

Nº	DESCRIÇÃO	REVISOR(ES)	APROVAÇÃO	DATA

REVISÕES



EMISSÃO INICIAL		<div>CASA DE FORÇA</div> <div>ENGENHARIA ELÉTRICA</div> <div>TRANSFORMADORES PRINCIPAIS DAS UNIDADES GERADORAS</div> <div>ANÁLISE DE VIDA ÚTIL DOS TRANSFORMADORES PRINCIPAIS DAS UNIDADES GERADORAS</div>			
ÁREA RESPONSÁVEL					
SMIE.DT					
Divisão de Engenharia de Manutenção Elétrica					
DIRETORIA TÉCNICA					
PROJETO/AUTORIA					
BARBADO					
VERIFICAÇÃO					
APROVAÇÃO		RELATÓRIO TÉCNICO			
MGDM					
DATA	CONTROLE DO EMITENTE	FORMATO	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
26/09/2024	-	A4	-	1/11	R0

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	OBJETIVO	3
3	RELAÇÃO DOS TRANSFORMADORES E REPAROS ANTERIORES	3
4	AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ATRAVÉS DAS ANÁLISE DE ÓLEO ISOLANTE	5
5	ANÁLISE DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS DOS TRANSFORMADORES	8
6	CONCLUSÃO	11

1 INTRODUÇÃO

O presente Relatório Técnico descreve a análise realizada pela divisão SMIE.DT para informar o estado operacional dos Transformadores Principais das Unidades Geradoras em 2024. A análise será baseada nos dados históricos de manutenção dos equipamentos, assim como nos diagnósticos de ensaios em óleo isolante e histórico de carregamento operacional dos equipamentos.

2 OBJETIVO

Elaborar um estudo sobre a vida útil atual dos Transformadores Principais, fundamentando-se nas normas e brochuras técnicas vigentes e utilizando como suporte os dados históricos de manutenção, resultados de ensaios de óleo isolante, condições de carregamento operacional e temperaturas de operação.

3 RELAÇÃO DOS TRANSFORMADORES E REPAROS ANTERIORES

A Tabela 1 a seguir apresenta a relação de todos os Transformadores Principais em operação atualmente, assim como os reparos anteriores, a última entrada em operação e os anos em operação atual desde a última instalação em Unidade Geradora.

Tabela 1 – Relação dos Transformadores TU em operação.

Transformador	Fabricante	Número de série	Reparos anteriores	Última entrada em operação	Anos em operação desde a última instalação
TU-01 fase R	TUSA	500820	1988 e 2003	2004	20
TU-01 fase S	TUSA	500821	-	1984	40
TU-01 fase T	TUSA	500822	-	1984	40
TU-02 fase R	TUSA	500823	-	1984	40
TU-02 fase S	TUSA	500824	-	1984	40
TU-02 fase T	TUSA	500825	-	1984	40
TU-03 fase R	TUSA	500826	-	1985	39
TU-03 fase S	TUSA	500827	-	1985	39
TU-03 fase T	TUSA	500828	-	1985	39
TU-04 fase R	TUSA	500829	-	1985	39
TU-04 fase S	WEG	3020397	2011	2014	10
TU-04 fase T	TUSA	500831	-	1985	39
TU-05 fase R	TUSA	500832	-	1987	37
TU-05 fase S	TUSA	500833	-	1987	37
TU-05 fase T	TUSA	500834	-	1987	37
TU-06 fase R	TUSA	500835	-	1987	37
TU-06 fase S	TUSA	500836	-	1987	37
TU-06 fase T	TUSA	500830	-	1987	37
TU-07 fase R	TUSA	500847	-	2003	21
TU-07 fase S	TUSA	500839	-	1994	30
TU-07 fase T	TUSA	500840	-	1994	30
TU-08 fase R	TUSA	500841	-	1988	36

