

# Manutenção Preditiva Para Garantir a Operação Segura de Subestações de Energia: Um estudo de Caso em um Laboratório de Arcos Elétricos

1<sup>st</sup> Felipe da Silveira Cardoso  
Instituto de Redes Inteligentes  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
felipe.cardoso@acad.ufsm.br

2<sup>nd</sup> Pedro de Oliveira Bacin  
Instituto de Redes Inteligentes  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
pedro.bacin@acad.ufsm.br

3<sup>rd</sup> Wilerson Alves Chuma  
Universidade Federal do Pampa  
Alegrete, Brasil  
wilersonchuma108@gmail.com

4<sup>th</sup> Vitor Cristiano Bender  
Instituto de Redes Inteligentes  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
vitor.bender@ufsm.br

5<sup>th</sup> Tiago Bandeira Marchesan  
Instituto de Redes Inteligentes  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
tiago@ufsm.br

6<sup>th</sup> Adriano Perdes de Moraes  
Instituto de Redes Inteligentes  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
adriano@ctism.ufsm.br

**Resumo** — Este trabalho discute os benefícios da manutenção preditiva aplicada a subestações de energia elétrica. A manutenção preditiva é essencial para monitorar continuamente essas instalações, permitindo a detecção precoce de falhas que poderiam causar mau funcionamento e danos aos equipamentos, resultando em prejuízos financeiros significativos. Foram realizadas medições em uma subestação de energia real utilizada para o funcionamento de um laboratório de arcos elétricos, utilizando diversos equipamentos de medição, para avaliar a condição de equipamentos essenciais como a chave seccionadora, transformadores de corrente, disjuntores e para-raios, iniciando uma rotina de manutenção preditiva. Os resultados demonstram que, após dois anos de operação do laboratório, os equipamentos estão em plenas condições de funcionamento. No entanto, é crucial manter a rotina de manutenção preditiva para assegurar a continuidade da operação segura e eficiente.

**Palavras-chave** — Manutenção preditiva, subestação de energia elétrica, técnicas de ensaios preditivos, gestão de ativos.

## I. INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva desempenha um importante papel na garantia da confiabilidade e operação das subestações de energia elétrica. Essa abordagem utiliza dados de medições e análises para identificar padrões de desgaste ou falhas iminentes nos equipamentos, permitindo intervenções antes que ocorra uma falha operacional. Ao prevenir falhas e danos nos equipamentos através do uso de dados e tecnologias avançadas, a manutenção preditiva oferece uma abordagem mais eficiente e econômica. Isso resulta em maior produtividade, segurança e vida útil dos equipamentos, além de contribuir para uma gestão de ativos mais eficaz no setor elétrico [1].

Evitar desligamentos não programadas de subestações de energia não é apenas essencial para garantir um fornecimento garantido de energia, mas também para reduzir custos operacionais, proteger equipamentos e manter o bem-estar e satisfação da população. Isso pode ser alcançado por meio de práticas eficazes de manutenção preditiva, monitoramento contínuo de condições e investimentos em tecnologia que aumentem a confiabilidade do sistema elétrico.

Em uma subestação, vários ensaios podem ser realizados para garantir a operação segura e eficiente dos equipamentos

elétricos, e a partir disso, identificar problemas potenciais antes que eles resultem em falhas maiores. Alguns destes ensaios são os de resistência de isolamento, resistência de contatos e relação de transformação dos equipamentos.

Assim, este trabalho aborda a aplicação de ensaios de rotina em uma subestação de energia elétrica, utilizando instrumentos de medição para avaliar o estado dos equipamentos e registrar os resultados para comparações futuras. A Sessão II revisa a literatura sobre manutenção preditiva e os equipamentos utilizados. A Sessão III descreve a subestação e as metodologias de medição. A Sessão IV apresenta os resultados obtidos das medições realizadas, e a Sessão V relata as considerações finais do artigo, discutindo possíveis trabalhos futuros baseados nas medições realizadas.

## II. REVISÃO DA LITERATURA

### A. Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é uma estratégia que utiliza dados e análises criteriosas para prever quando uma máquina ou equipamento pode falhar e, assim, permite que a manutenção seja realizada apenas quando necessário. Em vez de seguir um calendário fixo de manutenção preventiva ou esperar por uma falha para fazer manutenção corretiva, a manutenção preditiva usa técnicas como monitoramento de condição, análise de tendências e diagnóstico de falhas para determinar o momento ideal para a manutenção do equipamento [2].

