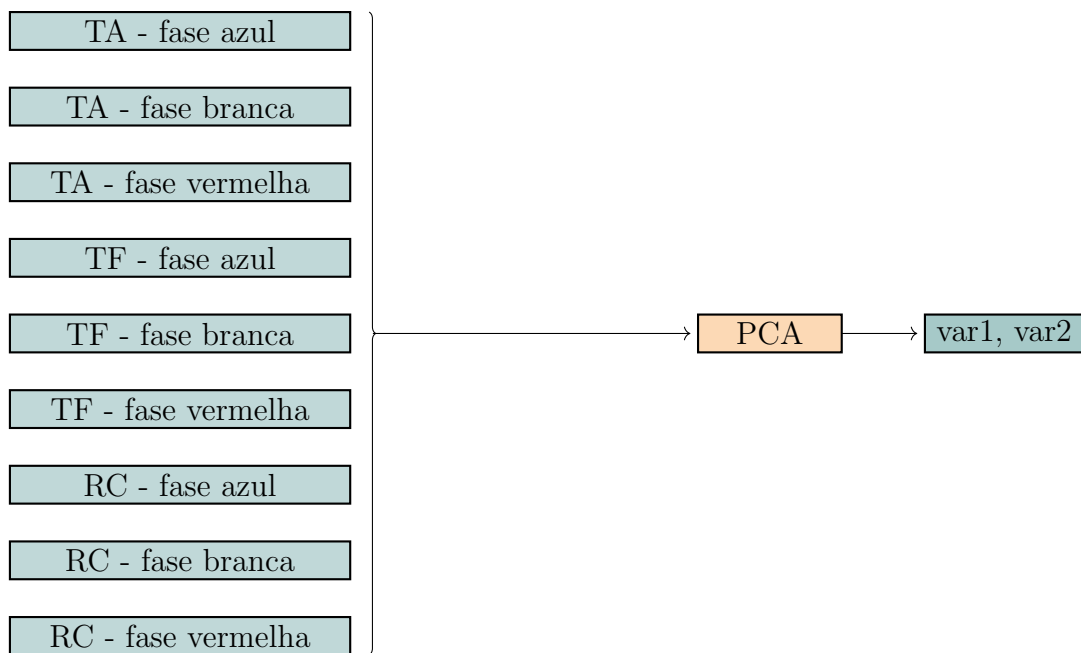


Figura 15: Diagrama de blocos - Teste 1 - Redução de dimensão

- Teste 2: cálculo da média e desvio padrão de cada tipo de variável por disjuntor, resultando em 6 variáveis (média e desvio padrão dos tempos de abertura, tempos de fechamento e resistências de contato) e, em seguida, aplicação do *PCA* para redução em 2 variáveis.

Porém, antes da aplicação do algoritmo de redução de dimensão, foi necessário considerar o pré-tratamento das variáveis de entrada. Em modelos baseados em distância, como o *PCA* e o *K-Means*, a aplicação de técnicas de normalização e padronização antes

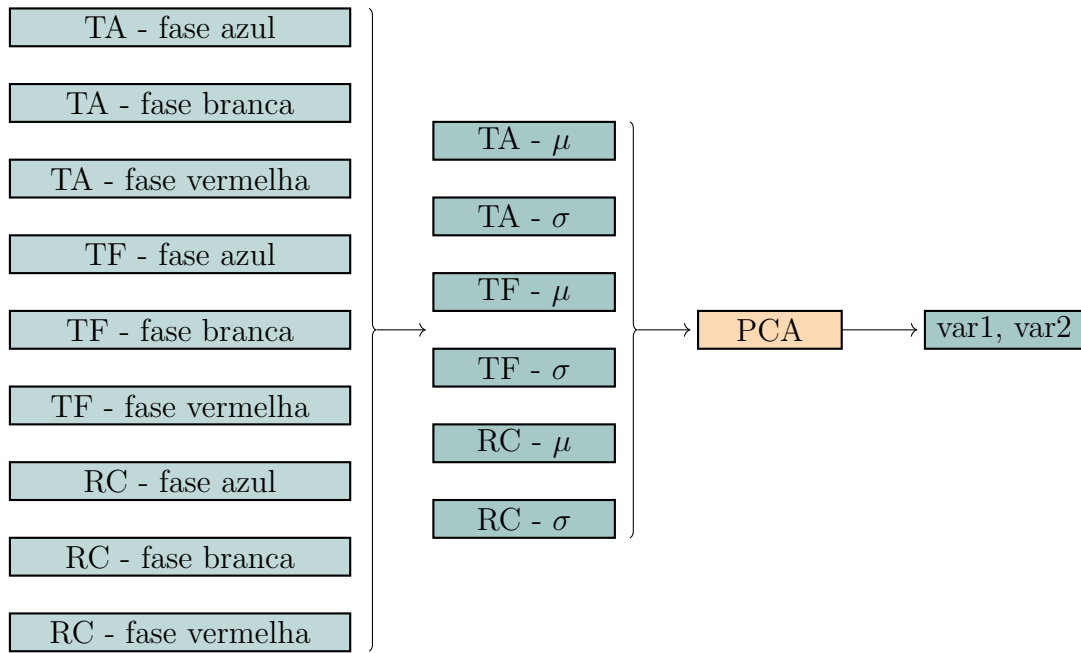


Figura 16: Diagrama de blocos - Teste 2 - Redução de dimensão

da entrada no algoritmo é utilizada quando utiliza-se variáveis com unidades de medida de dimensões muito diferentes pois permite que o mesmo grau de influência seja direcionado para cada variável.

Ao normalizar as variáveis, elas são posicionadas dentro do intervalo fechado [0-1] sem distorcer as diferenças nas faixas de valores, ou seja, os *outliers* são mantidos. Para isso, é utilizada a equação 3.2 abaixo para cada amostra de cada variável, onde  $x_{ni}$  é a amostra normalizada da amostra original  $x_i$  a partir dos valores máximos e mínimos da variável.

$$x_{ni} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3.2)$$

Já a padronização, apesar de possuir a mesma ideia de colocar os dados em uma mesma escala, é utilizada quando a distribuição dos dados obedece uma curva gaussiana. Neste caso, a padronização é utilizada para fixar a média em zero e o desvio padrão em um. Para isso, é utilizada a equação *z-score*, abaixo, onde  $x_{pi}$  é a amostra padronizada da amostra original  $x_i$  a partir da média amostral  $\mu$  e o desvio padrão amostral  $\sigma$ . Como as distribuições das variáveis utilizadas não são normais, a técnica de padronização não pode ser utilizada na base disponível.

$$x_{pi} = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (3.3)$$

Desta forma, foi testado a performance da silhueta e da curva do cotovelo com a

normalização dos dados de entrada. Porém os resultados foram inferiores para ambas as propriedades. Além disso, ao analisar a tabela 6, pode-se observar que a média e a mediana das variáveis em milisegundos e em microohms são da mesma dimensão. Desta forma, optou-se por seguir com a redução de dimensão sem a realização de pré-tratamento dos dados.