TU-08 fase S	TUSA	500842	-	1988	36
TU-08 fase T	TUSA	501857	2002	2002	22
TU-09 fase R	TUSA	500844	-	1988	36
TU-09 fase S	TUSA	500845	-	1988	36
TU-09 fase T	TUSA	500846	-	1988	36
TU-9A fase R	SIEMENS	4001113	-	2006	18
TU-9A fase S	SIEMENS	4001727	-	2006	18
Reserva 2 50Hz	TUSA	500838		2020	4
TU-10 fase A	BBC	SP-15106	-	1989	35
TU-10 fase B	BBC	SP-15105	1992 e 2007	2007	17
TU-10 fase C	BBC	SP-15104	-	1989	35
TU-11 fase A	BBC	SP-15103	1992	1992	32
TU-11 fase B	BBC	SP-15102	-	1989	35
TU-11 fase C	BBC	SP-15101	-	1989	35
TU-12 fase A	BBC	SP-15100	-	1989	35
TU-12 fase B	BBC	SP-15099	-	1989	35
TU-12 fase C	BBC	SP-15098	-	1989	35
TU-13 fase A	BBC	SP-15097	-	1988	36
TU-13 fase B	BBC	SP-15096	-	1988	36
TU-13 fase C	BBC	SP-15095	-	1988	36
TU-14 fase A	BBC	SP-15094	-	1986	38
TU-14 fase B	BBC	SP-15093	-	1986	38
TU-14 fase C	BBC	SP-15092	-	1986	38
TU-15 fase A	BBC	SP-15091	-	1986	38
TU-15 fase B	BBC	SP-15090	2005	2007	17
TU-15 fase C	BBC	SP-15089	-	1986	38
TU-16 fase A	BBC	59089	-	1990	34
TU-16 fase B	BBC	SP-15109	-	1990	34
TU-16 fase C	BBC	SP-15110	-	1990	34
TU-17 fase A	COEMSA	100296/2	-	1991	33
TU-17 fase B	COEMSA	100296/3	-	1991	33
TU-17 fase C	COEMSA	100296/4	1995	1999	25
TU-18 fase A	COEMSA	100296/5	-	1991	33
TU-18 fase B	WEG	2576726	-	2011	13
TU-18 fase C	COEMSA	100296/1	-	1991	33
TU-18A fase A	SIEMENS	4003464	-	2006	18
TU-18A fase B	SIEMENS	4003571	-	2006	18
Reserva 1 60Hz	BBC	SP-15108	-	2023	1

O gráfico da Figura 1 apresenta a distribuição dos tempos atuais de operação dos transformadores. É possível constatar que 73% (44 unidades) já se encontram com tempo de operação superior a 30 anos. A Tabela 2 apresenta a relação dos transformadores que encontram-se fora de operação, seja por estarem em condição de reserva ou por estarem em processo de reparo.

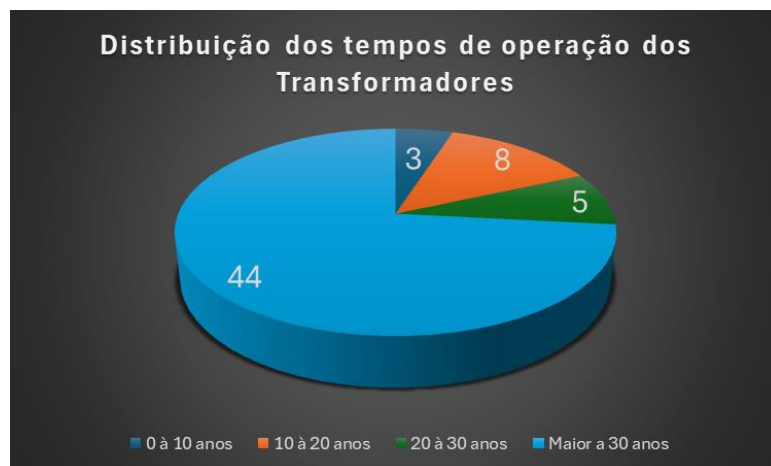


Figura 1 – Distribuição dos tempos de operação dos Transformadores após a última energização.

Tabela 2 – Relação dos Transformadores TU fora de operação.