Em termos comparativos, a manutenção preventiva pode levar a intervenções desnecessárias e custos mais altos, enquanto a corretiva resulta em paradas inesperadas e maiores custos de reparo. A manutenção preditiva, ao prevenir falhas antes que ocorram, é mais eficiente, econômica e melhora a produtividade e segurança, otimizando a gestão de ativos.

Na inspeção de subestações de energia elétrica, a manutenção preditiva pode ser aplicada de várias maneiras, como por exemplo [2]:

- Ensaios de resistência de isolamento de contato: Realizados majoritariamente para avaliar as condições de equipamentos como disjuntores, chaves seccionadoras e para-raios.

- Ensaio de relação de transformação: essencial para equipamentos como transformadores, transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TPs), para assegurar que seus níveis de elevação ou rebaixamento de parâmetros elétricos estão corretos.
- Ensaio de descargas parciais: As descargas parciais são pequenas descargas elétricas que ocorrem em isolamentos elétricos degradados. Detectar e monitorar essas descargas pode prever falhas iminentes em equipamentos elétricos, como transformadores e cabos.
- Monitoramento contínuo de tensão e corrente: a análise contínua da corrente e da tensão em circuitos elétricos pode revelar padrões incomuns que indicam problemas iminentes, como sobrecarga, desequilíbrio de fases ou falhas de componentes.
- Termografia infravermelha: utiliza câmeras infravermelhas para detectar pontos indevidamente aquecidos em sistemas elétricos, que podem ser indícios de conexões soltas, sobrecarga ou desgaste de componentes;

Essas são apenas algumas das aplicações da manutenção preditiva em subestações de energia elétrica. Implementar um programa de manutenção preditiva possui a premissa de aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos, reduzir o tempo de inatividade não planejado e otimizar os custos de manutenção [3].

#### B. Equipamentos considerados de medição

A manutenção preditiva em subestações elétricas envolve o uso de uma variedade de equipamentos para garantir a precisão e a segurança na operação e manutenção do sistema elétrico. Na Fig. 1 estão listados os equipamentos utilizados para realizar as medições consideradas neste trabalho.

##### 1) Megôhmetro e o Ensaio de Resistência de Isolamento

O megôhmetro é um instrumento essencial para medir a resistência elétrica de isolamento em sistemas elétricos [4].



(a) Megôhmetro digital modelo Homis 238 1000 V<sub>cc</sub>.



(b) Microhmímetro digital Megabras 10 A.



(c) TTR Modelo AECM 8510.

Fig. 1. Equipamentos utilizados na medição preditiva da subestação.

Sua principal função é testar a integridade do isolamento em cabos, transformadores, disjuntores, para-raios, chaves seccionadoras e outros equipamentos elétricos. O funcionamento do megôhmetro envolve a aplicação de uma tensão entre os condutores e a medição da resistência do isolamento, ajudando a identificar possíveis falhas ou problemas que possam comprometer a segurança e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

Através desse ensaio, garante-se a ausência de fugas de corrente significativas que possam ocasionar falhas ou representar riscos de choque elétrico [4]. A execução periódica do ensaio de resistência de isolamento contribui para a detecção precoce de problemas, o que prolonga a vida útil dos equipamentos e fortalece a segurança operacional

No caso dos disjuntores estudados neste trabalho, o uso de um megôhmetro é importante para a detecção de possíveis correntes de fuga através do isolamento. Este tipo de teste pode revelar problemas de segurança ou de funcionamento. A realização regular de testes de manutenção com o megôhmetro garante o funcionamento adequado dos disjuntores e mantém a segurança elétrica.

No caso de para-raios, o megôhmetro também pode ser utilizada para o teste de resistência de isolamento do dispositivo. Este ensaio é importante para garantir que o para-raios desempenhe sua função de escoar corretamente a corrente elétrica advinda de surtos para o aterramento do sistema, protegendo assim estruturas e equipamentos contra danos [4]. Uma resistência de isolamento abaixo do esperado pode indicar que a capacidade do para-raios de desviar a corrente está comprometida, necessitando sua substituição imediata.