Finalmente, a tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as curvas da silhueta e do cotovelo para os dois testes. Pela tabela, é possível observar que a nota da silhueta  $S$  é pouco sensível não só às variações do tipo de teste, mas também às variações do número de *clusters*. Isso pode ser evidenciado ao se analisar a figura 17, de 2 para 10 *clusters*, o teste 1 apresentou valores semelhantes ao teste 2 para  $k = 2, 3, 4, 5$  e  $8$ . Apenas para  $k = 6, 7, 9$  e  $10$  os valores apresentaram diferença significativa. Em todos os casos em que houve diferença, o teste 2 apresentou maiores valores de curva de silhueta. Ao obter-se a silhueta média de cada teste considerando as 10 primeiros valores de "k", o resultado foi de  $0,557$  e  $0,562$  para os testes 1 e 2, respectivamente.

Porém, pela curva do cotovelo, a soma dos erros quadráticos no teste 2 é muito menor do que no teste 1. Ao somar-se o  $\epsilon_q$  dos 10 primeiros *clusters* de cada iteração, no segundo teste, o erro médio é 66% menor do que no primeiro teste. Por esses motivos, optou-se por usar a média e o desvio padrão de cada tipo de variável como dados de entrada no *PCA* pois uma curva do cotovelo menor significa que as amostras estarão mais próximas dos seus respectivos centróides enquanto a silhueta, apesar de pouco sensível a variações, também apresentou resultados médios melhores para o teste 2, indicando dados mais compactos e coesos.

Neste ponto, é necessário destacar que a média e o desvio padrão das resistências de contato e dos tempos de abertura ou fechamento são extremamente importantes para a análise de engenharia, pois, a identificação de perdas de performance em disjuntores de alta tensão deve considerar não somente o valor absoluto das grandezas, mas também o desvio padrão entre fases, isto é, não é esperado que um equipamento saudável apresente um desvio padrão entre fases alto para as variáveis utilizadas.

Além disso, é importante observar que se houvessem mais variáveis disponíveis na base de dados, elas poderiam ser adicionadas ao algoritmo de redução de dimensionalidade sem a necessidade de alterações no algoritmo. Ou seja, o algoritmo é genérico em relação ao número de variáveis de entrada. De forma análoga, conforme visto na seção 2.4.1, é possível escolher qualquer quantidade de variáveis de saída no algoritmo de redução de dimensionalidade desde que as "k" novas variáveis sejam menores dos que as "d" variáveis

Tabela 7: Propriedades - Teste de redução de dimensão

Número de <i>clusters</i>	Teste 1		Teste 2	
	Silhueta	Cotovelo	Silhueta	Cotovelo
2	0,517	1026527	0,518	346575
3	0,576	540669	0,572	181709
4	0,598	292628	0,596	99663
5	0,578	190721	0,578	65109
6	0,541	153574	0,570	50998
7	0,541	121748	0,550	41102
8	0,560	94520	0,559	32070
9	0,556	80040	0,562	26743
10	0,548	65915	0,554	22876

originais.

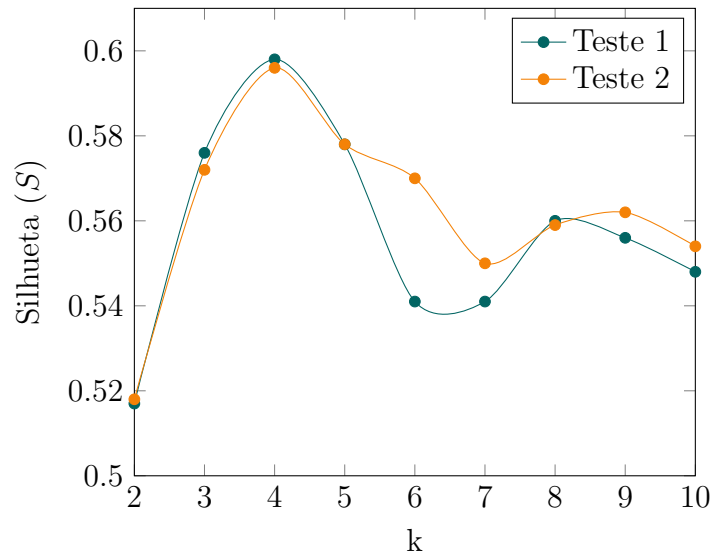


Figura 17: Curva da Silhueta - Teste 1 e 2

Feita a redução de dimensão para 2 variáveis, é possível agora analisar em um gráfico de duas dimensões o portfólio de disjuntores, conforme figura 19. A esse tipo de gráfico dá-se o nome de diagrama de Voronoy.

É importante observar que no diagrama de Voronoy, os eixos não possuem unidades de medida, pois eles são combinações lineares das médias e desvios padrão das resistências de contato e dos tempos de abertura e fechamento, expressos em ms e em  $\mu\Omega$ , respectivamente.

Além disso, é válido destacar que todas as variáveis analisadas possuem o comportamento de aumentar ao longo do tempo. Isto é, espera-se que no decorrer dos anos em operação, os tempos de abertura/fechamento e as resistências de contato aumentem



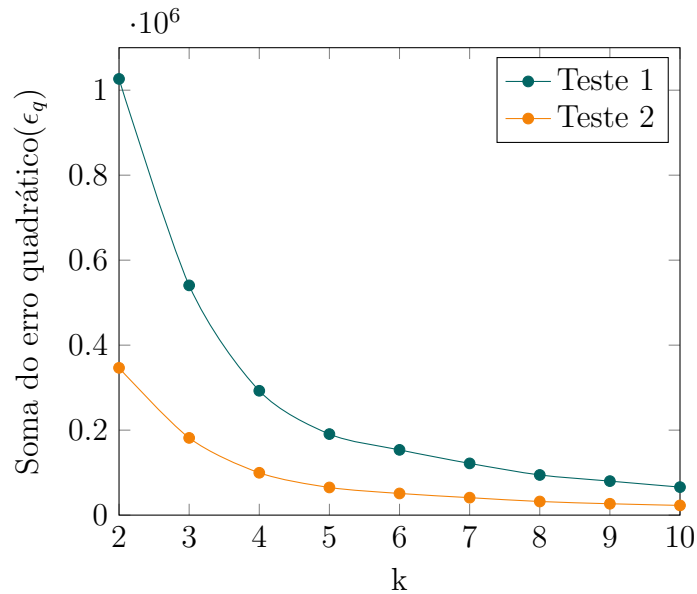


Figura 18: Curva do Cotovelo - Teste 1 e 2

devido ao desgaste natural do equipamento. Desta forma, apesar dos eixos não apresentarem unidade de medida, quanto mais longe da origem estiver o disjuntor, entende-se que mais deteriorado ele está.

