

Avaliação da Recuperação Pós-Enchente de Transformadores a Seco com Dados de Isolação e Análise de Variabilidade por Monte Carlo

Renê Reinaldo Emmel Júnior

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ)
Ijuí, RS, Brasil
rene.junior@sou.unijui.edu.br

Moisés Machado Santos

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ)
Ijuí, RS, Brasil
moises.santos@unijui.edu.br

Paulo Sérgio Sausen

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ)
Ijuí, RS, Brasil
sausen@unijui.edu.br

Airam Sausen

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ)
Ijuí, RS, Brasil
airam@unijui.edu.br

Abstract

This paper presents a preliminary analysis of two dry-type distribution transformers recovered after a major flood in Rio Grande do Sul, Brazil, in 2024. Insulation resistance was measured before and after an emergency thermal-drying procedure, showing increases between one and three orders of magnitude depending on the dielectric path. To qualitatively represent the variability of post-recovery insulation, we apply a simple exploratory Monte Carlo simulation assuming a lognormal distribution centered on the measured reference value. The approach illustrates how dispersion around nominal insulation levels can be incorporated into qualitative risk discussions. Although limited to a small set of field cases and a simplified stochastic model, the study combines empirical measurements from a real flood event with probabilistic analysis to support discussions on risk and resilience in urban distribution systems exposed to extreme weather conditions.

Keywords

Transformadores a Seco, Enchentes, Resistência de Isolação, Simulação de Monte Carlo, Resiliência

1 Introdução

As enchentes que atingiram o estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 foram classificadas entre os maiores desastres naturais já registrados na região. Estima-se que cerca de 90% do território estadual tenha sido afetado, com aproximadamente 2,3 milhões de pessoas impactadas e centenas de milhares de desabrigados [1]. Estudo recente indica que eventos climáticos extremos tendem a se tornar mais frequentes e intensos no Sul do Brasil devido às mudanças climáticas e à interação com fenômenos como o El Niño [1].

Na região metropolitana de Porto Alegre, a infraestrutura de energia foi fortemente afetada, com diversas subestações urbanas inundadas. A concessionária local precisou reforçar rapidamente suas equipes para atuar em áreas alagadas e viabilizar o restabelecimento do fornecimento assim que as águas recuassem [2]. Nesse

contexto, transformadores a seco instalados em subestações prediais e urbanas tiveram papel central, pois muitos ficaram submersos durante vários dias.

Transformadores a seco são amplamente utilizados em ambientes internos e urbanos por motivos de segurança e redução de riscos associados a líquidos isolantes. No entanto, eles são sensíveis à umidade e à submersão, o que pode comprometer a integridade da isolação e inviabilizar a operação imediata após uma enchente. Em cenário de alta demanda e prazos longos para fabricação de novos equipamentos, a recuperação emergencial passa a ser considerada como alternativa técnica e econômica. Contudo, em casos de desastres naturais extremos como os ocorridos, deixa de ser uma alternativa para se torna uma necessidade para recompor o suprimento de energia elétrica o mais rápido possível. É justamente neste contexto que este trabalho se insere a partir de um estudo preliminar conduzido com dois transformadores a seco recuperados após a enchente de 2024 no Rio Grande do Sul. Fundamentalmente, são avaliados os valores de resistência de isolação medidos antes e depois do processo de recuperação emergencial, bem como os procedimentos adotados na etapa de secagem e ensaios dielétricos. Além disso, utiliza-se uma modelagem estocástica exploratória baseada em Monte Carlo para representar a variabilidade dos valores de isolação pós-recuperação e explorar seu potencial uso em análises qualitativas de risco. O objetivo é ilustrar, em nível conceitual, como dados de medições reais podem subsidiar discussões sobre risco e resiliência em redes urbanas de distribuição de energia, alinhadas ao ODS 11¹, que aborda cidades e comunidades mais seguras e resilientes.