Transformador	Fabricante	Número de série	Reparos anteriores	Condição atual
Reserva 1 50Hz	TUSA	500843	1999	Reserva
TU-9A fase T	SIEMENS	4002463	-	Em reparo
Reserva 3 50Hz	TUSA	500837	-	Reserva
TU-18A fase C	SIEMENS	4004139	-	Em reparo
Reserva 2 60Hz	BBC	SP-15107	-	Reserva
Reserva 3 60Hz	COEMSA	100296/6	-	Reserva

4 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ATRAVÉS DAS ANÁLISE DE ÓLEO ISOLANTE

A análise dos transformadores também é determinada através dos diagnósticos de ensaios em óleo isolante. Os principais ensaios envolvidos são:

- Ensaios físico-químicos** – Determinam a condição de conservação do óleo isolante com relação as suas propriedades físico-químicas, tais como cor, densidade, fator de dissipação, rigidez dielétrica, acidez e tensão interfacial. A interpretação destes ensaios é realizada através da norma técnica IEC 60422.
- Teor de água no óleo** – Impacta diretamente nas propriedades dielétricas do óleo isolante, além de poder afetar a condição do papel isolante do transformador. Sua interpretação é realizada através da norma técnica IEC 60422.
- Ensaios cromatográficos** – Relacionam possíveis falhas térmicas ou dielétricas existentes no interior do transformador. Como o óleo isolante é composto por hidrocarbonetos, essas falhas internas quebram as moléculas de óleo por pirólise, dependendo de sua intensidade, e geram subprodutos gasosos combustíveis, os quais são determinados e quantificados através deste ensaio. Atualmente existem diversas metodologias desenvolvidas para interpretação dos resultados. Para avaliar a condição operacional dos transformadores neste estudo, será adotada a metodologia proposta pela norma IEEE C57.104 (2019). Ela atribui 4 possíveis condições ao transformador, baseando-se na concentração total e na taxa de evolução dos gases combustíveis dissolvidos em óleo. São elas:

- Condição 1 – Operação normal do transformador.
- Condição 2 – Operação com cautela, analisando individualmente os gases gerados e a influência do carregamento.
- Condição 3 – Operação com cautela, acompanhamento com monitoramento contínuo dos gases dissolvidos.
- Condição 4 – Avisar o fabricante e planificar a substituição do transformador.

A Tabela 3 a seguir apresenta os diagnósticos dos últimos ensaios realizados em 2024 no óleo dos Transformadores Principais em operação.

Tabela 3 – Diagnósticos dos ensaios em óleo isolante dos Transformadores TU em operação.

Transformador	Fabricante	Número de série	Diagnósticos		
			Ensaio físico-químico	Teor de água no óleo	Ensaio cromatográfico
TU-01 fase R	TUSA	500820	Normal	Normal	Condição 1
TU-01 fase S	TUSA	500821	Normal	Normal	Condição 1
TU-01 fase T	TUSA	500822	Normal	Normal	Condição 1
TU-02 fase R	TUSA	500823	Normal	Normal	Condição 1
TU-02 fase S	TUSA	500824	Normal	Normal	Condição 1
TU-02 fase T	TUSA	500825	Normal	Normal	Condição 1
TU-03 fase R	TUSA	500826	Normal	Normal	Condição 1
TU-03 fase S	TUSA	500827	Normal	Normal	Condição 1
TU-03 fase T	TUSA	500828	Normal	Normal	Condição 1
TU-04 fase R	TUSA	500829	Normal	Normal	Condição 1
TU-04 fase S	WEG	3020397	Normal	Normal	Condição 2
TU-04 fase T	TUSA	500831	Normal	Normal	Condição 1
TU-05 fase R	TUSA	500832	Normal	Normal	Condição 1
TU-05 fase S	TUSA	500833	Normal	Normal	Condição 1
TU-05 fase T	TUSA	500834	Normal	Normal	Condição 1
TU-06 fase R	TUSA	500835	Normal	Normal	Condição 1
TU-06 fase S	TUSA	500836	Normal	Normal	Condição 1
TU-06 fase T	TUSA	500830	Normal	Normal	Condição 1
TU-07 fase R	TUSA	500847	Normal	Normal	Condição 1
TU-07 fase S	TUSA	500839	Normal	Normal	Condição 1
TU-07 fase T	TUSA	500840	Normal	Normal	Condição 1
TU-08 fase R	TUSA	500841	Normal	Normal	Condição 1
TU-08 fase S	TUSA	500842	Normal	Normal	Condição 1
TU-08 fase T	TUSA	501857	Normal	Normal	Condição 2
TU-09 fase R	TUSA	500844	Normal	Normal	Condição 1
TU-09 fase S	TUSA	500845	Normal	Normal	Condição 1
TU-09 fase T	TUSA	500846	Normal	Normal	Condição 1
TU-9A fase R	SIEMENS	4001113	Normal	Normal	Condição 2
TU-9A fase S	SIEMENS	4001727	Normal	Normal	Condição 2
Reserva 2 50Hz	TUSA	500838	Normal	Normal	Condição 1
TU-10 fase A	BBC	SP-15106	Normal	Normal	Condição 1
TU-10 fase B	BBC	SP-15105	Normal	Normal	Condição 1
TU-10 fase C	BBC	SP-15104	Normal	Normal	Condição 1