Atentar-se à correlação das variáveis é de extrema importância para a modelagem do algoritmo de clusterização pois caso existam variáveis com correlação negativa - isto é, variáveis que quanto maior o valor, menor o nível de degradação do equipamento (por exemplo, a resistência de isolamento do ativo) - a distância até a origem deixa de ser um aspecto relevante na etapa de interpretação dos resultados.

Nesse contexto, ao analisar a figura 19, é possível observar que há uma concentração de amostras na região mais próxima da origem (0,0). Porém, visualmente, ainda não é possível identificar quais disjuntores estão degradados e quais disjuntores são saudáveis. A melhor abordagem para interpretação de técnicas de clusterização é a análise das propriedades de cada *cluster*.

Por último, é necessário destacar que pelo fato dos dados utilizados neste trabalho serem reais (obtidos em ensaio de campo), existe a possibilidade de que pontos isolados sejam *outliers*. Apesar de, na etapa de formação da base de dados, a análise dos *boxplots* ter indicado que a presença de *outliers* não é significativa para a performance do modelo, essa hipótese também precisa ser analisada para que as propriedades de cada *cluster* não sejam interpretadas de forma equivocada.

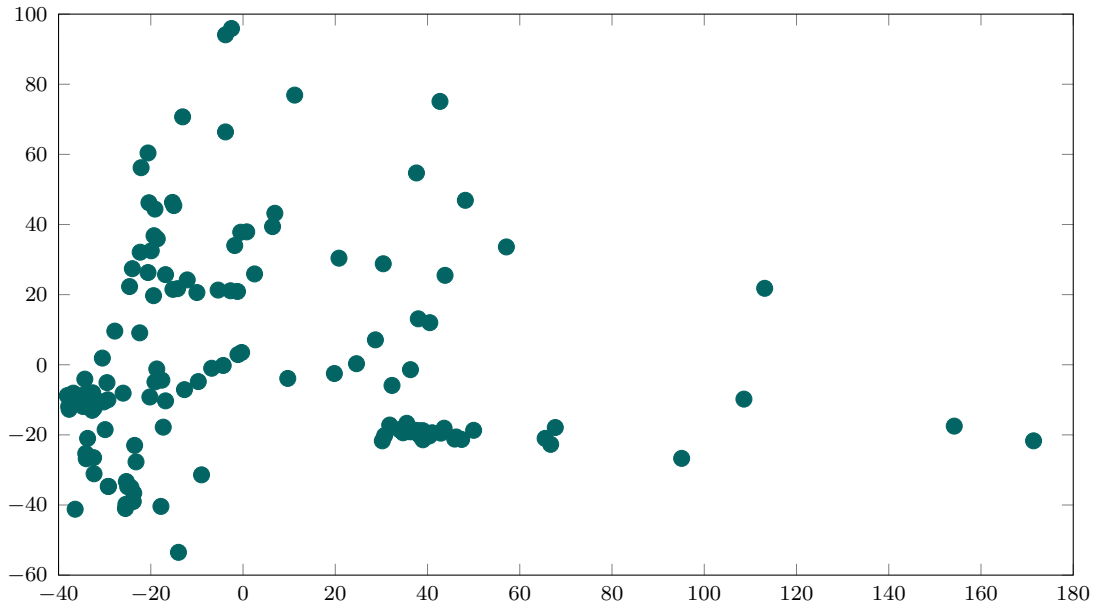


Figura 19: Base de dados pós redução de dimensão

### 3.3 Clusterização

Para analisar os *clusters* e identificar equipamentos degradados, é necessário realizar a clusterização e analisar as propriedades dos *clusters* obtidos. Para isso, o primeiro passo é escolher a quantidade de *clusters* ( $k$ ) a serem utilizados no primeiro passo do método *K-Means*, conforme Capítulo 2.

Para a escolha do número ideal de *clusters*, faz-se uso da curva do cotovelo e da curva da silhueta. Conforme a figura 20, o método da silhueta indicou um número ideal de *clusters* como sendo 4, com uma nota de silhueta de 0,596 enquanto, pela figura 21, o método do cotovelo indicou 5 *clusters* como o número ideal, com uma soma do erro quadrático de 65109.

Portanto, para a base de dados utilizada neste trabalho, é necessário escolher entre 4 ou 5 *clusters*. Porém, não existe método definitivo para a escolha do número de *clusters*. A curva da silhueta e do cotovelo apenas medem parâmetros técnicos de como a base amostral se comporta, a decisão final é humana e, em última análise, subjetiva.

Como o algoritmo *K-Means* busca minimizar a distância euclidiana entre as amostras e o centróide, ao aumentar-se o número de *clusters*, automaticamente reduz-se o erro quadrático médio ( $\epsilon_q$ ). No limite, para  $k = n$ , onde  $k$  é o número de *clusters* e  $n$  é o número de amostras, o erro quadrático médio é zero pois o centróide de cada *cluster* é a própria amostra. Por outro lado, pela curva da silhueta, ao aumentar-se o número de *clusters*, espera-se que os dados fiquem menos compactos.

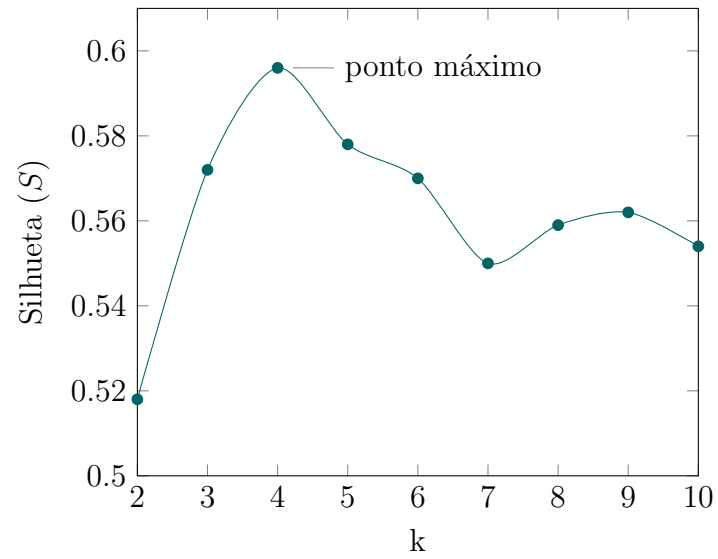


Figura 20: Curva da Silhueta

Portanto, intuitivamente, a escolha pelo número de *clusters* deve ser a máxima possível para minimizar o erro quadrático médio ( $\epsilon_q$ ) e ao mesmo tempo maximizar a silhueta entre os dados. A escolha final do número de *clusters* será apresentada na seção de resultados.