As principais contribuições deste trabalho são: (i) a apresentação de medições reais de resistência de isolação obtidos em transformadores a seco efetivamente expostos a uma enchente de grande porte; (ii) a integração desses dados com uma modelagem estocástica exploratória simples, baseada em simulação de Monte Carlo,

¹O ODS 11 (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11) da ONU é "Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis", buscando até 2030 garantir moradia digna, acesso a serviços básicos, transporte seguro e acessível, planejamento urbano inclusivo, proteção do patrimônio cultural e natural, e redução de riscos de desastres para todas as pessoas, tornando os ambientes urbanos mais justos e amigáveis.

para ilustrar a variabilidade pós-recuperação; e (iii) a discussão de implicações operacionais e econômicas da recuperação emergencial no contexto de redes urbanas sujeitas a eventos climáticos extremos.

2 Trabalhos Relacionados

A simulação de Monte Carlo é amplamente utilizada em estudos de confiabilidade e análise de risco de sistemas de potência, por permitir a representação explícita de incertezas associadas a condições operacionais, falhas, tempos de restabelecimento e degradação de componentes [3–6]. Essa abordagem é particularmente útil quando se trabalha com grandezas sujeitas a forte variabilidade, como parâmetros de isolamento, e tem sido empregada tanto em estudos de confiabilidade de sistemas de geração e distribuição quanto na avaliação de dispositivos de eletrônica de potência em condições operacionais estocásticas [7–9].

No contexto de transformadores, diferentes autores exploram a aplicação de modelagem estocástica para quantificar incertezas associadas à vida útil térmica e à degradação da isolamento sólida. Em [7] é proposto um método baseado em Monte Carlo para estimar a vida térmica da isolamento de transformadores, incorporando a variabilidade de carga e temperatura ambiente em históricos artificiais de operação. Por outro lado, uma metodologia holística é apresentada em [10] para avaliar a degradação da isolamento sólida considerando conjuntamente envelhecimento térmico e a dinâmica de umidade no papel isolante. Revisões recentes sobre envelhecimento e avaliação de condição da isolamento sólida sintetizam técnicas diagnósticas e indicadores de vida remanescente, reforçando o papel central da umidade, da temperatura e de marcadores químicos na confiabilidade de transformadores [11]. Trabalhos específicos sobre umidade em papel, a partir do monitoramento contínuo de umidade no óleo, também evidenciam a complexidade dos fenômenos de difusão e seu impacto na integridade dielétrica [12].

No contexto de eventos climáticos extremos, estudos sobre resiliência de sistemas elétricos mostram que enchentes, tempestades e outros fenômenos podem alterar significativamente o comportamento dos ativos e a disponibilidade da rede, justificando a incorporação de cenários adversos no planejamento e na operação [13–15]. Revisões recentes sobre resiliência em sistemas de distribuição apontam a necessidade de integrar modelos de falhas dependentes de clima, métricas de resiliência e estratégias de restauração baseadas em recursos distribuídos, reconfiguração de rede e priorização de cargas críticas [14, 15]. Esses trabalhos reforçam a importância de considerar não apenas indicadores médios de desempenho, mas também a dispersão dos resultados sob condições severas, sobretudo em ambientes urbanos expostos a eventos de alta intensidade e baixa probabilidade.

Para transformadores a seco, há uma literatura consolidada sobre aspectos térmicos, condições dielétricas e vida útil da isolamento, destacando a influência da temperatura, da umidade e da qualidade dos materiais isolantes na confiabilidade dos equipamentos [11, 16, 17]. Estudos sobre recuperação de transformadores danificados indicam que, em determinadas situações, processos de secagem, condicionamento e reforma podem ser tecnicamente viáveis e economicamente vantajosos em relação à substituição imediata,

Table 1: Valores de resistência de isolamento medidos.

Caminho dielétrico	Transformador	Antes	Depois
AT–massa	T1	6,8 GΩ	300 GΩ
BT–massa	T1	28 MΩ	28 GΩ
AT–BT	T1	7,3 GΩ	410 GΩ
AT–massa	T2	10 MΩ	290 GΩ
BT–massa	T2	≈0 MΩ	2,5 GΩ
AT–BT	T2	9,8 MΩ	350 GΩ

desde que acompanhados de ensaios dielétricos e de diagnóstico adequados [18, 19]. Boas práticas de ensaio de resistência de isolamento, recuperação pós-enchente e avaliação da condição da isolamento são discutidas em guias técnicos e estudos aplicados, mas muitas vezes com foco em transformadores imersos em óleo, e não em unidades a seco instaladas em ambientes urbanos sujeitos a inundações.