Em chaves seccionadoras, o megôhmetro é utilizado para testar a resistência de isolamento de um circuito elétrico quando a chave está aberta, ou seja, quando o circuito está isolado da fonte de energia [4]. Aplicando uma tensão ao circuito, o megôhmetro mede a resistência de isolamento entre os condutores e o solo. Este procedimento importante para garantir a integridade dos componentes isolados e dos operadores da chave seccionadora.

##### 2) Microhmímetro e o Ensaio de Resistência de Contato

O microhmímetro é um instrumento utilizado para medir resistências elétricas muito baixas, tipicamente na faixa de  $\mu\Omega$ . Ele é amplamente empregado em aplicações industriais e subestações para avaliar a resistência de conexões, cabos, enrolamentos de transformadores e outros componentes onde a precisão na capacidade do material de conduzir corrente é essencial. Medições precisas de resistências extremamente baixas são fundamentais para assegurar o correto funcionamento dos componentes elétricos, principalmente que operam com altas correntes elétricas.

Nos disjuntores de potência e interruptores, os contatos móveis podem oxidar ou desgastar com o tempo, o que resulta em um aumento na resistência de contato. A medição precisa da resistência desses contatos usando um microhmímetro é crucial para avaliar continuamente a condição desses equipamentos e determinar a necessidade de manutenção ou substituição [5].

Dessa forma, esse procedimento visa garantir a qualidade e a segurança das conexões em sistemas elétricos, identificando resistências elevadas que podem indicar problemas no equipamento [6]. Assim o uso regular de um microhmímetro é fundamental para práticas eficazes de manutenção preditiva, assegurando um desempenho seguro e eficiente dos componentes elétricos em subestações.

### 3) TTR e o ensaios de relação transformação

O instrumento TTR (*transformer turns ratio*) é uma ferramenta multifuncional projetada para medir a relação transformação de componentes do sistema elétrico. A relação de transformação, seja em transformadores, TCs ou TPs, é uma medida fundamental da proporção entre a corrente ou a tensão no circuito primário e a corrente ou a tensão correspondente no circuito secundário [7]. Essa relação é essencial para garantir o bom funcionamento do sistema elétrico, a sua proteção. Erros na relação de transformação podem resultar em leituras incorretas ou falhas na operação de componentes do sistema elétrico, como relés e medidores de energia, comprometendo a segurança e a confiabilidade da rede. Dessa forma, o uso do TTR para verificar e ajustar essa relação ajuda a manter a integridade e a eficiência dos sistemas de medição e proteção é essencial.

O ensaio de relação de transformação é um procedimento realizado para verificar a relação de transformação de tensão ou corrente em um equipamento, de qualquer tipo, que é a razão entre a um parâmetro primário e um parâmetro secundário, de tensão ou corrente elétrica. Essa verificação é importante, para garantir que equipamentos como transformadores, TCs e TPs estão operando conforme suas especificações. O principal objetivo do ensaio de relação de transformação é confirmar se a razão entre parâmetros do enrolamento primário e secundário estão de acordo com a relação nominal especificada pelo fabricante [7]. Sendo essa verificação importante para garantir que os valores lidos no secundário dos equipamentos correspondem aos valores esperados no lado primário.

Nesse contexto, a função do TTR em medir a relação transformação é importante no contexto de manutenção preditiva de subestação, que operam com muitos equipamentos que se valem da característica de relação transformação de equipamentos. A realização regular de ensaios de relação de transformação com o TTR contribui para a identificação de problemas antes que ocorram falhas significativas.

## III. METODOLOGIA

As subestações podem ser classificadas quanto sua relação entre os níveis de tensão de entrada e de saída, seu fluxo de potência, sua função no sistema elétrico, ao tipo de instalação, ao tipo construtivo, a sua natureza dos parâmetros elétricos, entre outros, conforme é mostrado na Tabela I [8].

### A. Instalação considerada

A subestação estudada neste artigo faz parte do Laboratório de Arcos Elétricos do Instituto de Redes Inteligentes (INRI), onde são conduzidos ensaios de arcos elétricos, com arcos elétricos gerados a partir de correntes de curto-circuito que podem variar de 1 a 20 kA [9]. A presente subestação é ilustrada na Fig. 2 onde pode ser observados diversos equipamentos que são necessários para a geração segura de curtos-circuitos de alta corrente. Já na Fig. 3, são mostrados alguns dos equipamentos monitorados para a confecção deste trabalho.