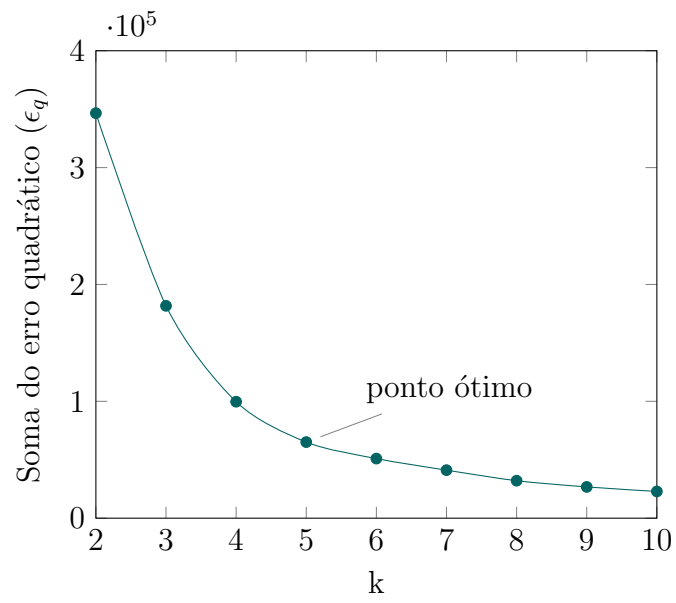


Figura 21: Curva do cotovelo

## 4 RESULTADOS

*‘mas os que esperam no SENHOR renovam as suas forças, sobem com asas como águias, correm e não se cansam, caminham e não se fatigam.’*

-- Isaías 40:31

Feita a clusterização, o Capítulo 4 apresenta os diagramas de Voronoy obtidos com 4 (figura 22) e 5 *clusters* (figura 23) e, em seguida, compara as principais propriedades de cada *cluster* o que permite comparar os resultados obtidos com as propriedades dos disjuntores.

Como o objetivo da clusterização é identificar disjuntores que apresentam comportamento degradado, os autores optaram por utilizar a solução com 5 *clusters*. O quinto *cluster* (*cluster* 4, em preto na figura 23) é formado por um subgrupo de disjuntores do *cluster* 2 (da figura 22, em laranja). Esses pontos, em preto, estão mais distantes do centroide e da origem, o que são indicativos de que eles estão com propriedades diferentes do esperado.

Essa decisão só é possível de ser feita ao se contextualizar a tarefa da clusterização ao cenário descrito na seção 3.3.3: os três tipos de variáveis utilizados são, do ponto de vista do conhecimento do funcionamento do disjuntor, do tipo “quanto maior, pior”.

Após a escolha por 5 *clusters*, é necessário analisar as propriedades de cada um deles. As propriedades analisadas foram o tempo em operação médio, a quantidade dos dois principais modelos de disjuntor do portfólio em cada *cluster* e a média & desvio padrão do tempo de abertura & fechamento e da resistência de contato de cada *cluster*.

Ao analisar a tabela 8, é possível observar que:

- A maioria (90%) dos disjuntores foi classificada nos *clusters* 0, 1 e 2. Nesse grupo, os dois primeiros apresentam uma média de idade mais baixa (7,68 e 11,9 anos);
- Uma média de idade mais alta é notada no *cluster* 3 (24,3 anos);
- Os *clusters* 3 e 4, que são os disjuntores mais longe da origem, apresentam uma quantidade menor de disjuntores;