Embora exista um conjunto consolidado de estudos sobre envelhecimento, degradação dielétrica e impactos de eventos climáticos extremos em ativos de distribuição, observa-se uma escassez de trabalhos que utilizem dados reais coletados após enchentes para a construção de cenários probabilísticos associados diretamente ao desempenho da resistência de isolamento de transformadores a seco submetidos a processos de recuperação. Neste contexto, o presente estudo oferece uma contribuição inicial ao integrar medições de campo obtidas no período pós-evento com uma modelagem estocástica exploratória baseada em Monte Carlo, adequada ao caráter preliminar dos dados disponíveis, visando apoiar discussões sobre risco e resiliência em redes urbanas de distribuição de energia expostas a condições climáticas severas.

3 Metodologia

A metodologia empregada neste estudo é estruturada em três etapas principais: (i) aquisição de dados de resistência de isolamento de dois transformadores a seco, obtidos antes e após o processo de recuperação; (ii) apresentação de uma descrição objetiva do procedimento emergencial de recuperação, incluindo as condições de secagem e os ensaios dielétricos realizados; e (iii) desenvolvimento de uma modelagem estocástica exploratória, baseada em simulação de Monte Carlo, utilizada para representar a variabilidade dos valores de resistência de isolamento pós-recuperação no caminho dielétrico selecionado. Cada uma dessas etapas é apresentada em maior detalhe nas subseções seguintes.

3.1 Dados dos transformadores

Neste trabalho foram avaliados medições reais de dois transformadores de distribuição do tipo seco, denominados Transformador 1 (T1) e Transformador 2 (T2). Ambos permaneceram submersos durante o evento de inundação e, posteriormente, foram encaminhados a uma empresa especializada em processos de recuperação e condicionamento.

A Tabela 1 apresenta os valores de resistência de isolamento medidos antes e após o processo de recuperação para os dois equipamentos. Os resultados evidenciam aumentos expressivos de resistência de isolamento após o processo de recuperação, com ganhos que variam de duas a quatro ordens de grandeza nos diferentes caminhos dielétricos avaliados.

Conforme mostrado na Tabela 1, o valor inicial praticamente nulo observado no caminho BT–massa do T2 indica uma condição crítica de isolamento imediatamente após a inundação, compatível com a saturação de umidade em materiais isolantes.

3.2 Processo de recuperação emergencial

A recuperação dos transformadores seguiu etapas típicas de reforma de equipamentos inundados: desmontagem parcial para acesso à parte ativa, limpeza de componentes, secagem em estufas com circulação de ar quente e substituição de peças danificadas quando necessário. A secagem foi realizada em estufas de grande porte, com controle eletrônico de temperatura em torno de 80 °C, por períodos compatíveis com o porte dos transformadores e a quantidade de núcleos tratados simultaneamente. Considerando o tempo de recuperação emergencial dos equipamentos de aproximadamente quatorze dias.

Ao final da secagem, foram realizadas medições de resistência de isolamento entre enrolamentos e massa e entre alta e baixa tensão. Em seguida, foram conduzidos ensaios de tensão aplicada, com tensões da ordem de 1,1 vez a tensão nominal, por cerca de 15 minutos, seguindo recomendações de normas técnicas e de manuais de fabricantes de transformadores a seco [20]. Apenas equipamentos que apresentaram resultados satisfatórios nesses ensaios foram liberados para retorno ao serviço.

A Fig. 1 apresenta, de forma qualitativa, o estado físico do transformador antes e depois do processo de recuperação. Na Fig. 1(a), observa-se a presença de água escoando pela estrutura externa, evidenciando saturação por umidade e a possível perda de integridade do isolamento interno. Essa condição indica que os elementos de proteção e o meio isolante estavam comprometidos, o que inviabilizava a operação segura do equipamento.

Já a Fig. 1(b) mostra o estado final após secagem e remontagem, compatível com os requisitos mínimos para a realização dos ensaios dielétricos de liberação.