TU-11 fase A	BBC	SP-15103	Normal	Normal	Condição 1
TU-11 fase B	BBC	SP-15102	Normal	Normal	Condição 1
TU-11 fase C	BBC	SP-15101	Normal	Normal	Condição 3
TU-12 fase A	BBC	SP-15100	Normal	Normal	Condição 3
TU-12 fase B	BBC	SP-15099	Normal	Normal	Condição 1
TU-12 fase C	BBC	SP-15098	Normal	Normal	Condição 2
TU-13 fase A	BBC	SP-15097	Normal	Normal	Condição 1
TU-13 fase B	BBC	SP-15096	Normal	Normal	Condição 2
TU-13 fase C	BBC	SP-15095	Normal	Normal	Condição 1
TU-14 fase A	BBC	SP-15094	Normal	Normal	Condição 1
TU-14 fase B	BBC	SP-15093	Normal	Normal	Condição 1
TU-14 fase C	BBC	SP-15092	Normal	Normal	Condição 2
TU-15 fase A	BBC	SP-15091	Normal	Normal	Condição 2
TU-15 fase B	BBC	SP-15090	Normal	Normal	Condição 3
TU-15 fase C	BBC	SP-15089	Normal	Normal	Condição 2
TU-16 fase A	BBC	59089	Normal	Normal	Condição 1
TU-16 fase B	BBC	SP-15109	Normal	Normal	Condição 2
TU-16 fase C	BBC	SP-15110	Normal	Normal	Condição 2
TU-17 fase A	COEMSA	100296/2	Normal	Normal	Condição 1
TU-17 fase B	COEMSA	100296/3	Normal	Normal	Condição 1
TU-17 fase C	COEMSA	100296/4	Normal	Normal	Condição 1
TU-18 fase A	COEMSA	100296/5	Normal	Normal	Condição 2
TU-18 fase B	WEG	2576726	Normal	Normal	Condição 2
TU-18 fase C	COEMSA	100296/1	Normal	Normal	Condição 2
TU-18A fase A	SIEMENS	4003464	Normal	Normal	Condição 2
TU-18A fase B	SIEMENS	4003571	Normal	Normal	Condição 3
Reserva 1 60Hz	BBC	SP-15108	Normal	Normal	Condição 1

É possível verificar que para todos os Transformadores, as características físico-químicas e de teor de água no óleo estão dentro dos limites recomendados pela norma. O gráfico de pizza a seguir apresenta a estatística da condição dos transformadores, conforme os diagnósticos dos ensaios cromatográficos.

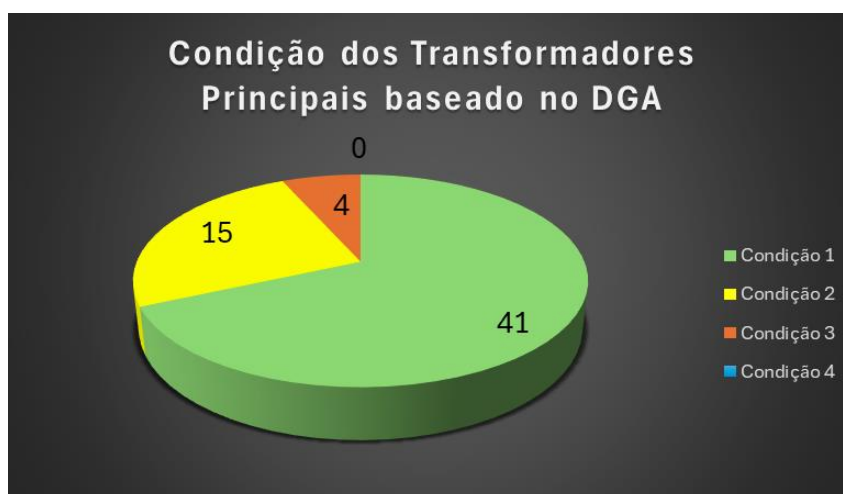


Figura 2 – Distribuição da Condição dos 60 Transformadores Principais das Unidades Geradoras conforme diagnóstico dos últimos ensaios cromatográficos.