Classificação	Subestação
Relação entre os níveis de tensão de entrada e saída	Manobra
	Transformadora
Fluxo de potencia	Elevadora
	Abaixadora
Função no sistema elétrico	Transmissão
	Sub transmissão
	Distribuição
Tipo de instalação	Externa
	Abrigada
	Interna
	Móvel
Tipo construtivo	Convencional
	Cabine metálica
	Blindada
	Subterrânea
Natureza dos parâmetros elétricos	Corrente alternada
	Alternadora
	Retirificadora

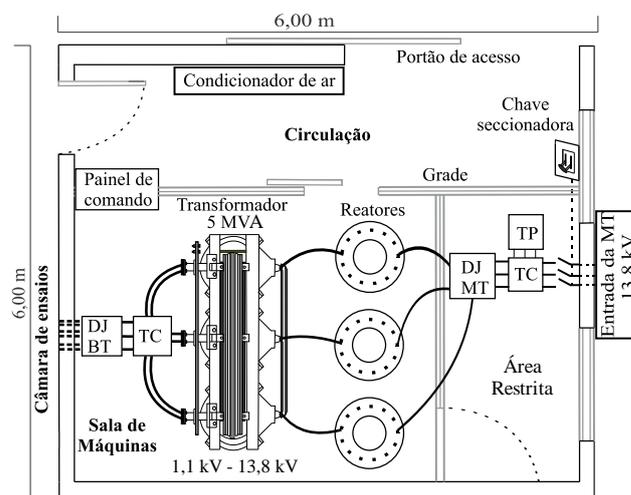
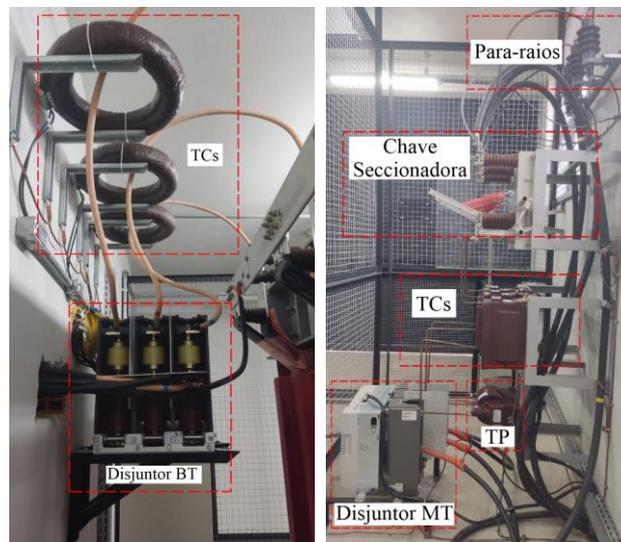


Fig. 2. Planta baixa da subestação do laboratório de arcos elétricos [9].



(a) Área de BT.

(b) Área restrita.

Fig. 3. Equipamentos da subestação analisada.

No caso da presente subestação, ela pode ser definida como: transformadora, rebaixadora, na categoria de distribuição, abrigada e de corrente alternadora, de acordo com os critérios estabelecidos na Tabela I. A seguir, são descritas de forma geral as funcionalidades dos equipamentos presentes na Fig. 2 que foram inspecionados para a realização desse trabalho, e sua função dentro da subestação do laboratório:

- TP (13.800 : 115 V): Empregado na medição da tensão de entrada;
- TC tipo barra 50 VA 10P20 (300-600-1200 : 5 A): Empregados na medição das correntes de entrada;
- Chave seccionadora trifásica classe 15 kV: Que possibilita isolar a entrada da subestação do restante do circuito;
- Disjuntor de média tensão (MT): Utilizado como proteção secundária para interromper o curto-circuito caso o disjuntor de BT não atue no tempo programado;
- TCs tipo janela 10P20 (5.000-10.000-15.000 : 5 A): Responsáveis pela medição das correntes de arco;
- Disjuntor de Baixa Tensão (BT): Responsável por interromper o arco elétrico no tempo programado em conjunto ao relé associado.

#### B. Procedimentos de ensaio adotados

Alguns equipamentos, como os TCs e os disjuntores de BT e MT desempenham um papel fundamental no funcionamento da subestação para a operação segura do laboratório de arcos elétricos. Portanto, é essencial promover uma rotina sequencial de manutenção, realizando os devidos cuidados e acompanhamentos de acordo com as normas e padrões recomendados pelos fabricantes [9]. Assim, a presente seção detalha os procedimentos adotados para as medições realizadas para a confecção deste trabalho, através dos equipamentos mencionados anteriormente.