3.3 Simulação de Monte Carlo

A variabilidade da resistência de isolamento após o processo de recuperação foi explorada por meio de simulações de Monte Carlo. Essa abordagem permite visualizar, de maneira qualitativa, a dispersão esperada em torno do valor medido, destacando que mesmo após a secagem e os ensaios dielétricos permanecem incertezas associadas às condições térmicas, higroscópicas e de envelhecimento não observáveis diretamente.

A simulação tomou como base o valor pós-recuperação do caminho AT–massa do transformador T1 e seguiu o seguinte procedimento:

- (1) considerar o valor medido pós-recuperação como média de uma distribuição estatística;
- (2) adotar uma distribuição lognormal, apropriada para grandezas positivas e assimétricas como resistência dielétrica;
- (3) utilizar um coeficiente de variação de 50%, representando um cenário conservador de variabilidade;
- (4) gerar 10.000 amostras de resistência de isolamento.

A escolha de uma distribuição lognormal está alinhada a estudos em confiabilidade de sistemas de potência, nos quais grandezas como tempos até falha, rigidez dielétrica e parâmetros de degradação

apresentam comportamento multiplicativo e cauda longa. O valor de 50% de variabilidade, ainda que não calibrado com séries históricas, representa uma hipótese prudente em situações de pós-enchente com incertezas operacionais relevantes.

O propósito dessa simulação não é produzir estimativas quantitativas de probabilidade de falha, mas representar qualitativamente como variações realistas em torno do valor medido podem ser analisadas com olhar probabilístico.

A Fig. 2 apresenta a comparação direta entre os valores de resistência AT–massa medidos antes e depois da recuperação, servindo como referência para a modelagem estocástica.

4 Análise dos Resultados de Recuperação

Esta seção apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos após o processo de recuperação emergencial aplicado aos dois transformadores analisados. Os resultados são organizados em três perspectivas complementares: (i) o ganho efetivo de resistência de isolamento observado após o processo de secagem e testes dielétricos; (ii) a variabilidade pós-recuperação estimada por meio de simulação de Monte Carlo, destacando a importância de considerar dispersões realistas em torno dos valores medidos; e (iii) aspectos operacionais e econômicos que influenciam a viabilidade da recuperação em cenários de enchente. Cada uma dessas dimensões é detalhada nas subseções a seguir.

4.1 Ganho de resistência de isolamento

Os resultados de resistência de isolamento indicam que o processo de recuperação foi efetivo em restituir condições dielétricas compatíveis com a energização dos transformadores analisados. No T1, por exemplo, a resistência AT–massa passou de 6.800 M Ω para 300.000 M Ω , representando um aumento superior a uma ordem de grandeza em relação ao valor inicial. A resistência BT–massa passou de 28 M Ω para 28.000 M Ω , indicando um ganho de aproximadamente três ordens de grandeza.

O T2 apresentou comportamento qualitativamente semelhante, embora partindo de uma condição inicial mais crítica. No caminho BT–massa, a resistência inicial foi praticamente nula, evidenciando isolamento severamente comprometido após a inundação. Após a recuperação, esse valor subiu para 2.500 M Ω . Embora inferior ao observado no T1, esse nível já se encontra em faixa compatível com operação segura, desde que acompanhado de monitoramento periódico.

De forma geral, os resultados sugerem que a recuperação emergencial pode, em muitos casos, restituir níveis de isolamento adequados em transformadores a seco submetidos à inundação, reduzindo a necessidade de substituição imediata e mitigando os prazos longos associados à aquisição de novos equipamentos.

4.2 Variabilidade pós-recuperação

A simulação de Monte Carlo baseada no valor pós-recuperação do T1 indica que a maior parte das amostras de resistência se concentra em torno do valor de referência, mas há uma cauda inferior que representa cenários menos favoráveis. Em termos qualitativos, isso significa que, mesmo após um processo de recuperação bem-sucedido, existe a possibilidade de que alguns equipamentos apresentem valores de isolamento menores do que o desejado.



(a) Estado do transformador antes do processo de recuperação.



(b) Transformador após secagem e condicionamento.

