

ANÁLISE DE OCORRÊNCIA DE FALHA DE ISOLAÇÃO EM UM TURBOGERADOR NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA – ESTUDO DE CASO

Gabriel da Silva Peixoto

Hally Júlia da Silva

Antônia Ferreira dos Santos Cruz

RESUMO

A falha de isolamento em turbogeradores representa um desafio crítico na operação de sistemas elétricos. Identificar e corrigir prontamente esta ocorrência é essencial para manter a integridade operacional e garantir a confiabilidade da máquina. Este artigo propõe um estudo de caso sobre uma falha de isolamento em um turbogerador na indústria petroquímica. A pesquisa concentra-se na investigação das causas subjacentes dessa falha por meio de testes específicos, cujos resultados, somados à avaliação do sistema, proporcionam uma análise técnica abrangente sobre o tema. O estudo contribuiu para o conhecimento dos ensaios necessários para abordar falhas de isolamento em turbogeradores, além das nuances envolvidas em cada etapa do processo e na interpretação dos dados. Conforme as considerações obtidas, o rotor da máquina elétrica passou por uma manutenção preditiva para seu reestabelecimento operacional e foram levantados possíveis pontos de melhoria para o sistema.

Palavras-chave: Turbogenerador; Falha em rotor; Testes elétricos; Estabilidade do sistema; Manutenção preventiva.

1. INTRODUÇÃO

O turbogerador desempenha um papel vital no sistema elétrico industrial, garantindo o suprimento contínuo e confiável de energia (OBADOWSKI, et al; 2019). Na indústria petroquímica, onde a demanda por eletricidade é especialmente alta devido à complexidade das operações, a integridade e o desempenho dos turbogeradores são de importância estratégica. Uma pesquisa conduzida pelo Portal da Indústria em 2016, constatou que 70% das organizações industriais cujas operações dependem de energia enfrentaram consideráveis perdas financeiras devido a recorrentes desafios na distribuição de eletricidade, destas, 52% adotaram o uso do gerador como garantia de estabilidade para o sistema.

No entanto, a ocorrência de falhas de isolamento em turbogeradores representa um desafio significativo para a segurança operacional e a continuidade da produção (GILL, 2008). De acordo com estudos levantados pelo Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica em 2008, ao longo de 10 anos foram analisadas 69 falhas em um total de 1200 geradores inspecionados. Dentre essas falhas, 56% foram conferidos por danos na isolamento.

A duração da vida útil da isolamento depende da disposição dos componentes individuais, de suas interações entre si e do processo utilizado na fabricação e utilização do equipamento, pois perturbações, seja de natureza térmica, elétrica, mecânica ou química têm a capacidade de gerar pontos fracos na isolamento, enfraquecendo-o progressivamente (GILL, 2008). Esse processo de degradação pode levar a falhas críticas, uma vez que possibilita a formação de caminhos de menor resistência no sistema. Isso, por sua vez, pode resultar em situações de curto-circuito, riscos de incêndio e a indisponibilidade do gerador, acarretando prejuízos financeiros substanciais (SCHLABBACH, 2005).

Esta pesquisa tem como objetivo central a análise detalhada da ocorrência de falha de isolamento no rotor de turbogerador do polo petroquímico. A relevância deste estudo reside na necessidade de compreender as causas subjacentes, os mecanismos de detecção e os impactos dessas falha em uma máquina que opera no contexto industrial real. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para a compreensão de ocorrência de falha de isolamento em um turbogerador na indústria petroquímica, além de oferecer subsídios valiosos para o desenvolvimento de estratégias proativas de manutenção, proporcionando a redução de paradas não programadas e facilitando a tomada de decisão por parte das equipes de manutenção em emergências.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Princípio de funcionamento

A função do gerador elétrico é essencialmente de converter energia cinética em energia elétrica. Esse processo envolve a interação entre um rotor, uma máquina primária e estator do gerador. É importante enfatizar que a máquina primária é uma fonte de energia mecânica, como um motor a combustão interna ou uma turbina a gás, ou a vapor, utilizadas em turbogeradores (CARVALHO, 2014).