É importante destacar que todos os ensaios foram planejados com antecedência e executados sob condições de temperatura ambiente e umidade relativa, fixadas ou próximas de 20 °C e 70%, respectivamente. Essa padronização visa minimizar as variações nas medições que poderiam ser causadas por flutuações climáticas durante os testes.

##### 1) Ensaio de resistência de isolamento

O ensaio de resistência de isolamento é realizado através do megôhmetro especificado na Fig. 1 que aplicou uma tensão padrão de 1000 V em corrente contínua (CC) nos seguintes equipamentos: disjuntores, para-raios e chave seccionadora. Neste ensaio é aplicada uma tensão em CC apropriada para a classe de tensão do isolamento, conforme especificado nas normas e mostrado na Tabela II. Depois de aplicar a tensão, o dispositivo mede a corrente que passa e utiliza os princípios da primeira lei de Ohm para calcular o valor da resistência.

##### 2) Ensaio de resistência de contato

Para medição da resistência de contatos de disjuntores, foi utilizado o microhmímetro digital mostrado na Fig. 1. O funcionamento do microhmímetro é semelhante ao de um

TABELA II. VALOR DE TENSÃO MÍNIMO A SER APLICADO COM O MEGÔHMETRO ÀS CLASSES DE TENSÃO [10].

Classe de tensão	Tensão CC mínima aplicada
≤ 1 kV	500 V
> 1 kV e ≤ 69 kV	1000 V
≥ 69 kV e ≤ 230 kV	2500 V
≥ 230kV	5000 V

ohmímetro padrão, mas com algumas diferenças fundamentais de projeto para lidar com resistências muito baixas [11]. O objetivo do ensaio de resistência ôhmica dos contatos na subestação estudada é de avaliar resistência que existe entre cada um dos polos superiores e inferiores de um disjuntor, quando este estiver na posição fechado, normalmente dada em  $\mu\Omega$ .

O microhmímetro gera uma corrente conhecida e a aplica ao dispositivo ou conexão cuja resistência está sendo medida. Esta corrente é tipicamente alta para compensar as pequenas resistências testadas. O instrumento então mede a tensão resultante através da resistência em questão. Conforme a Lei de Ohm, a tensão é diretamente proporcional à resistência do dispositivo ou conexão, permitindo ao microhmímetro calcular a resistência da amostra com precisão [11].

##### 3) Ensaio de relação transformação

O ensaio de relação de transformação foi realizado nos TCs da subestação através de um medidor de relação transformação (TTR), conforme especificado na Fig. 1. Esse ensaio foi conduzido com o objetivo de determinar a relação de transformação do transformador de corrente (RTC) em alguns TCs que possuem múltiplos taps, identificar a polaridade do transformador (aditiva ou subtrativa) e detectar possíveis curtos nos enrolamentos, bem como rupturas nos mesmos [9].

Dessa forma, pode-se identificar ou antecipar possíveis erros de leitura nas correntes elétricas medidas durante os ensaios realizados no laboratório pelos TCs, que poderiam ocasionar falhas operacionais e erros de medição. Destaca-se a importância do conhecimento desses valores, uma vez que o laboratório executa uma variedade de ensaios de curto-circuito, que necessitam medições fidedignas da corrente elétrica.

## IV. RESULTADOS

### A. Disjuntor

Para os ensaios de resistência de isolamento em disjuntores utilizando o megôhmetro, as configurações descritas na Tabela III são aplicadas. Quando o disjuntor está aberto, as medições são realizadas entre os polos para avaliar a condição do isolamento no ponto onde ocorre a interrupção da corrente. Com o disjuntor fechado, é realizada a medição do isolamento entre os terminais dos diferentes polos para garantir a resistência dielétrica adequada, além de verificar o isolamento entre os polos e massa (carcaça) do disjuntor.

Os valores obtidos, conforme especificado na Tabela III são avaliados de acordo com as especificações do fabricante dos disjuntores analisados, que indicam que valores  $\geq 2000 M\Omega$  estão dentro da faixa de condição segura de operação dos dispositivos analisados para este parâmetro.

TABELA III. ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO [12].