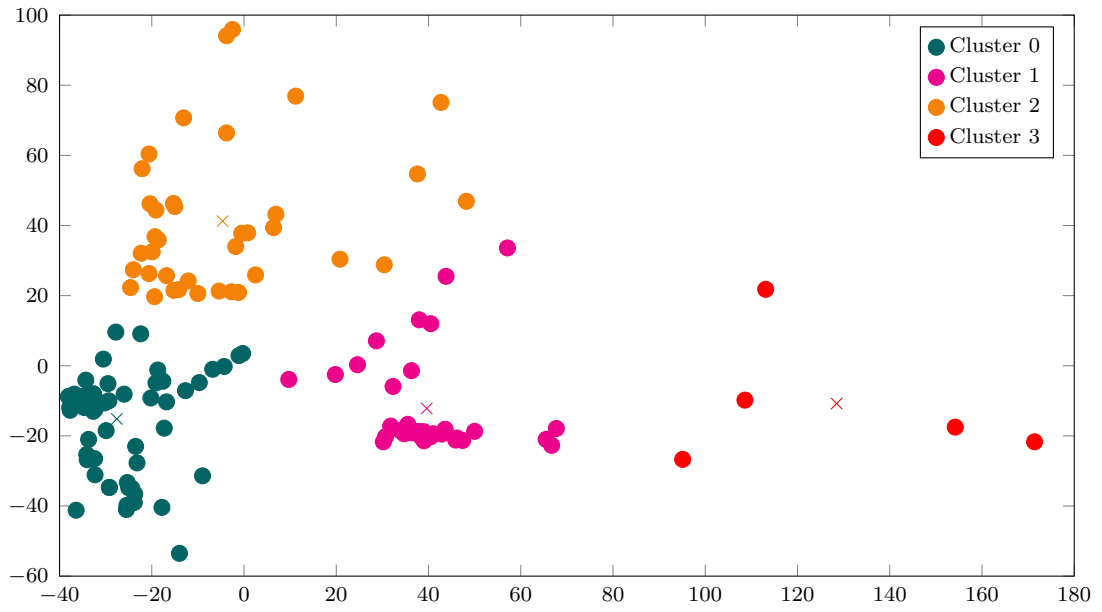


Figura 22: Diagrama de Voronoy - k=4

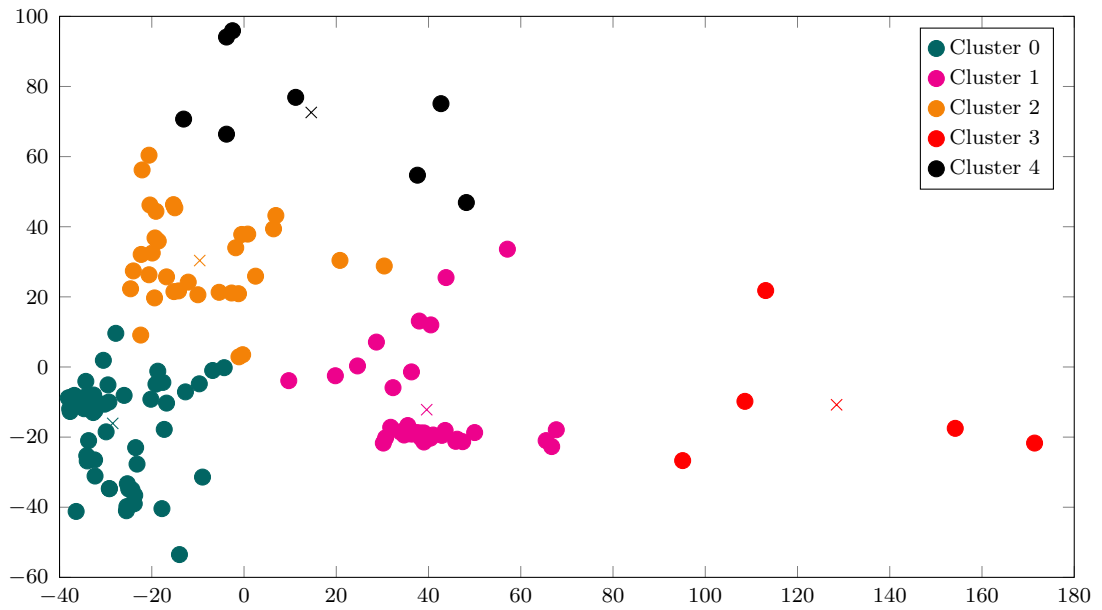


Figura 23: Diagrama de Voronoy - k=5

Tabela 8: Propriedades - Clusterização

Características		<i>cluster0</i>	<i>cluster1</i>	<i>cluster2</i>	<i>cluster3</i>	<i>cluster4</i>
Qtd. de disjuntores		35	70	30	5	10
Média de idade [anos]		7,7	11,9	24,3	10,0	20,8
Quantidade	Modelo “A”	1	43	0	1	0
	Modelo “B”	28	1	0	1	0
TA	$\mu$ [ms]	29,78	29,09	34,82	27,51	25,88
	$\sigma$ [ms]	0,33	0,71	0,65	0,46	0,63
TF	$\mu$ [ms]	57,30	52,37	103,4	66,51	126,20
	$\sigma$ [ms]	1,21	0,79	1,37	0,27	0,79
RC	$\mu$ [ $\mu\Omega$ ]	98,87	32,81	44,93	186,80	82,00
	$\sigma$ [ $\mu\Omega$ ]	9,13	2,06	5,20	23,40	22,84

TA - Tempo de Abertura; TF - Tempo de Fechamento; RC - Resistência de Contato  
 $\mu$  - média;  $\sigma$  - desvio padrão

- O *cluster 3* é composto por disjuntores mais novos (10 anos) e o *cluster 4* por disjuntores mais antigos (20,8 anos);
- Os tempos médios de abertura permanecem dentro dos limites do fabricante para todos os *clusters*;
- Os desvios médios de abertura são baixos para todos os *clusters*;
- Os tempos médios de fechamento dos *clusters 0, 1, 3* apresentam valores mais baixos do que os *clusters 2 e 4*;
- Os desvios médios de fechamento são baixos para todos os *clusters*;
- A resistência de contato média do *cluster 3* é muito mais alta do que a resistência de contato dos demais *clusters*;
- O desvio médio da resistência de contato dos *clusters 3 e 4* é mais alta do que o desvio médio dos demais *clusters*.
- A presença de *outliers*, se existir, não interfere na análise dos resultados obtidos pois o desvio padrão entre cada *cluster* é baixo para os tempos de abertura e fechamento.

Nota-se também que, apesar do modelo do disjuntor não ser um dado de entrada no algoritmo de clusterização, os modelos mais representativos do portfólio da concessionária foram classificados em *clusters* específicos.

É interessante notar que o Modelo “A” é do tipo “Tanque-vivo” (*cluster 1*) enquanto o Modelo “B” é do tipo “Tanque-morto” (*cluster 0*).

Ao comparar os tempos de abertura/fechamento obtidos para cada *cluster* com o manual dos dois equipamentos predominantes no portfólio da concessionária, os ativos devem apresentar os limites descritos na tabela 9.

Tabela 9: Tempos de operação - Manual do fabricante

Características	Modelo “A”	Modelo “B”
Tempo de abertura (TA)	$28 \pm 3\text{ms}$	$32 \pm 4\text{ms}$
Tempo de fechamento (TF)	$60 \pm 6\text{ms}$	$55 \pm 5\text{ms}$

Modelo “A” é do tipo tanque-vivo

Modelo “B” é do tipo tanque-morto

Ademais, de acordo com os Procedimentos de Rede do ONS, [66], um dos requisitos mínimos do tempo total de eliminação de curtos-circuitos em tensões inferiores a 345kV, incluindo o tempo de abertura dos disjuntores de todos os terminais, é de não exceder 100 ms.

Acerca das referências do manual dos fabricantes e dos procedimentos de rede do ONS, é possível observar que:

- Todos os *clusters* possuem tempo de abertura dentro dos padrões definidos pelo fabricante;
- Todos os *clusters* possuem tempo de abertura dentro dos padrões definidos pelo ONS;
- O tempo de fechamento dos *clusters* 2 e 4 está fora do padrão dos manuais da tabela 9;
- O *cluster* 3 apresenta valores de tempo de fechamento próximos ao limite dos fabricantes;

Com o objetivo de entender melhor o comportamento do tempo de fechamento de cada *cluster*, e identificando que a média de idade dos equipamentos dos *clusters* 2 e 4 é mais alta, os autores também checaram os manuais dos equipamentos antigos e pode-se notar que para esses disjuntores, o tempo de fechamento esperado está na ordem de  $100 \pm 5\text{ms}$ . Contudo, os disjuntores do *cluster* 3 são novos e o tempo de fechamento está ligeiramente acima do limite definido pelos manuais de equipamentos novos, indicando um comportamento não esperado para esses ativos.



Finalmente, para as resistências de contato, o *cluster 3* se destoa dos demais pelo valor médio das resistências de contato e pelo alto desvio médio entre fases, enquanto o *cluster 4* apresenta apenas um desvio médio alto entre fases. Além disso, os valores da resistência de contato do *cluster 3* estão acima das referências bibliográficas [62], [63], [64], [56].

Portanto, diante de todas as comparações realizadas nesta seção, os autores puderam notar que:

- *cluster 0* são ativos do tipo tanque-morto que são novos e apresentam comportamento esperado;
- *cluster 1* são ativos do tipo tanque-vivo que são novos e apresentam comportamento esperado;
- *cluster 2* são ativos envelhecidos e que apresentam comportamento esperado;
- *cluster 3* são ativos novos que não apresentam o comportamento esperado;
- *cluster 4* são ativos envelhecidos que não apresentam o comportamento esperado;

Por fim, do ponto de vista regulatório, a avaliação dessas variáveis qualitativas sobre o comportamento dos disjuntores é importante principalmente para distribuidoras, pois a sua geração de valor está diretamente atrelada à relação da depreciação contábil e a vida útil técnica dos ativos. Pelo Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico da ANEEL, os disjuntores possuem uma vida útil regulatória de 33 anos.