5 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS DOS TRANSFORMADORES

Os Transformadores Principais possuem isolamento sólida da parte ativa através de papel Kraft termoestabilizado, o que garante uma classe térmica mais elevada em relação ao papel Kraft comum. Este tipo de isolamento permite uma elevação de temperatura de 60 °C no óleo e de 65 °C nos enrolamentos do transformador. A degradação da celulose (material componente do papel Kraft) pode ocorrer essencialmente de três formas:

- Por hidrólise - referente a quebra das moléculas de celulose através da reação química com a água.
- Por oxidação – referente a reação química do óleo com o oxigênio, gerando subprodutos ácidos, que por sua vez reagem com o papel isolante.
- Por pirólise – referente a quebra das moléculas de celulose através do calor.

Como visto anteriormente, os resultados de análise de óleo isolante indicam que o teor de água dissolvida no óleo de todos os transformadores encontra-se dentro dos limites estabelecidos por norma, o que garante uma menor influência de reações de hidrólise no papel isolante dos equipamentos.

Ademais, todos os transformadores possuem sistema de conservação de óleo selados, o que representa que o óleo não tem contato direto com o ar atmosférico e com o oxigênio presente no ar. Este sistema reduz a probabilidade das reações de oxidação no óleo do transformador. Tal fato pode ser evidenciado através dos resultados dos ensaios físico-químico de cor e índice de neutralização (acidez), os quais atualmente indicam valores normais para todos os transformadores.

Já a degradação da celulose pelo calor está diretamente relacionada com o carregamento do transformador. Carregamentos acima da potência nominal tendem a aquecer mais os enrolamentos e o óleo, podendo causar as reações de pirólise e quebra das cadeias de celulose do papel isolante.

Para a análise das condições operativas, considerou-se o histórico dos últimos dez anos dos carregamentos e das temperaturas dos Transformadores Principais. A análise técnica do histórico mostra que todos os transformadores, tanto em 50Hz como em 60Hz, operaram abaixo de sua capacidade nominal, entre 75% e 85% em média. Além disso, em praticamente todo o período eles apresentaram temperaturas máximas de enrolamento inferiores a 90°C, o qual encontra-se dentro do limite de 110°C para o papel Kraft termoestabilizado. Atualmente, a literatura sobre envelhecimento do papel isolante por fatores térmicos de carregamento de transformadores pode ser encontrada nas normas ABNT NBR 5456-7, IEC 60076-7 e IEEE C57.91.

Os gráficos das figuras 3, 4, 5 e 6 a seguir apresentam as curvas de temperatura e carregamento típica para um banco de transformadores de 50Hz e de 60Hz entre outubro de 2023 e setembro de 2024.