Disjuntor aberto		
A1 x A2 x Massa	B1 x B2 x Massa	C1 x C2 x Massa
≥2000 MΩ	≥2000 MΩ	≥2000 MΩ
A1 x Massa	B1 x Massa	C1 x Massa
≥2000 MΩ	≥2000 MΩ	≥2000 MΩ
A2 x Massa	B2 x Massa	C2 x Massa
≥2000 MΩ	≥2000 MΩ	≥2000 MΩ
Disjuntor fechado		
A1 x B1 x Massa	A1 x C1 x Massa	B1 x C1 x Massa
≥2000 MΩ	≥2000 MΩ	≥2000 MΩ
A1 x Massa	B1 x Massa	C1 x Massa
≥2000 MΩ	≥2000 MΩ	≥2000 MΩ

A fase subsequente de ensaios dos disjuntores da subestação abordou a medição da resistência dos contatos utilizando um microhmímetro, com os polos dos disjuntores fechados. Os resultados obtidos para os disjuntores de MT e BT podem ser observados na Tabela IV.

O fabricante delimita que valores de resistência até  $23 \mu\Omega$  são considerados confiáveis. Os resultados obtidos foram comparados com os valores especificados pelo fabricante, com a maioria das medições dentro do limite aceitável de  $23 \mu\Omega$ . Uma exceção foi observada na medição entre os polos A1 e A2 do disjuntor de MT, onde foi registrado o valor de  $1 \mu\Omega$  acima do delimitado pelo fabricante. Esta discrepância deve ser monitorada nas próximas rotinas de manutenção para avaliar sua evolução ao longo do tempo, o que poderia indicar um potencial problema emergente no equipamento.

### B. Transformador de Corrente

Para os TCs da subestação, foi realizado o ensaio de relação de transformação através de um medidor de relação transformação (TTR). Esse ensaio foi conduzido com o objetivo de determinar a relação de transformação do transformador de corrente (RTC) em alguns TCs que possuem múltiplos taps, identificar a polaridade do transformador (aditiva ou subtrativa) e detectar possíveis curtos nos enrolamentos, bem como rupturas nos mesmos.

Na presente subestação, existem três TCs tipo barra na área restrita da subestação e três TCs janela na área de BT, que se comunicam com os respectivos relés e disjuntores da subestação do laboratório. Esses equipamentos estão demonstrados detalhadamente nas Figs. 2 e 3. Cada TC foi ensaiado pelo TTR de acordo com as configurações descritas nas Tabelas V e VI.

Ambos os TCs são utilizados para proteção e possuem uma classe de exatidão de 10% (10P20) [13]. De acordo com os resultados dos ensaios apresentados nas Tabelas V e VI, os TCs demonstram conformidade com suas faixas operacionais. No entanto, foram observadas diferenças de aproximadamente 1% a 3% em algumas conexões dos taps dos TCs, especialmente no tap S3-S4 do TC de janela, que apresentou um desvio significativo em relação aos demais. Dessa forma, é importante armazenar esses dados para análises futuras e revisões periódicas dos TCs para assegurar seu correto funcionamento, ou, em caso de defeitos, a sua substituição.

TABELA IV. RESISTÊNCIA DE CONTATOS.

Disjuntor de Média Tensão		
A1 x A2	B1 x B2	C1 x C2
24 $\mu\Omega$	23 $\mu\Omega$	20 $\mu\Omega$
Disjuntor de Baixa Tensão		
A1 x A2	B1 x B2	C1 x C2
20 $\mu\Omega$	22 $\mu\Omega$	18 $\mu\Omega$

TABELA V. ENSAIO DE TCs NA ÁREA RESTRITA.

TC	1	2	3
Tap	S1-S2 300 – 5A	S1-S2 300 – 5A	S1-S2 300 – 5A
Dif. RTC	1.38% 60,833:1	0.21% 60,131:1	1.74% 61,046:1
Tap	S1-S3 600 – 5A	S1-S3 600 – 5A	S1-S3 600 – 5A
Dif. RTC	0.06% 120,08:1	0,21% 120,25:1	0.47% 120,57:1
Tap	S1-S4 1200 – 5A	S1-S4 1200 – 5A	S1-S4 1200 – 5A
Dif. RTC	0.02% 240,06:1	-0.03% 239,91:1	1.24% 242,99:1

TABELA VI. ENSAIO DOS TCs NA ÁREA DE BT.