Figure 1: Comparação visual do transformador antes e depois do processo de recuperação emergencial.

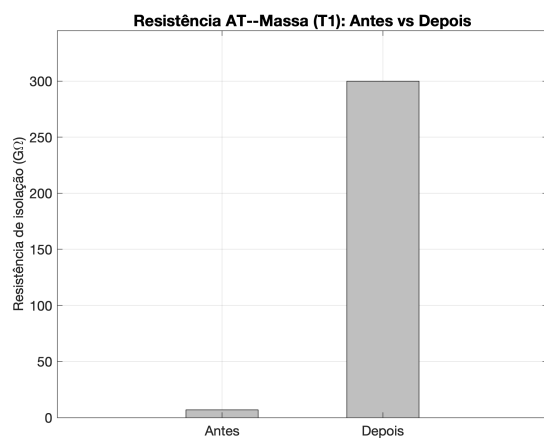


Figure 2: Resistência AT–massa do T1 antes e depois do processo de recuperação.

A representação conceitual de “tempo até falha”, obtida de forma inversamente proporcional à resistência simulada, reforça a ideia de que resistências mais baixas podem estar associadas a vidas úteis mais curtas. Embora esse modelo seja bastante simplificado, ele destaca a importância de combinar a recuperação emergencial com um plano de monitoramento posterior, por exemplo, por meio de medições periódicas de resistência de isolamento e, quando aplicável, de ensaios complementares recomendados por normas de avaliação de condição.

4.3 Aspectos operacionais e econômicos

Do ponto de vista operacional, relatos de empresa especializada em recuperação de transformadores indicam que o custo médio para recuperar um transformador a seco inundado, desde que o equipamento tenha sido desligado preventivamente antes da chegada da água, é da ordem de 10% do valor de um equipamento novo de porte equivalente. Para unidades típicas de 500 kVA, esse valor corresponde a aproximadamente um décimo do preço de reposição, que pode alcançar R\$ 100.000,00, com prazos de entrega frequentemente superiores a 30 dias.

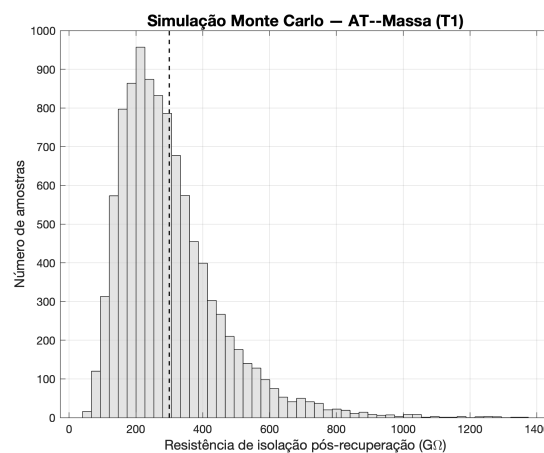


Figure 3: Histograma da resistência simulada via Monte Carlo (AT–massa, T1).

Além disso, há custos adicionais associados ao transporte, aluguel de transformador provisório e reinstalação, que podem somar cerca de R\$ 10.000,00 em um caso típico. Segundo dados [21] em uma amostra de aproximadamente 100 transformadores recuperados em condições semelhantes, foi relatado apenas um caso de falha posterior, associado a um equipamento que não havia sido desligado preventivamente antes da enchente. Embora esses números não permitam conclusões estatisticamente robustas, eles sugerem que a recuperação emergencial pode ser uma alternativa atraente em cenários de crise, tanto pelo custo quanto pela redução do tempo de indisponibilidade.

5 Conclusões

Este artigo apresentou uma análise preliminar sobre a recuperação emergencial de dois transformadores a seco inundados durante as enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul. As medições de resistência de isolamento evidenciaram aumentos significativos após o processo de secagem térmica e testes dielétricos, com ganhos variando de aproximadamente uma a três ordens de grandeza. Esses valores permitiram restabelecer condições mínimas de operação no curto

prazo (em torno de 14 dias), reforçando a viabilidade e a importância da recuperação emergencial em situações de crise, especialmente quando há restrições severas de tempo e de disponibilidade de novos equipamentos.