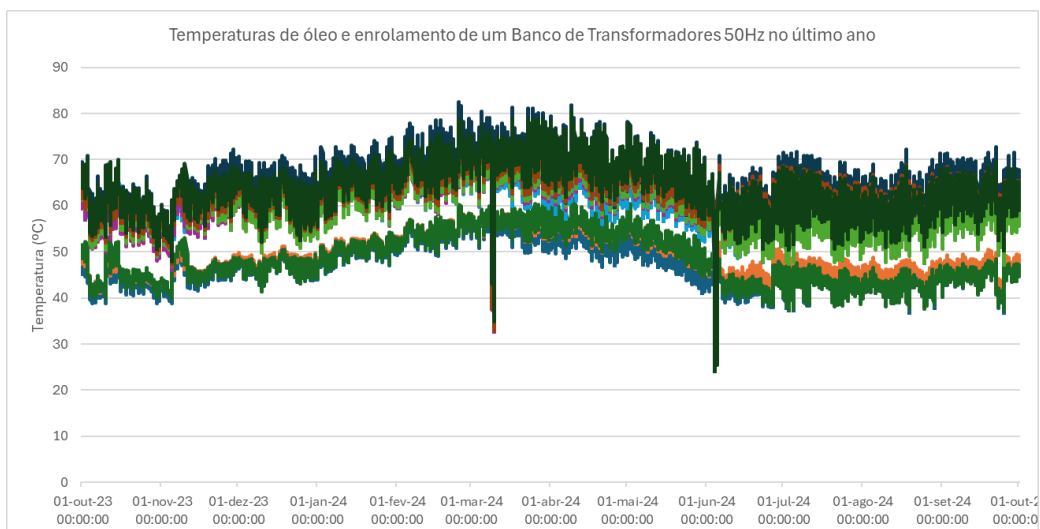


Figura 3 - Distribuição das temperaturas de óleo e enrolamento de um Banco de Transformadores de 50Hz entre outubro de 2023 e setembro de 2024.

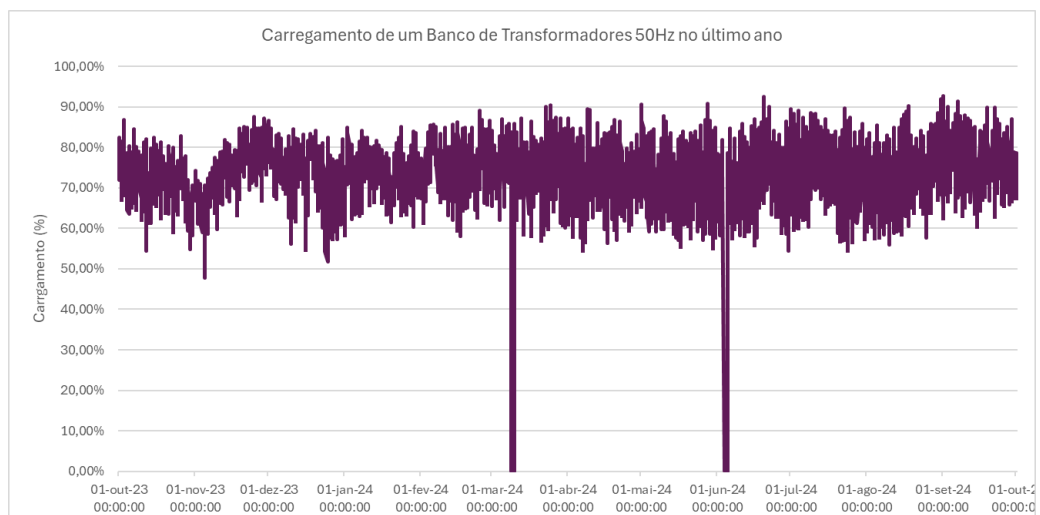


Figura 4 - Distribuição do carregamento percentual de um Banco de Transformadores de 50Hz entre outubro de 2023 e setembro de 2024.