Ao definir este tempo de depreciação, a ANEEL considera que, com a manutenção e utilização adequada, o disjuntor deve apresentar esta longevidade mínima de 33 anos. Por consequência, disjuntores que possuem vida útil técnica inferior a 33 anos não são completamente remunerados na tarifa de energia, o que significa perda de investimento aos acionistas da distribuidora.

Ao analisarmos a performance dos ensaios com disjuntores de 33 ou mais anos, nenhum foi classificado nos *clusters 3* e *4*. Essa informação permite concluir que as suas características de performance estão condizentes com o esperado e que é possível atingir a vida útil técnica igual ou superior a vida útil contábil definida pelo órgão regulador.

De forma análoga, os disjuntores que estão nos *clusters 3* e *4* apresentam um risco operacional uma vez que esses ativos não se comportam como ativos similares.

## 5 CONCLUSÕES

*“Hardships often prepare ordinary people for an extraordinary destiny.”*

-- C. S. Lewis

Os resultados obtidos possibilitam melhor entendimento da degradação dos disjuntores. Essa informação é de grande importância para as concessionárias de energia e para a melhoria contínua do processo de gestão de ativos, pois contribui para avaliação da condição do ativo, otimizando o processo de tomada de decisão na manutenção e diminuindo os riscos da operação.

Disjuntores são ativos críticos, uma vez que sua correta operação assegura a integridade dos demais equipamentos e instalações, em uma eventual solicitação elétrica do sistema. A continuidade do fornecimento é um dos fatores primordiais para prestação de um serviço adequado, portanto as regulamentações do setor elétrico exigem cumprimento de níveis mínimos de qualidade e atendimento a indicadores, bem como os órgãos de fiscalizações aplicam diversos mecanismos de avaliação e auditoria das empresas outorgadas.

Para este trabalho, foi possível levantar uma grande massa de dados de ensaios em disjuntores, possibilitando análise de informações reais e de diversos ativos, em diferentes estágios do ciclo de vida. Os resultados demonstram que o algoritmo de *machine learning* adotado foi capaz de clusterizar corretamente os dois principais modelos de disjuntores de 138kV isolados a SF<sub>6</sub> da concessionária mesmo sem utilizar o modelo como dado de entrada do algoritmo.

Além disso, o algoritmo também foi capaz de clusterizar disjuntores antigos e novos mesmo sem utilizar o ano de fabricação como dados de entrada do algoritmo. Esses dois fatos comprovam que o método é capaz de identificar características operativas específicas de cada modelo de equipamento e apontar equipamentos que apresentam características diferentes do restante do portfólio de disjuntores.

Os disjuntores dos *clusters* 3 e 4, foram identificados como disjuntores com comportamento anômalo. Para o *cluster* 3, a criticidade é maior. A resistência de contato apresenta valores mais altos do que o portfólio e das recomendações das referências bibliográficas. Existe também o agravante do desvio padrão médio entre fases dos disjuntores do *cluster* 3

estarem maiores do que os outros *clusters* e de que o *cluster* 3 é composto por disjuntores relativamente novos.

Esses fatores corroboram a hipótese de que esses equipamentos possuem um comportamento anômalo e, por isso, devem ser investigados com maior detalhe para avaliar a necessidade de novos ensaios comprobatórios. Caso os novos ensaios indiquem piora das variáveis analisadas, deve-se prosseguir com a manutenção preditiva a fim de minimizar riscos de operação do equipamento.

Portanto, ferramentas que possibilitam a predição da condição do equipamento ou tendência de evolução de falha funcional, permitindo atuação antecipada da engenharia de manutenção, são muito relevantes para garantir a confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia.

Neste contexto, o trabalho também demonstra a importância da sinergia entre o conhecimento de sistemas elétricos de potência e o conhecimento da ciência de dados (*Data Science*) para o ajuste do algoritmo de *machine learning* de forma a maximizar o resultado esperado pela engenharia de manutenção e gestão de ativo.

Por exemplo, a decisão de utilizar cinco *clusters* foi tomada com o objetivo de segregar disjuntores mais longes da origem do gráfico pois as variáveis de entrada do algoritmo possuem a característica de aumentar com o envelhecimento do disjuntor. Essa decisão contrariou um dos métodos de ciência de dados (curva da silhueta) que indicava 4 *clusters* como o valor ótimo mas tornou possível a identificação do *cluster* 4, que apresenta disjuntores com comportamento diferente do restante do portfólio.

Por fim, dado que objetivo estabelecido para esse trabalho foi de realizar uma avaliação da degradação em disjuntores de alta tensão ao longo de uma grande janela temporal, diante dos resultados apresentados, considera-se que o objetivo foi amplamente atingido.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho, não foi possível utilizar a pressão do gás SF<sub>6</sub> devido a má qualidade dessa informação nas fichas de ensaio disponíveis. A mesma situação ocorreu com as resistências de isolamento, o tempo de carregamento da mola e a contagem de operações do equipamento no momento do ensaio.

Portanto, para futuros trabalhos, sugere-se adicionar ao modelo as seguintes variáveis:

- Tempo de carregamento da mola;

- Quantidade de operações do equipamento no momento do teste;
- Resistências de isolamento da carcaça para a terra na condição aberta;
- Resistências de isolamento da carcaça para a terra na condição fechada;
- Resistências de isolamento entre fases na condição aberta;
- Resistências de isolamento entre fases na condição fechada;
- Temperatura média de operação do equipamento;