No início da operação, um campo magnético é gerado no estator do gerador devido a aplicação de uma corrente elétrica aos ímãs ou eletroímãs. Quando a máquina primária fornece torque para o rotor posicionado dentro do campo magnético, este começa a girar. O movimento promove uma variação no fluxo magnético ao longo do tempo, proporcionando a indução de uma tensão elétrica (força eletromotriz) no estator do gerador, que será direcionada para alimentar a carga conectada (CHAPMAN, 2013).

2.2 Aspectos construtivos do gerador síncrono

A máquina síncrona é caracterizada pela operação em sincronia com a frequência da rede elétrica, ou seja, sua velocidade é diretamente proporcional à frequência, logo seu escorregamento é igual a 1. Esta construção é frequentemente empregada como gerador em usinas elétricas devido à sua capacidade de fornecer uma saída de frequência e tensão constantes, essenciais para garantir a qualidade da energia elétrica gerada (CHAPMAN, 2013). A estrutura da máquina elétrica é composta por dois elementos principais: o estator, que permanece fixo, e o rotor, que gira em torno do seu próprio eixo. Nas máquinas síncronas, encontramos dois principais tipos de rotor: o de polos salientes e o de polos lisos. Identifica-se o rotor de polos salientes (Figura 1) por seus polos que se sobressaem a partir do eixo. Por outro lado, o de polos lisos (Figura 2) é projetado de modo que seus enrolamentos estejam nivelados com a superfície do próprio rotor. A escolha entre esses dois tipos de dependerá da aplicação específica requerida (FITZGERALD, A. E. et al, 2014). O rotor de polos lisos é geralmente empregado quando se necessita de um reduzido número de polos, como, por exemplo, dois ou quatro polos, dado que sua velocidade (Eq. 1) é inversamente proporcional à velocidade do rotor.

$$N_s = \frac{120F}{P} \quad (\text{Eq. 1})$$

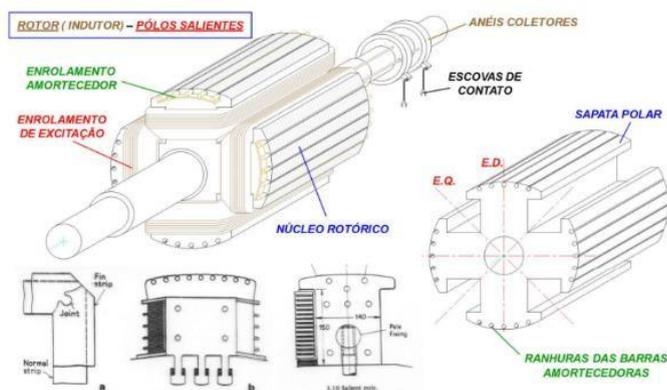
Onde:

N_s = velocidade síncrona da máquina dada, em rpm;

F = frequência elétrica, em Hz;

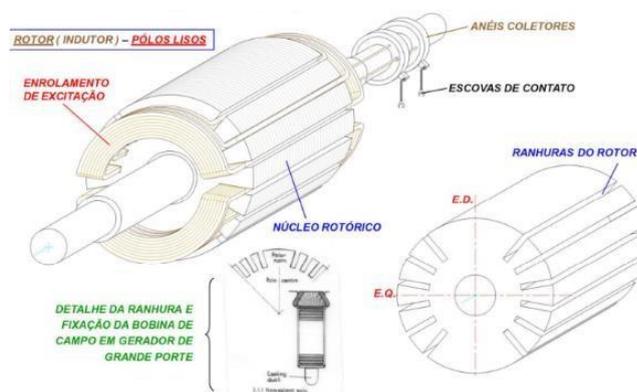
P = número de polos;

Figura 1 – Aspectos Construtivos do rotor de polos salientes



Fonte: USP, 2016.

Figura 2 – Aspectos Construtivos do rotor de polos lisos



Fonte: USP, 2016.

O rotor de polos lisos é composto por um enrolamento de excitação, gerador do campo magnético no rotor, e um núcleo retentor que fornece suporte estrutural e otimiza o fluxo magnético. Estrategicamente integradas, as ranhuras garantem uma distribuição uniforme do campo magnético. As escovas de contato e anéis coletores desempenham um papel crucial na transferência de corrente, assegurando uma geração de energia robusta (KOSOW, 2004).