A simulação de Monte Carlo, utilizada de forma qualitativa e exploratória, ajudou a visualizar a variabilidade esperada em torno dos valores pós-recuperação do T1, destacando que mesmo após uma recuperação bem-sucedida permanece a possibilidade de comportamentos menos favoráveis em termos de isolamento. Essa visualização reforça a importância de complementar procedimentos emergenciais com estratégias de monitoramento contínuo, como medições periódicas de resistência de isolamento.

Além disso, no contexto da modelagem, cabe destacar que sua aplicação inicial concentrou-se no Transformador 1 (T1) devido à maior consistência dos dados pós-recuperação disponíveis. No entanto, o Transformador 2 (T2) apresentou uma condição inicial significativamente mais crítica, o que torna sua inclusão particularmente relevante em investigações futuras. A aplicação do mesmo procedimento de Monte Carlo ao T2, em versões futuras deste estudo, permitirá comparar a variabilidade pós-recuperação entre equipamentos submetidos a diferentes níveis de degradação inicial, aprimorando a compreensão dos efeitos da saturação de umidade na dispersão dos parâmetros dielétricos.

Sob a perspectiva operacional e econômica, as evidências reunidas sugerem que a recuperação emergencial pode ser, em muitos casos, uma alternativa vantajosa em comparação à substituição imediata, reduzindo custos diretos e indiretos e mitigando períodos de indisponibilidade.

Embora os dados avaliados sejam ainda limitados e se restrinjam a dois transformadores analisados em detalhe, o desempenho observado em uma amostra ampliada de equipamentos recuperados, aliado à experiência de campo relatada, reforça o potencial dessa abordagem em cenários de eventos extremos.

Este estudo apresenta, contudo, limitações importantes. Além do número reduzido de equipamentos avaliados, não foram consideradas medições repetidas ao longo do tempo para caracterizar a evolução da resistência pós-recuperação, e o modelo estocástico adotado não foi calibrado com séries históricas de falhas ou degradação dielétrica. Por essas razões, os resultados devem ser interpretados como indicativos, servindo principalmente como apoio a discussões qualitativas de risco e resiliência.

Como desdobramento natural deste estudo, perspectivas futuras incluem a ampliação da base de dados com novos casos de transformadores afetados por enchentes, a coleta de séries temporais de resistência pós-recuperação, a integração de modelos avançados de confiabilidade e envelhecimento dielétrico e a realização de análises comparativas entre redes aéreas, subterrâneas e híbridas em cenários de eventos extremos, com atenção especial às métricas de resiliência alinhadas ao ODS 11. Esses avanços podem ampliar a compreensão dos mecanismos de degradação pós-evento e apoiar o desenvolvimento de estratégias mais robustas de gestão da infraestrutura elétrica urbana.