TC	1	2	3
Tap	S1-S2 5.000 – 5A	S1-S2 5.000 – 5A	S1-S2 5.000 – 5A
Dif. RTC	0.05% 1000.5:1	-0.01% 999.84:1	-0.01% 999.83:1
Tap	S2-S3 10.000 – 5A	S2-S3 10.000 – 5A	S2-S3 10.000 – 5A
Dif. RTC	0.08% 2001.7:1	-0.04% 1999.2:1	-0.05% 1998.9:1
Tap	S3-S4 10.000 – 5A	S3-S4 10.000 – 5A	S3-S4 10.000 – 5A
Dif. RTC	-2,63% 1947.3:1	0,00% 2000.0:1	-0,04% 1999.2:1

### C. Chave seccionadora e para-raios

Em para-raios e chaves seccionadoras, foram realizados ensaios de resistência de isolamento utilizando o megôhmetro. Como esses equipamentos são mais simples em termos de medição e funcionamento, a implementação de uma rotina de manutenção é menos complexa. As especificações do fabricante são geralmente suficientes para avaliar seu desempenho no que se refere à resistência de isolamento.

Para o ensaio da resistência de isolamento na chave seccionadora, o megôhmetro foi conectado em cada um dos três polos da chave e na carcaça do equipamento. Em seguida, foi aplicada tensão pelo megôhmetro. Os valores de referência dependem do nível de tensão de operação da chave seccionadora, conforme as diretrizes especificadas na Tabela II. Valores de resistência de isolamento acima de  $2 \text{ G}\Omega$  para esse ensaio podem ser considerados aceitáveis para essa classe de chave seccionadora [8].

Para o caso dos para-raios, o ensaio de resistência de isolamento é realizado conectando ao megôhmetro no terminal de entrada da fase no para-raios e a baixa tensão no terminal de aterramento do mesmo do mesmo. A ABNT NBR 16050:2012 classifica os para-raios em duas classes conforme a corrente de descarga do equipamento em relação a sua tensão eficaz: estação, para para-raios de 10 a 20 kA, e distribuição, para para-raios de 5 a 10 kA [14]. Na subestação em questão, são utilizados nove para-raios de classe estação, nos quais foi aplicada uma tensão de 1 kV durante o ensaio de resistência de isolamento, com os resultados obtidos disponibilizados na Tabela VIII.

TABELA VII. ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO NA CHAVE SECCIONADORA.

Tensão ( $V_{CC}$ )	Chave A	Chave B	Chave C
1000	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$

TABELA VIII. ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO NOS PARA-RAIOS.

Para-raios	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1	119.8 $\text{G}\Omega$	120 $\text{G}\Omega$	119.5 $\text{G}\Omega$
2	40.86 $\text{G}\Omega$	40.86 $\text{G}\Omega$	40.86 $\text{G}\Omega$
3	41.11 $\text{G}\Omega$	41.52 $\text{G}\Omega$	43.11 $\text{G}\Omega$
4	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$
5	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$
6	100 $\text{G}\Omega$	100.5 $\text{G}\Omega$	99.6 $\text{G}\Omega$
7	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$
8	52.22 $\text{G}\Omega$	52.96 $\text{G}\Omega$	53 $\text{G}\Omega$
9	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$	>130 $\text{G}\Omega$

Dessa forma, a melhor abordagem para avaliar os resultados apresentados na Tabela VIII é através da comparação com históricos de ensaios dos próprios para-raios ou com equipamentos similares, como a chave seccionadora, uma vez que não há dados disponíveis de testes anteriores nos para-raios [15]. Nos ensaios realizados, verificou-se que a resistência de isolamento foi superior a  $2\text{ G}\Omega$  para todos os cenários, embora valores menores tenham sido identificados nos para-raios 2, 3 e 8. De maneira geral, os resultados são satisfatórios e destacam a necessidade de monitoramento contínuo para prevenir falhas nos equipamentos, especialmente nos que apresentaram menor resistência de isolamento.

## V. CONCLUSÕES

Este estudo ressaltou a importância da manutenção preditiva em equipamentos elétricos, particularmente em subestações de energia, ao demonstrar a aplicabilidade de diferentes tipos de inspeção e identificar possíveis situações que podem resultar em falhas e perdas significativas de ativos.