No caso do rotor de polos salientes, este incorpora um enrolamento amortecedor, essencial para controlar oscilações mecânicas e manter a estabilidade operacional. As funções semelhantes desempenhadas por anéis coletores e escovas de contato na eficiente transferência de corrente são destacadas, enquanto o núcleo retentor, com ranhuras, otimiza o fluxo magnético. Barras amortecedoras e sapatas polares são elementos-chave que influenciam a resposta dinâmica, proporcionando um desempenho equilibrado e confiável em diversas aplicações industriais (Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umans, 2003).

A isolação do rotor consiste em dois componentes essenciais: a isolação entre o enrolamento do polo e o corpo do polo, e a isolação entre as espiras, visando garantir isolação individual para cada polo no enrolamento.

Tanto em geradores de pequeno, quanto de grande porte, a prática comum para a isolação do polo é a utilização de laminados de vidro isolante (FITZGERALD, KINGSLEY JR.; UMANS, 2002).

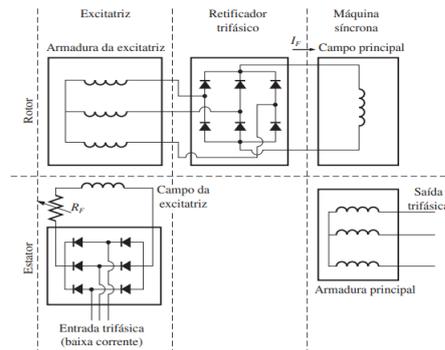
No contexto da isolação de espiras, em geradores menores, é comum empregar esmalte e fibra de vidro, enquanto geradores maiores optam por separadores de material isolante entre as tiras de cobre, ou fita isolante (Chapman, 2004). Falhas na isolação do polo, ou da espira, podem culminar em curtos-circuitos (Kosow, 1992). Essas falhas podem resultar na operação contínua com espiras em curto, levando a um aumento da vibração devido a um campo magnético assimétrico.

As bobinas, formadas por espiras de fios condutores enrolados em torno do núcleo, produzem energia por meio do princípio da indução eletromagnética, conforme descrito pela Lei de Faraday (HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2013). Quando um fluxo magnético variante atravessa as espiras, ocorre a indução de uma corrente elétrica em seu enrolamento. Este processo é otimizado em geradores, nos quais a bobina, fixada ao rotor, está em movimento relativo ao campo magnético estável produzido por ímãs ou eletroímãs. A corrente gerada na bobina é coletada e pode ser conduzida para fornecer eletricidade útil.

É importante salientar que o número de espiras nas bobinas e a forma como são enroladas influenciam diretamente a tensão, a corrente e a frequência da eletricidade gerada (FITZGERALD, KINGSLEY & UMANS, 2002). Contudo, a fim de assegurar a magnetização apropriada do rotor da máquina síncrona, existem duas abordagens para fornecer a corrente contínua necessária, o emprego de anéis coletores, ou o uso de uma excitatriz (FITZGERALD, A. E. et al, 2014).

No entanto, em máquinas de grande porte, é prática comum empregar uma excitatriz sem escovas (Figura 3). Esta excitatriz desempenha a função de um gerador de corrente alternada, cuja armadura e enrolamentos de campo estão ligados, respectivamente, ao rotor e estator da máquina principal (CHAPMAN, Stephen J. 2013). É relevante enfatizar que o principal propósito deste componente consiste em assegurar a geração de um campo magnético com capacidade de induzir uma corrente elétrica no rotor principal.

Figura 3 – Modelo representativo da excitatriz sem escovas



Fonte: Fundamentos de Máquinas Elétricas – CHAPMAN, Stephen J.

3. FALHAS NO GERADOR SÍNCRONO E SUAS PROTEÇÕES

Devido à sua significativa importância no sistema de potência e a complexidade de suas operações, o gerador requer a implementação de um sistema de proteção altamente eficaz. As falhas que podem ocorrer nos geradores têm origens diversas, abrangendo sobrecargas, curto-circuitos, variações na corrente e na tensão, bem como outras condições anormais às quais o sistema de proteção deve reagir rapidamente para interromper o funcionamento do gerador, ou isolar a área afetada, a fim de evitar problemas mais graves (FILHO; MAMEDE, 2011).