A Script MATLAB Utilizado

O Código 1 apresenta o script MATLAB completo utilizado para gerar as Figs. 2 e 3. O código inclui comentários técnicos que documentam as hipóteses adotadas e os parâmetros utilizados.

```

%% =====
% Gráficos para o Transformador 1 (T1)
% Estudo: Resistência de Isolamento AT-Massa antes e após recuperação
%
% Observações científicas (importante para documentação):
% - A resistência de isolamento considerada positiva.
%   Em engenharia elétrica, valores pós-recuperação podem variar
%   significativamente devido a microimperfeições remanescentes,
%   imperfeições mecânicas e variações trmicas.
%
% - A distribuição lognormal amplamente utilizada para modelar
%   grandezas dielétricas, pois admite assimetria e caudas longas.
%
% - O coeficiente de variação (CV = 50%) assumido de forma
%   conservadora e tem caráter ilustrativo/exploratório no
%   derivado estatisticamente devido ausência de séries
%   temporais de medidas repetidas.
%
% - A simulação Monte Carlo, neste contexto, não visa prever
%   vida útil nem probabilidade real de falha, mas sim explorar a
%   sensibilidade da resistência pós-recuperação sob variabilidade
%   plausível. Modelos físicos mais completos podem ser usados
%   como trabalhos futuros.
%
% =====
clear; close all; clc;
rng(1); % Semente fixa para reprodutibilidade das simulações

%% -----
% 1) Dados determinísticos do Transformador 1 (T1)
% -----

% Valores reais medidos durante o ensaio de recuperação (em M)
R_before_M = 6800; % Antes da recuperação
R_after_M = 300000; % Depois da recuperação

% Conversão para G para melhor legibilidade gráfica
R_before_G = R_before_M / 1000;
R_after_G = R_after_M / 1000;

%% -----
% 2) Gráfico 1: Antes vs Depois (monocromático)
% -----

figure('Name','T1_AntesDepois','Color','w');
bar([R_before_G, R_after_G], ...
    'FaceColor',[0.75 0.75 0.75], ... % Cinza técnico
    'EdgeColor','k', ...
    'BarWidth',0.45);

set(gca, 'XTick',1:2, ...
    'XTickLabel',{'Antes','Depois'}, ...
    'FontSize',12);

ylabel('Resistência de isolamento (G\Omega)', 'FontSize',12);
title('Resistência AT-Massa (T1): Antes vs Depois', 'FontSize',14);

ylim([0, R_after_G*1.15]);
grid on;
box on;

print(gcf, 'fig_T1_antes_depois.png', '-dpng', '-r300');

%% -----
% 3) Modelo de Monte Carlo resistência pós-recuperação
% -----
%
% Justificativa do modelo:

```

```

% - A resistncia ps-secagem no esttica e pode variar.
% - A mdia o valor medido.
% - A variabilidade hipottica (CV=50%), refletindo incerteza.
% - A lognormal apropriada para grandezas dieltricas positivas.
%
% Parmetros do modelo:
mean_R_G = R_after_G; % Mdia (valor medido)
CV = 0.5; % Coeficiente de variaio assumido
N = 10000; % Nmero de amostras simuladas

% Converso para parmetros da lognormal:
% Se X ~ Lognormal(mu, sigma)
% ento:
% mean = exp(mu + sigma^2/2)
% CV^2 = exp(sigma^2) - 1
sigma = sqrt(log(1 + CV^2));
mu = log(mean_R_G) - (sigma^2)/2;

% Gerao das amostras simuladas (em G)
samples_R_G = lognrnd(mu, sigma, [N,1]);

%% -----
% 4) Grfico 2: Histograma Monte Carlo (monocromtico)
% -----

figure('Name','T1_Hist_MC','Color','w');

h = histogram(samples_R_G, 50);
h.FaceColor = [0.82 0.82 0.82];
h.EdgeColor = 'k';

xlabel('Resistncia de isolao ps-recuperao (G\Omega)',
'FontSize',12);
ylabel('Nmero de amostras', 'FontSize',12);
title('Simulao Monte Carlo AT--Massa (T1)', 'FontSize',14);

grid on;
box on;

% Linha vertical destacando a mdia simulada
hold on;
mean_sim = mean(samples_R_G);
yl = ylim;
plot([mean_sim mean_sim], yl, 'k--', 'LineWidth',1.1);
hold off;

print(gcf, 'fig_T1_MC_hist.png', '-dpng', '-r300');

```

Listing 1: Script MATLAB utilizado para gerar os gráficos do Transformador 1 (T1).