Por meio de ensaios em diversos equipamentos, como disjuntores, TCs, chaves seccionadoras e para-raios, foi possível avaliar as condições desses dispositivos após quase dois anos de operação no laboratório de arcos elétricos. Os resultados indicam que os equipamentos ainda estão em bom estado de conservação e operacionais. No entanto, alguns desvios foram registrados e devem ser monitorados nas próximas avaliações preditivas para avaliar a necessidade de manutenção ou substituição antes que ocorra uma falha grave que possa comprometer a operação do laboratório.

É importante enfatizar que a avaliação preditiva é apenas uma das várias abordagens possíveis para a gestão de ativos em subestações de energia elétrica, sendo que outros tipos de manutenção podem ser adotados conforme o contexto. O objetivo principal é garantir a operação segura dos equipamentos, evitando acidentes e interrupções que possam causar prejuízos técnicos e financeiros significativos.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM (PPGEE-UFSM), ao Instituto de Redes Inteligentes (INRI), ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD) e aos órgãos financiadores CNPq (processo no. 405054/2022-0), CAPES (processo no. 23038.000776/2017-54) e FAPERGS (processo no. 17/2551-0000517-1) pelo apoio técnico e financeiro na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Posted Content, "The benefits of predictive maintenance in manufacturing excellence: a case study to establish reliable methods for predicting failures," 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-2908342/v1.
- [2] D. Khakhar, "Predictive Maintenance Strategies for Engineering Assets using Data Analytics," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 7, pp. 844–850, 2023, doi: 10.22214/ijraset.2023.54747.
- [3] O. S. Junior et al., "Impacts of Atmospheric and Load Conditions on the Power Substation Equipment Temperature Model," *Energies*, vol. 16, no. 11, 2023, doi: 10.3390/en16114295.
- [4] T. Yamada, "Insulation resistance monitoring device," *Patente número: 11740271*, Japão, 2023 [Online]. Disponível em: <https://patents.justia.com/patent/11740271>
- [5] E. A. Ciarlini, "Guia prático de Inspeção, Manutenção e Ensaios em Disjuntores de Alta Tensão," Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso, *Universidade Federal do Ceará*, Fortaleza, 2022.
- [6] M. Moleda, B. Malysiak-Mrozek, W. Ding, V. Sunderam, and D. Mrozek, "From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry," *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023, doi: 10.3390/s23135970.
- [7] H. Taopik, W. Brainvendra, D. Dionova, W. Sinka, and M. Nor, "Comparative Analysis of Windings and Vector Groups in 20/0.4 kV Distribution Transformers at CV. Centrado Prima," *Eksergi: Jurnal Teknik Energi*, 2022. doi: 10.32497/eksergi.v18i3.3765.
- [8] G. L. O. Muzy, "Subestações Elétricas," Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro UFRJ, 2012.
- [9] P. O. Bacin, A. P. G. Marchesan, R. C. Beltrame, T. B. Marchesan, D. P. Bernardon, V. C. Bender, L. H. Medeiros, F. S. Borges, L. M. Chiara, and F. C. Pepe, "Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente," *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Santa Maria, 2022, pp. 8. doi: <https://doi.org/10.20906/sbse.v2i1.2983>.
- [10] B. Cai e F. Zhang, "Study on Maintenance and Test Method of Primary Equipment in modern substation," *Adv. Eng. Technol. Res.*, vol. 3, no. 1, p. 212, 2022, doi: 10.56028/aetr.3.1.212.
- [11] ABNT NBR IEC 62271-1, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications," 2020.
- [12] Y. Jian, L. Shuxin, S. Zhuo, and L. Shuze, "Research on Circuit Breaker Circuit Resistance Test Equipment," *Proc. - 2022 Power Syst. Green Energy Conf. PSGEC 2022*, pp. 1016–1020, 2022, doi: 10.1109/PSGEC54663.2022.9881054.
- [13] ABNT, "NBR 5656:2021 - Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52kV- Especificação de ensaios," *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro 2021.
- [14] ABNT, "NBR 16050:2012 - Medição de resistência de isolamento de máquinas elétricas com tensões de ensaio acima de 1 kV e até 10 kV," *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 2012.
- [15] F. H. D. Carrião, C. Mardegan, e C. Rancoleta, "Equipamentos para ensaios em campo," *Revista O Setor Elétrico*, 2020.