3.1.3 Falhas internas

Esse tipo de falta é o mais comum e sua gravidade se deve ao aumento abrupto da corrente que gera danos na isolação, nos enrolamentos e no núcleo do estator. A exemplo, podem ser citadas as faltas fase-fase, fase-terra e entre espiras, possuindo uma frequência de 23,5%, 65% e 11,5%, respectivamente (ROCHA, 2014). Segundo Hartmann (2013), numa falta fase-terra, o local da falha irá determinar a gravidade dos danos causados no gerador e variar o tipo de proteção exigida. Além disso, aterrar o neutro irá gerar uma alta impedância e assegurar à máquina o limite nos esforços mecânicos, as sobretensões transitórias, mas principalmente reduzir a corrente de falta a terra (CAMINHA, 1977).

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Propriedades do sistema

A planta petroquímica é responsável por suprir grande parte da demanda energética do complexo industrial local. A unidade termoelétrica (UTE) é responsável pela geração e distribuição de energia elétrica e produz vapor em níveis de tensão que variam de 42kgf/cm² e 15kgf/cm², mas também fornece para as unidades industriais do polo petroquímico energia elétrica de 69kV e 13,8kV.

Este trabalho busca analisar uma ocorrência de falha de isolamento em um turbogerador condensante de 45000kVA (Tabela 1), o qual é alimentado por um vapor de extração de 42 kgf/cm² a uma temperatura de 390°C, e possui vapor de exausto de 15 kgf/cm² a uma temperatura de 290°C.

Tabela 1 – Dados do turbogerador

Potência Aparente Nominal	45 MVA
Tensão Nominal	13.8kV
Corrente Nominal	1884 A
Frequência Nominal	60 Hz
Rotação Nominal	3600 RPM
Reatância Subtransitória Saturada de Eixo Direto (X''d)	0,110 pu
Reatância Transitória Saturada de Eixo Direto (X'd)	0,160 pu
Reatância Síncrona Saturada de Eixo Direto (Xd)	1,660 pu
Tipo de Excitação	Brushless
Constante de Capacidade Térmica [(I2 / In)2 . t]	10
Corrente de Sequência Negativa Máxima durante 10 s	1,00 pu
Corrente de Sequência Negativa Máxima Permanente	0,08 pu
Fator de Potência	0,8
Ligação	Estrela
Tensão de Excitação	62 V
Corrente de Excitação	13,5 A

Fonte: Autoria Própria

4.2 Ocorrência

Em 04 de maio de 2023, às 19h:44min (horário de Brasília), ocorreu um desligamento emergencial do turbogerador condensante pelo operador responsável devido a dois eventos

de falha envolvendo a máquina, o primeiro às 08h:57min relacionado a falha por motorização do turbogerador, e o segundo às 19h:44min por falha de isolamento no rotor principal, os quais foram gerados por contaminação de água na tubulação em um dos radiadores do lado acoplado (LA) do gerador.

Dentre as análises e testes realizados na máquina, foram abordados: Levantamento das informações no dia da falha; Medição do isolamento do rotor principal + rotor da excitatriz; ensaios na planta após a remoção do rotor principal; Inspeção visual geral; Remoção da capa do lado acoplado; Resistência de isolamento; Resistência ôhmica; *Surge test*; Queda de tensão VDC nas bobinas do rotor.

4.2.1 Sistema de Proteção do Gerador

O gerador estudado produz energia a uma tensão de 13.8 kV. Em seguida, o transformador eleva essa tensão para 69 kV. Prosseguindo, são encontrados a chave e o disjuntor. No contexto crítico do TRIP, o IED (Dispositivo Eletrônico Inteligente) desempenha o papel fundamental de necessário abrir o disjuntor para preservar a integridade do sistema elétrico. Para o conjunto transformador elevador e gerador, foram instalados três relés SIEMENS de proteção, sendo eles:

- **Relé 7UM6225 Siemens:** Responsável pela proteção do gerador.
- **Relé 7UT6125 Siemens:** Responsável pela proteção do transformador+gerador.
- **Relé 7SJ6415 Siemens:** Por se tratar de relé de grande capacidade de processamento algumas funções foram habilitadas e parametrizadas para rodar como retaguarda (backup) de algumas proteções dos relés 7UM6225 e 7UT6125.