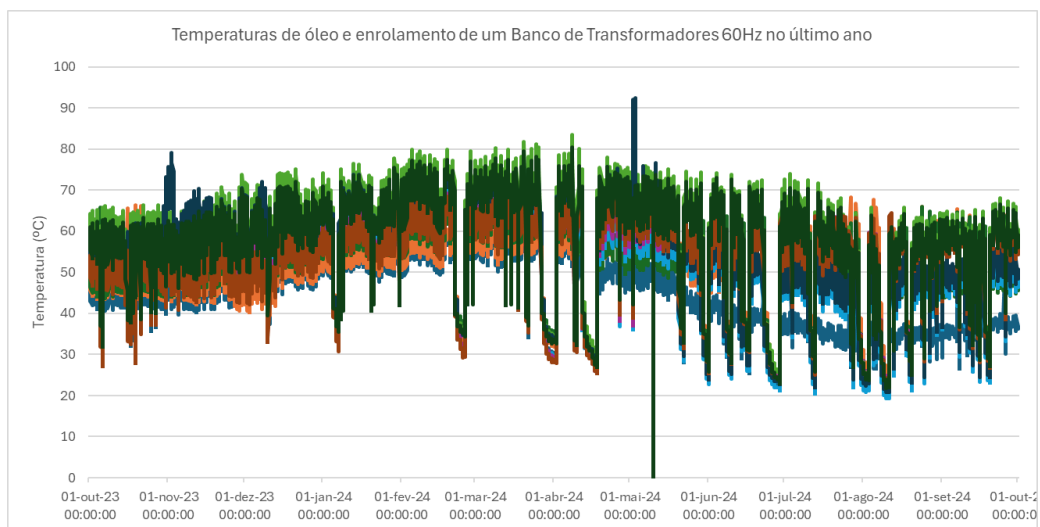


Figura 5 - Distribuição das temperaturas de óleo e enrolamento de um Banco de Transformadores de 60Hz entre outubro de 2023 e setembro de 2024.

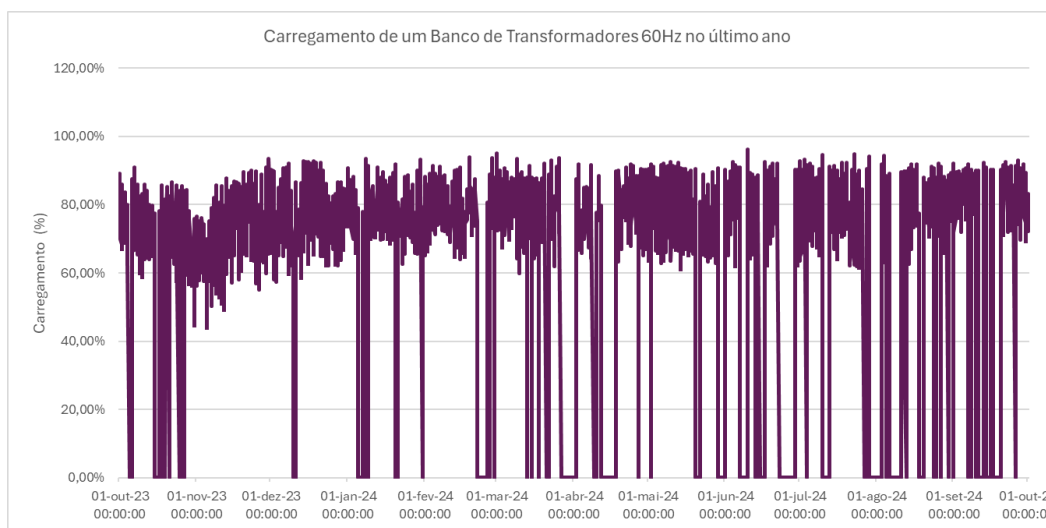


Figura 6 - Distribuição do carregamento percentual de um Banco de Transformadores de 60Hz entre outubro de 2023 e setembro de 2024.

Conforme a norma IEEE.C57.91, a taxa de degradação térmica do papel termoestabilizado segue a curva de Arrhenius. Para a temperatura 110 °C, o valor dessa taxa é igual a um (1). Esse valor representa que se o transformador operar 1 hora à 110 °C, a vida útil de sua isolamento será degradada em 1 hora. A figura 7 apresenta a curva do fator de aceleração de envelhecimento do papel termoestabilizado.