## REFERÊNCIAS

- 1 LI, F.; BROWN, R. A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 1, p. 439–441, 2004.
- 2 KHALYASMAA, A. I.; SENYUK, M. D.; EROSHENKO, S. A. High-voltage circuit breakers technical state patterns recognition based on machine learning methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 4, p. 1747–1756, 2019.
- 3 DEHGHANIAN, P.; GUAN, Y.; KEZUNOVIC, M. Real-time life-cycle assessment of high-voltage circuit breakers for maintenance using online condition monitoring data. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 55, n. 2, p. 1135–1146, 2019.
- 4 ZHANG, X.; ZHANG, J.; GOCKENBACH, E. Reliability centered asset management for medium-voltage deteriorating electrical equipment based on germany failure statistics. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 2, p. 721–728, 2009.
- 5 ONS. *Operador Nacional do Sistema - Procedimentos de Rede - Submódulo 16.1 - Acompanhamento de manutenção: visão geral*. Acesso em: 23/11/2022: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>, 2005.
- 6 CONDITION monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary. Geneva, CH, 2012.
- 7 ASSET management — Overview, principles and terminology. Geneva, CH, 2014.
- 8 RAZI-KAZEMI, A. A.; SHARIATNASAB, M. A new approach on prioritization of the circuit breakers for installation of online monitoring systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 4, p. 1569–1577, 2019.
- 9 RAZI-KAZEMI, A. A.; NIAYESH, K. Condition monitoring of high voltage circuit breakers: Past to future. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 36, n. 2, p. 740–750, 2021.
- 10 BAGHERPOOR, A. et al. Online condition assessment of interruption chamber of gas circuit breakers using arc voltage measurement. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 4, p. 1776–1783, 2017.
- 11 TIMALSENA, K. R.; PIYA, P.; KARKI, R. A novel methodology to incorporate circuit breaker active failure in reliability evaluation of electrical distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 36, n. 2, p. 1013–1022, 2021.
- 12 DING, C.; CHEN, T. Simulation and analysis on the force of arc contact of sf6 circuit breaker under different making speed. In: *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4.

- 13 NITU, S.; NITU, C.; ANGHELITA, P. Electric arc model, for high power interrupters. In: *EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool"*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2, p. 1442–1445.
- 14 BROWNE, T. E. Practical modeling of the circuit breaker arc as a short line fault interrupter. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, n. 3, p. 838–847, 1978.
- 15 MOHAMMADHOSEIN, M. et al. Online assessment of contact erosion in high voltage gas circuit breakers based on different physical quantities. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 2, p. 580–587, 2019.
- 16 RESEARCH, I. M. A.; GROUP, C. Circuit breaker market: Global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2023-2028. *Press release*, 2022. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/circuit-breaker-market>.
- 17 FLURSCHEIM, C. H. *Power Circuit Breaker Theory and Design*. ISBN-10: 0906048702: IET - Institution of Engineering and Technology, 1982.
- 18 JANSSEN, R. S. L. S. M. K. D. P. A. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. ISBN-10: 1118381351: Wiley, 2014.
- 19 GARZON, R. D. *High Voltage Circuit Breakers Design and Applications*. ISBN-10: 0906048702: IET - Institution of Engineering and Technology, 1996.
- 20 NEITZEL, D. K. Typical power circuit breaker maintenance considerations. In: *2018 IEEE IAS Pulp, Paper and Forest Industries Conference (PPFIC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.
- 21 YUAN, Y. et al. Investigation on the defect data of circuit breaker above 110kv. In: *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 303–306.
- 22 JANSSEN, A.; MAKAREINIS, D.; SÖLVER, C.-E. International surveys on circuit-breaker reliability data for substation and system studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 2, p. 808–814, 2014.
- 23 RAZI-KAZEMI, A. A. et al. Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 1, p. 283–290, 2014.
- 24 RUDD, S. E. et al. Circuit breaker prognostics using sf6 data. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.
- 25 NATTI, S.; KEZUNOVIC, M. Assessing circuit breaker performance using condition-based data and bayesian approach. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 9, p. 1796–1804, 2011. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779611001039>.
- 26 HEISING, C. et al. Summary of cigre 13.06 working group world wide reliability data and maintenance cost data on high voltage circuit breakers above 63 kv. In: *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 2, p. 2226–2234 vol.3.

- 27 IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers. *IEEE Std C37.10.1-2018 (Revision of IEEE Std C37.10.1-2000)*, p. 1–61, 2019.
- 28 IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers - Redline. *IEEE Std C37.10.1-2018 (Revision of IEEE Std C37.10.1-2000) - Redline*, p. 1–98, 2019.
- 29 SWEETSER, C. et al. Strategies for selecting monitoring of circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, p. 742–746, 2002.
- 30 IEEE Guide for Investigation, Analysis, and Reporting of Power Circuit Breaker Failures. *IEEE Std C37.10-2011 (Revision of IEEE Std C37.10-1995)*, p. 1–59, 2011.
- 31 KOSCO, J. The effects of electrical conductivity and oxidation resistance on temperature rise of circuit-breaker contact materials. *IEEE Transactions on Parts, Materials and Packaging*, v. 5, n. 2, p. 99–103, 1969.
- 32 GOTO, K. et al. On-line monitoring and diagnostics of gas circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 375–381, 1989.
- 33 LIU, Y. et al. Research on impact of opening velocity in drm tests of sf6 high voltage circuit breakers. In: *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 38–41.
- 34 LANDRY, M.; TURCOTTE, O.; BRIKCI, F. A complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on hv circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 2, p. 710–716, 2008.
- 35 LANDRY, M. et al. A new measurement method of the dynamic contact resistance of hv circuit breakers. In: *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–8.
- 36 KHODDAM, M.; SADEH, J.; POURMOHAMADIYAN, P. Performance evaluation of circuit breaker electrical contact based on dynamic resistance signature and using health index. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 6, n. 10, p. 1505–1512, 2016.
- 37 BOKORO, P.; MALANDALA, K. Condition assessment of sf6 circuit breakers using analysis of variance (anova). In: *2017 IEEE AFRICON*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1374–1377.
- 38 MABUNDA, N.; BOKORO, P.; NICOLAE, D. Statistical analysis of operating times of high voltage sf6 circuit breakers. In: *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.
- 39 MEIER, S. D.; MOORE, P. J.; COVENTRY, P. F. Radiometric timing of high-voltage circuit-breaker opening operations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1411–1417, 2011.
- 40 OLIVEIRA, A. C. de et al. Radiometric monitoring technique for high-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 4, p. 1656–1665, 2019.
- 41 GUO, Z. et al. Reliable life calculation of circuit breaker based on fta and reliability function. In: *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.