4.3 Primeiro Evento

O primeiro evento, foi ocasionado pela falha na alimentação de óleo hidráulico do controlador de velocidade da turbina. O evento levou a um TRIP do gerador por motorização, assim como uma subvelocidade da máquina. A variação de tensão observada imediatamente após o TRIP do gerador ocorre devido à motorização dele. Após a interrupção da tensão na excitatriz, observa-se um pico de tensão. Este fenômeno se deve à inércia do gerador, que

continua a girar momentaneamente após a perda de excitação. Posteriormente, a tensão diminui à medida que o alternador desacelera.

4.4 Segundo Evento

Ainda no dia 04 de maio de 2023, às 19h:44min, o relé indicou falha de isolamento no rotor principal (relé 64R). Simultaneamente, foi observado um aumento significativo na vibração da turbina, passando de 50 μm para 100 μm . Diante dessa conjuntura, a máquina foi retirada de operação. Durante esse período de parada, o relé não registrou oscilografias. A alta vibração detectada durante o segundo evento de falha se deve ao desequilíbrio da corrente devido ao aumento abrupto da mesma pelo curto-circuito, no qual gerou um desalinhamento do rotor.

Em consonância com a norma ABNT NBR ISO 10816-3, que trata da avaliação de vibração em máquinas rotativas, o aumento substancial na vibração da turbina representa um indicativo crítico que justifica a decisão de parar a máquina, pois este fenômeno pode ser atribuído a desequilíbrios mecânicos, folgas excessivas ou até mesmo falhas estruturais. Esses desvios, quando não controlados, têm o potencial de acarretar danos severos nas partes móveis da turbina, resultando em uma condição prejudicial à integridade do equipamento. Além disso, a vibração excessiva pode desencadear ressonância estrutural, aumentando ainda mais o risco de falhas catastróficas (STONE, 2004).

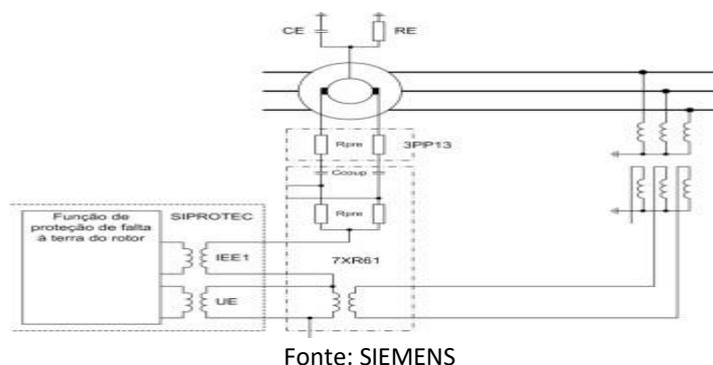
4.4 Relé 64R: Proteção e Filosofia Operacional

A Proteção de Falta à Terra do Rotor (ANSI 64R) atua diante de falhas relacionadas à resistência à terra no circuito de excitação (campo) de geradores síncronos (Figura 8). Como as bobinas de campo de um gerador operam sem aterramento, uma falta à terra no enrolamento do rotor não causa danos imediato, no entanto, se ocorrer uma segunda falta ela constitui um curto-circuito do enrolamento do circuito de excitação. Os desequilíbrios magnéticos resultantes podem ocasionar vibrações críticas que podem danificar os mancais (ROCHA; LIMA, 2014).

O sistema de proteção 64R no 7UM62 utiliza uma tensão auxiliar de frequência externa de 36 a 45 VCA. Essa tensão é simetricamente acoplada ao circuito de excitação e conectada à entrada do dispositivo de medição de tensão (UE).

Ao aplicar essa tensão auxiliar, é possível calcular a impedância à terra do rotor. Essa medição é usada para estimar a resistência de terra. Além disso, são considerados elementos como a capacitância de acoplamento da unidade de acoplamento (C_{coup}), a resistência em série (R_{pre}) incluindo a resistência das escovas e a capacitância à terra para o circuito de excitação. Se essa resistência calculada de falta à terra estiver fora de uma faixa normal predeterminada, é disparado um alarme.

Figura 8 – Conexão do relé 64R



Fonte: SIEMENS

4.5 Medição do isolamento do rotor principal e rotor da excitatriz

Após o segundo evento, foram feitos testes com o intuito de localizar o ponto de falha, especificamente no rotor principal, rotor da excitatriz, estator da excitatriz e o estator da PMG para averiguar a integridade da isolação.