References

- [1] Maykon Oliveira. Estudo internacional projeta fenômenos climáticos extremos com maior frequência e intensidade no rs, 2024. URL <https://noticias.ufsc.br/2024/06/estudo-internacional-projeta-fenomenos-climaticos-extremos-com-maior-frequencia-e-intensidade-no-rs/>. Acesso em: 12 jul. 2024.
- [2] CEEE Equatorial. Ceee equatorial intensifica os trabalhos em áreas alagadas em porto alegre, 2024. URL https://ceee.equatorialenergia.com.br/ceee/noticias_/ceee-equatorial-intensifica-os-trabalhos-em-areas-alagadas-em-porto-alegre. Acesso em: 12 jul. 2024.
- [3] Enrico Zio. *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, London, 2013. doi: 10.1007/978-1-4471-4588-2.
- [4] Roy Billinton and Wenyan Li. *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Springer, 1994. doi: 10.1007/978-1-4899-1346-3.
- [5] Moises Santos, Gabriel Calvattis Santana, Mauricio de Campos, Mauricio Sperandio, and Paulo S. Sausen. Performance of controller designs in small-disturbance angle stability of power systems with parametric uncertainties. *IEEE Latin America Transactions*, 19(12):2054–2061, 2021. doi: 10.1109/TLA.2021.9480147.
- [6] Wei Huang, Qian Xu, Peng Wang, Yang Li, and Lei Liu. Power system reliability evaluation based on sequential monte carlo simulation considering multiple failure modes of components. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 13(1):202–214, 2025. doi: 10.35833/MPCE.2023.000939.
- [7] Ahmed EB Abu-Elanien and M. M. A. Salama. A monte carlo approach for calculating the thermal lifetime of transformer insulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1):50–54, 2012. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.054.
- [8] Michael Novak, Steffen Bernet, and Jan Vobecky. Monte carlo-based reliability estimation methods for power devices in power electronics systems. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2:456–468, 2021. doi: 10.1109/OJPEL.2021.3116070.
- [9] Moises Machado, Mauricio de Campos, Paulo Sausen, and Mauricio Sperandio. Desenvolvimento de modelos de planejamento da expansão de sistemas elétricos para integração de geração fotovoltaica e veículos elétricos. *Revista Brasileira de Energia*, 28(4), 2022. doi: 10.47168/rbe.v28i4.761. URL <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/761>.
- [10] R. D. Medina, J. L. Guardado, E. Melgoza, J. Gomez, and P. Moreno. Assessing degradation of power transformer solid insulation considering thermal stress and moisture variation. *Electric Power Systems Research*, 148:87–95, 2017. doi: 10.1016/j.epr.2017.04.006.
- [11] G. Kaliappan and M. Rengaraj. Aging assessment of transformer solid insulation: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46:1866–1871, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.301.
- [12] Jialu Cheng, Diego Robalino, Peter Werelius, and Matz Ohlen. Advanced technique for moisture condition assessment in power transformers. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 4(3):185–191, 2014. doi: 10.5370/JICEE.2014.4.3.185.
- [13] Mathaios Panteli, Cassie Pickering, Sean Wilkinson, Richard Dawson, and Pierluigi Mancarella. Power system resilience to extreme weather: Fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5):3747–3757, 2017. doi: 10.1109/TPWRS.2016.2641463.
- [14] Qingxin Shi, Wenxia Liu, Bo Zeng, Hongxun Hui, and Fangxing Li. Enhancing distribution system resilience against extreme weather events: Concept review, algorithm summary, and future vision. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 138:107860, 2022. ISSN 0142-0615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107860>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521010759>.
- [15] S. Paul, S. Sarkar, and S. Ghosh. Resilience assessment and planning in power distribution systems: Past and future considerations, 2023. arXiv preprint arXiv:2308.07552.
- [16] L. W. Pierce. Hottest spot temperatures in ventilated dry-type transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1):257–264, 1994. doi: 10.1109/61.277697.
- [17] Marco Antonio Ferreira Finocchio, José Joelmir Lopes, José Alexandre de França, Juliani Chico Piai, and José Fernando Mangili Jr. Neural networks applied to the design of dry-type transformers: An example to analyze the winding temperature and elevate the thermal quality. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27(3):e2257, 2017. doi: 10.1002/etep.2257.
- [18] Rafaela Filomena Alves Guimarães. Proposta de diagnóstico para uso, instalação e descarte de transformadores de distribuição recuperados. Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, Brazil, 2010. URL <http://hdl.handle.net/11449/87105>. Dissertação de Mestrado.
- [19] IEEE Power & Energy Society. Power transformer condition assessment: Best practices and guidelines. Technical Report, 2018.
- [20] *Manual de Transformadores Secos*. WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2010. URL <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h48/h03/WEG-manual-de-transformadores-secos-10000647758-09.10-manual-portugues-br.pdf>. Manual 10000647758, Rev. 03.
- [21] Tecnotrafo transformadores – página inicial. URL <https://www.tecnotrafonh.com.br/>.