- 42 ZHONG, J. et al. Incorporating a condition monitoring based aging failure model of a circuit breaker in substation reliability assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 6, p. 3407–3415, 2015.
- 43 RAZI-KAZEMI, A. A. et al. Data mining of online diagnosed waveforms for probabilistic condition assessment of  $\text{sf}_6$  circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 3, p. 1354–1362, 2015.
- 44 CHEN, L.; WAN, S.; DOU, L. Improving diagnostic performance of high-voltage circuit breakers on imbalanced data using an oversampling method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 37, n. 4, p. 2704–2716, 2022.
- 45 RAZI-KAZEMI, A. A.; NIAYESH, K.; NILCHI, R. A probabilistic model-aided failure prediction approach for spring-type operating mechanism of high-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 4, p. 1280–1290, 2019.
- 46 DENG, J. et al. A new method for measuring the speed characteristics of high voltage circuit breaker based on machine vision algorithm. In: *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 837–842.
- 47 LIU, Y. et al. Mechanical condition identification and prediction of spring operating mechanism of high voltage circuit breaker. *IEEE Access*, v. 8, p. 210328–210338, 2020.
- 48 RONG, M. et al. Mechanical condition recognition of medium-voltage vacuum circuit breaker based on mechanism dynamic features simulation and ann. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 1904–1909, 2005.
- 49 BOYACI, A.; BECKER, O.; AMIHAI, I. Vibration monitoring for medium-voltage circuit breaker drives using artificial intelligence. In: *CIREN 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 2021, p. 628–632.
- 50 CHATFIELD, A. C. C. *Introduction do Multivariate Analysis*. ISBN: 0-412-16040-4: Chapman & Hall, New York City, NY, 1980.
- 51 HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, v. 24, p. 417–441 and 498–520, 1933.
- 52 PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space (pdf). *Philosophical Magazine 2*, v. 11, p. 559–572, 1901.
- 53 ANAPARTHI, K. et al. Coherency identification in power systems through principal component analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1658–1660, 2005.
- 54 LLOYD, S. Least squares quantization in pcm. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 28, n. 2, p. 129–137, 1982.
- 55 FORGY, E. W. Cluster analysis of multivariate data : efficiency versus interpretability of classifications. *Biometrics*, v. 21, p. 768–769, 1965.



- 56 MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. 1. University of California Press*, p. 281–297, 1967.
- 57 WANG, Z.; ZHOU, Y.; LI, G. Anomaly detection by using streaming k-means and batch k-means. In: *2020 5th IEEE International Conference on Big Data Analytics (ICBDA)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 11–17.
- 58 CUI, M.; WANG, J.; YUE, M. Machine learning-based anomaly detection for load forecasting under cyberattacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 5, p. 5724–5734, 2019.
- 59 ROUSSEEUW, P. Rousseeuw, p.j.: Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *comput. appl. math.* 20, 53-65. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53–65, 11 1987.
- 60 BUDIARTO, E. H.; PERMANASARI, A. E.; FAUZIATI, S. Unsupervised anomaly detection using k-means, local outlier factor and one class svm. In: *2019 5th International Conference on Science and Technology (ICST)*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, p. 1–5.
- 61 Á., P.; M., L. *ABB - Field experiences with HV Circuit Breaker Condition Monitoring*. Acesso em: 18/10/2022: <https://library.e.abb.com/public/bbb1a075810990dec12578ae005de202/Field%20Experiences%20with%20ABB%20Circuit%20Breaker%20Condition%20Monitoring.pdf> 2009.
- 62 MUYI, L.; JIAN, H.; HU, X. Insulative condition monitoring of high voltage circuit breaker. In: *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 94–98.
- 63 MALLIKAR-GODBOLE, L.; KUSHARE, B. E. Online condition monitoring of sf6 circuit breaker. In: *2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3.
- 64 BISWAS, S. S.; SRIVASTAVA, A. K.; WHITEHEAD, D. A real-time data-driven algorithm for health diagnosis and prognosis of a circuit breaker trip assembly. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 6, p. 3822–3831, 2015.
- 65 WANG, X.; SLOAN, I. H. Brownian bridge and principal component analysis: towards removing the curse of dimensionality. *IMA Journal of Numerical Analysis*, v. 27, n. 4, p. 631–654, 2007.
- 66 ONS. *Operador Nacional do Sistema - Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Acesso em: 18/10/2022: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>, 2009.

# APÊNDICE A – EXEMPLO - FICHA



## ENSAIOS E M DISJUNTOR - I

DATA:

28/12/2011

### ANEXO I

DIVISÃO:

DOLTM

SUBESTAÇÃO:	BAY:	Nº SAP:	PMO:
ITAMBE	Bco Capac 2 (52-16)		MAR
FABRICANTE:	MODELO:	Nº DE SÉRIE:	MEIO EXTINÇÃO:
SIEMENS	3 AP1		SF6
TIPO MECANISMO:	TENSÃO NOMINAL:	CORRENTE NOMINAL:	CAPACIDADE RUPTURA. C. C.:
FA2	145 KV	1600 A	40 KA
TIPO MANUTENÇÃO:			
MPP (X)	MPT ( )	MCD ( )	MCF ( )
			COMISSONAMENTO ( )

OSCILOGRAFAGEM (ms)	Nº SAP INSTRUMENTO:	50005405
---------------------	---------------------	----------

	ENCONTRADO				DEIXADO			
	Az	Br	Vm	DISC.	Az	Br	Vm	DISC.
TEMPO ABERTURA (TA)	27,71	27,61	28,03					
TEMPO FECHAMENTO (TF)	57,70	58,17	57,11					
TEMPO ENERG. DAS BOBINAS (TEA - TEF)	TEA		TEF		TEA		TEF	
TEMPO DE CARREGAMENTO DA MOLA :								

RESISTÊNCIA DE CONTATO 100 A ( $\mu\Omega$ )	Nº SAP INSTRUMENTO:	50005416
--	---------------------	----------

	MEDIÇÃO TOTAL (CUBÍCULO + DISJUNTOR)				MEDIÇÃO DISJUNTOR			
	Az1 - Az2	Br1 - Br2	Vm1 - Vm2		Az1 - Az2	Br1 - Br2	Vm1 - Vm2	
ENCONTRADO	27,4	27,9	27,8					
DEIXADO								

RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO 5 KV (M $\Omega$ )	Nº SAP INSTRUMENTO:	
--	---------------------	--

TEMPERATURA °C:		UMIDADE RELATIVA %:	
ANTES:	DEPOIS:	ANTES:	DEPOIS:

DISJUNTOR	CONEXÃO	TOTAL		DISJUNTOR		RIGIDEZ DIELÉTRICA (KV)	
		ENCONTRADO	DEIXADO	ENCONTRADO	DEIXADO		
ENSAIO Nº	LINHA	TERRA	GUARD				
CONDIÇÃO FECHADO	1	Az	Br	T			
	1	Az	Vm	T			
	1	Br	Vm	T			
	2	Az	T	Br + Vm			ENS. ENCONT. DEIXADO
	2	Br	T	Az + Vm			1
	2	Vm	T	Az + Br			2
CONDIÇÃO ABERTO	3	Az1	T	Az2		25,3 G	3
	3	Br1	T	Br2		23 G	4
	3	Vm1	T	Vm2		34,5 G	5
	4	Az2	T	Az1		23,06 G	MED. #DIV/0!
	4	Br2	T	Br1		8,06 G	
	4	Vm2	T	Vm1		56,08 G	
	5	Az1	Az2	T		5 T	
	5	Br1	Br2	T		1,46 T	
	5	Vm1	Vm2	T		1,57 T	

### OBSERVAÇÕES

EXECUTADO POR:

PMO MARILIA

APROVADO POR:

ÓLEO SUBSTITUÍDO ?  
SIM ( )  
NÃO (X)