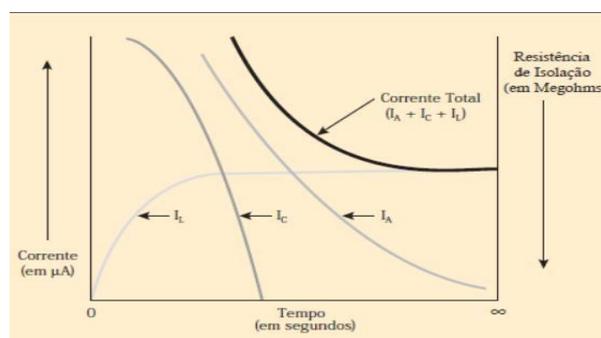
A isolação elétrica visa impedir que a corrente elétrica siga trajetos indesejados em um dispositivo elétrico. Um isolamento ideal possui resistência infinita quando exposto a um potencial elétrico apropriado. A corrente necessária para essa análise é produto de três subcorrentes: as correntes de carga capacitiva, absorção dielétrica e condutiva (Figura 9).

Os métodos predominantes de medição incluem a resistência de isolamento e a resistência de isolamento em função do tempo. Ambos envolvem a aplicação de uma tensão de teste adequada à classe de tensão da máquina em avaliação (tabela 2), sendo que a medição é realizada após 1 minuto para o primeiro método e de forma contínua por 10

minutos para o segundo método. No Brasil, a norma NBR 5383-1, intitulada "Máquinas Elétricas Girantes – Parte 1: Ensaios", fundamenta-se na IEEE Std.43 e estabelece o procedimento adequado para a medição da resistência de isolamento.

Vale salientar que, os valores medidos durante o teste devem ser convertidos para uma temperatura referência, essa sendo de 40°C.

Figura 9 – Correntes no isolante



Fonte: TIBURCIO, 2014.

Tabela 2 – Tensão de teste do Megômetro

Tensão Nominal da Máquina (V)	Tensão do Megômetro (V)
< 1000	500
1000 – 2500	500 - 1000
2501 – 5000	1000 - 2500
5001 – 12000	2500 - 5000
> 12000	5000 - 10000

Fonte: IEEE, 2006

É importante salientar que, caso o valor da resistência esteja abaixo de 5 MΩ, implica que os enrolamentos estão com isolamento comprometida.

O ensaio para determinar o índice de polarização diz respeito a aplicação de uma tensão nos enrolamentos, estando as fases em curto-circuito. Durante 10 minutos contínuos, é aplicada uma tensão e feita a leitura a cada minuto.

A partir da alimentação de 0,5 kV no gerador, foram realizados os seguintes testes (Tabela 3).

Tabela 3 – Resistência do Isolamento

		Resistência de		
1 min	Rotor da Excitatriz + Rotor Principal	0,00	-	-
1 min	Rotor Principal	0,00	-	-
1 min	Rotor da Excitatriz	0,140	-	-
1 min	Estatore da Excitatriz	15	-	-
1 min	Estatore da PMG	10	-	-

Fonte: Autoria Própria

Após realizado o teste no Rotor da Excitatriz + Rotor Principal, houve a separação da excitatriz com o rotor principal para uma análise individual e precisa da ocorrência. A partir da análise realizada pelos testes de resistência de isolamento, pode-se observar uma resistência zerada no rotor principal do turbogerador, indicando assim que a falta em questão está relacionada ao mesmo.

Diante da detecção de uma falha na isolação, tornou-se imperativo realizar a desmontagem do gerador, com isso foi identificada a presença de sujeira, o que representa uma ameaça a isolação do rotor do gerador. A infiltração de partículas contaminantes é responsável por reduzir a resistência elétrica do isolamento. Os desgastes visíveis corroboram esse fenômeno, impactando adversamente nos resultados dos testes de resistência de isolamento (Tabela 3). Essa condição sublinha a necessidade imediata de intervenção para preservar a eficiência operacional do gerador, mas também evitar grandes perdas de produção decorrente da falha no equipamento.

4.6 ENSAIOS NA FÁBRICA APÓS A REMOÇÃO DO ROTOR PRINCIPAL

4.6.1 Rotor Principal

Os testes consecutivos foram com base no direcionamento estabelecido nos primeiros ensaios. Mediante isso, o enfoque do estudo se concentra nos testes conduzidos no rotor do turbogerador, não salientando as análises realizadas no estator da máquina.

4.6.1.1 Resistência de Isolamento

Nesse método, utiliza-se um megômetro para aplicar 0,5 kV entre os enrolamentos do gerador e sua carcaça, medindo a resistência de isolamento em megaohms (MΩ). Os resultados indicam a condição da isolação. Através deste ensaio foi confirmada a situação crítica de falha de isolamento, já que a resistência medida foi novamente nula.

4.6.1.2 Queda de Tensão DC

O teste de queda de tensão do gerador (tabela 4) tem como objetivo avaliar a eficiência da distribuição de energia no sistema através da análise da variação de tensão durante a transmissão de corrente elétrica. Estabelecida uma medição de referência, registra-se as leituras de tensão e corrente sem carga para criar uma base de comparação.

Para minimizar a variação de tensão durante a transmissão, incorpora-se um indutor, que regula a taxa de variação de corrente, reduzindo a queda de tensão ao longo do circuito. Ao aplicar uma tensão de corrente contínua nos enrolamentos do rotor, a corrente elétrica flui, naturalmente causando uma queda de tensão devido à resistência dos materiais.

Ao analisarmos a variação da queda de tensão entre a bobina 1 e a bobina 2, constatamos que é de apenas 0,5%. Este pequeno desvio é um indicativo preciso da consistência entre as bobinas, sugerindo que estão em condições adequadas de funcionamento.

Tabela 4 – Queda de Tensão DC

Tensão de Ensaio (V)	Frequência (Hz)	Corrente Medida (A)	Erro (%)	Condição
39,8	DC	200,4	0,50	Aprovado
Queda de Tensão com Auxílio do Indutor (V)				
Bobina 01	20,0			
Bobina 02	19,9			

Fonte: Acervo pessoal.

4.6.1.3 Termovisão com corrente DC entre Polo + / Eixo (massa):

O teste de termo visão visa detectar possíveis irregularidades na dissipação de calor, prevenindo danos aos componentes do gerador, uma vez que quando os dispositivos elétricos operam em temperaturas elevadas, há um aumento nas taxas de desgaste e degradação dos materiais. Isso pode resultar na redução da vida útil dos componentes, afetando sua integridade estrutural e elétrica.

O rotor principal do TG-5301E apresentou falha para massa embaixo da capa lado acoplado, mesmo local da contaminação com água. Os dados do ensaio estão dispostos da tabela 5.

Tabela 5 – Termo visão com corrente DC entre Polo + / Eixo (Massa)

Tensão de Ensaio (V)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	Erro (%)	Condição
39,8	DC	200,4	NA	Reprovado

Fonte: Acervo pessoal.

4.7 Ensaio Realizados Na Oficina Externa

Diante do resultado preliminar apresentado no polo petroquímico, fez-se necessário deslocar o rotor para a oficina para que fossem realizados novos testes com a estrutura necessária, e posterior manutenção.

4.8 Ensaio Elétricos Iniciais

A estabilidade das condições ambientais durante os testes elétricos é essencial para garantir a consistência dos resultados e a replicabilidade dos experimentos. Sendo assim, esses parâmetros foram controlados dentro de uma faixa específica e controlada (Temperatura 23°C e umidade relativa do ar em 68%).

4.8.1 Resistência de isolamento

O teste de resistência de isolamento foi feito e apresentou o mesmo resultado obtido na fábrica.

4.8.2 Inspeção visual

A partir da análise feita com base nos testes de resistência de isolamento (Tabela 3), e de termovisão (Figura 11), foi feita a retirada da capa rotórica para realização da inspeção visual, com o objetivo de identificar sinais visíveis de desgaste, danos mecânicos, ou qualquer indicativo de problemas em potencial. Dito isso, a análise determinou um curto-circuito na região da cabeça de bobinas, especificamente no lado não acoplado do gerador. Esta corrente de fuga não foi suficiente para provocar um desbalanceamento do rotor, mas é suficiente para danificar o material isolante carbonizando a região.

4.8.3 Resistência de isolamento após a remoção da capa rotórica

Após a remoção da capa rotórica, verificou-se a existência de curto-circuito nas espiras do rotor, cujos isolantes estavam completamente carbonizados. O teste de resistência de isolamento sem a capa rotórica e remoção do enrolamento amortecedor (Figura 11) apresentou resultado satisfatório (34 M Ω). Confirmando a ocorrência de um curto entre as bobinas e o enrolamento amortecedor, já que este é eletricamente conectado ao eixo do rotor, que por sua vez é apoiado nos mancais que são aterrados por um dos lados.

4.8.4 Teste RSO

O teste RSO consiste na aplicação de uma corrente com alta frequência nos enrolamentos do rotor com o intuito de localizar a falha. Devido a impedância simétrica do turbogerador, a presença de um curto-circuito irá resultar na assimetria dessa onda.

O teste RSO do turbogerador foi feito após a remoção da capa rotórica e aprovado por apresentar simetria, confirmando que a existência do defeito na isolação era proveniente da capa rotória.

4.8.5 Surge Test Inicial

O teste de surto elétrico, ou surge test, é uma avaliação da capacidade de um sistema elétrico em lidar com picos de tensão repentinos, conhecidos como surtos elétricos. O rotor foi aprovado no teste, houve uma resposta eficiente e rápida à variação de tensão, indicando que o componente foi capaz de absorver e dissipar o surto elétrico de maneira adequada.

5 CONCLUSÃO

A investigação detalhada da ocorrência de falha de isolamento em um turbogerador do polo demonstra a relevância crítica da integridade desses sistemas para a estabilidade do fornecimento elétrico em ambientes industriais complexos. Os resultados dos testes e a análise

do sistema destacam a necessidade urgente de medidas preventivas, incluindo a instalação de equipamentos para detecção precoce de falhas e ações corretivas.

Apesar da manutenção realizada no turbogerador, foram feitas recomendações no que diz respeito ao monitoramento com o intuito de aprimorar a identificação de faltas futuras. A máquina retornou para o estado de operação após a limpeza do estator principal, a remoção da contaminação e a restauração dos componentes do rotor, reestabelecendo a isolamento adequada para o funcionamento do turbogerador.

Diante disso, optou-se por aumentar a frequência das inspeções operacionais no trocador de calor. Além disso, foi feita a substituição das vedações no rotor e a aplicação de um selante de alta temperatura na carenagem, visando prevenir potenciais falhas futuras na linha de dreno, especialmente em relação à contaminação por água.

Os principais desafios enfrentados durante este trabalho centram-se na complexidade intrínseca do sistema estudado. A união de teoria e prática, desde os princípios de funcionamento até os ensaios elétricos, demandou uma abordagem integral do tema. A superação desses obstáculos não apenas enriqueceu o conhecimento sobre os geradores síncronos, mas também contribuiu para a evolução do discernimento dos desafios práticos inerentes a percepção de um ambiente industrial real.

Portanto, o estudo de caso ofereceu a compreensão teórica para a implementação prática de estratégias de prevenção e manutenção de falhas em máquinas rotativas. Contudo, reitera-se a importância de replicar esta abordagem para outros modos de falha identificados em turbogeradores, com o intuito de fornecer uma sólida base técnica voltada a identificação eficiente de falhas.

5. REFERÊNCIAS

- CAMINHA, A. C. Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos. 1. ed. [S.l.]: São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1977.
- CHAPMAN, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. [S.l.]: AMGH Editora LTDA, 2013. v. 5.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 1. ed. [S.l.]:LTC, 2011.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, S. D. Máquinas elétricas. [S.l.]: Artmed Editora, . v. 6.
- GILL, P. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. 2 ed. [S.l.]: CRC Press, 2008.
- HARTMANN, W. Advanced Generator Ground Fault Protections. [S.l.], 2015.
- IEEE – Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery. Std 43. New York, 2006.
- KOSOW, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores. Porto Alegre: Editora Globo, 1982. v. 1.
- OBADOWSKI, V. N. ; BEZERRA, E. C. . Máquinas Elétricas I. 1. ed. Porto Alegre: Sagah, 2019. v. 1.
- ROCHA, G.; LIMA, P. Faltas entre fases e entre espiras. [S.l.], 2014.
- SCHLABBACH, J. Short-circuit Currents. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology. 2005
- STONE, G. C. et al. Electrical Insulation for rotating machines. 1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2004.
- TIBURCIO, A.K.S.O. Isolamento de Motores Elétricos. 2014. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Industrial Elétrica: Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.
- UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. [S.l.]: AMGH Editora LTDA, 2014. v. 7.