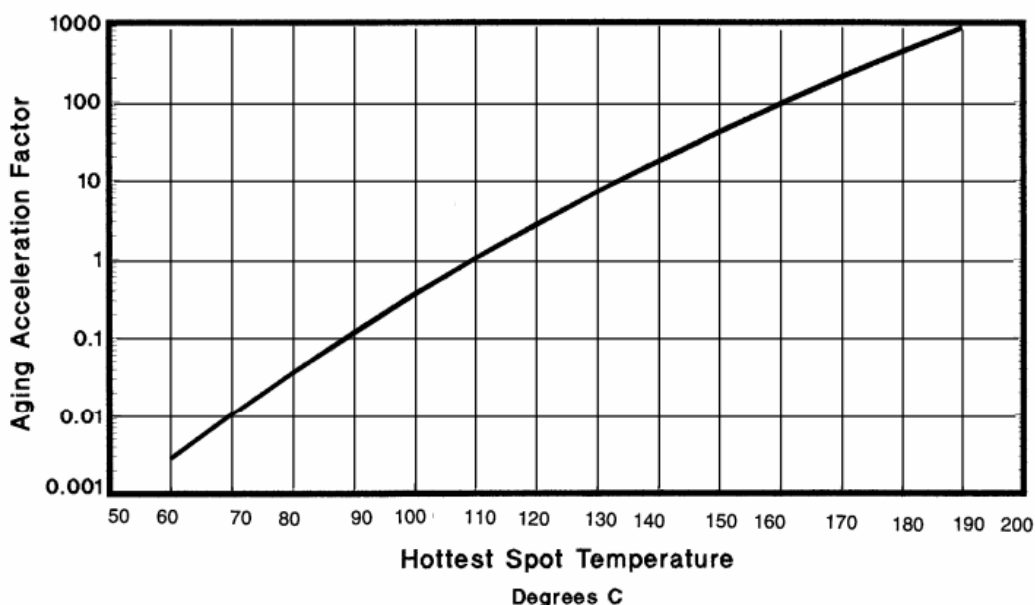


Figura 7 – Fator de aceleração de envelhecimento do papel termoestabilizado (relativo a 110 °C). Fonte: Norma IEEE C57.91 (2012)

Como os Transformadores Principais operaram historicamente entre 75 e 85°C, este fator teórico tem permanecido inferior a um, representando que o envelhecimento do papel isolante por fatores térmicos é lento.

A fim de complementar esta análise, a SMIE.DT está buscando metodologias adicionais, como o ensaio de metanol em óleo isolante, para determinar de forma mais prática e assertiva sobre o estado atual do papel isolante de todos os transformadores. Nesse contexto, a SMIE.DT já realizou

um estudo inicial de avaliação da vida residual, medindo o metanol nos transformadores da Unidade Geradora 12 através do contrato 4500058440. O estudo determinou de forma indireta o Grau de Polimerização (GP) do papel isolante, estimando um valor superior a 700 para os três transformadores. Este valor representa que o papel isolante se encontra ainda em boas condições de vida útil e apropriado para a aplicação nos transformadores. Como referência, o GP do papel isolante novo no início da operação de transformadores encontra-se na faixa de 900 a 1000. Já o final de vida útil do papel isolante é determinado quando o GP alcança um valor próximo a 200.

6 CONCLUSÃO

Os estudos de engenharia referentes a estimativa de vida útil de transformadores de potência devem levar em consideração diversos fatores, tais como carregamento ao longo do tempo, massa e tipo de papel isolante, volume e tipo de óleo, modo de refrigeração, entre outros.

Através dos dados disponíveis atualmente, a Engenharia de Manutenção SMIE.DT realizou um estudo da condição operacional atual dos Transformadores Principais de Itaipu, conforme procedimentos descritos em brochuras e normas técnicas vigentes. Este estudo permitiu chegar as seguintes conclusões:

- Mais de 70% dos Transformadores Principais instalados estão em operação contínua por mais de 30 anos desde a última entrada em operação;
- Apesar da idade avançada dos transformadores, os resultados dos ensaios físico-químicos não indicam degradação do óleo isolante por oxidação ou hidrólise;
- O teor de água dissolvido em óleo encontra-se dentro do valor recomendado por norma para todos os transformadores, o que minimiza os efeitos adversos deste composto no papel isolante.
- A análise dos resultados dos ensaios cromatográficos conforme a norma IEEE C57.104 indicam que 68% dos transformadores (41 unidades) apresentam diagnóstico normal, sem anormalidades evidentes.
- Para 25% dos transformadores (15 unidades), o diagnóstico recomenda um acompanhamento a longo prazo na operação dos equipamentos, considerando também a influência dos ciclos de carregamento ao longo do tempo.
- Para 7% dos transformadores (4 unidades) o diagnóstico recomenda monitoramento contínuo dos gases dissolvidos em óleo e acompanhamento de sua evolução, a fim de avaliar possíveis faltas térmicas ou dielétricas internas. Cabe destacar também que todos os Transformadores Principais possuem monitoramento contínuo de gases dissolvidos em óleo, independente da sua condição atual.
- Não foram diagnosticados transformadores na Condição 4, representada pelo planejamento da retirada de operação a curto prazo devido a gravidade de possível falta interna no equipamento.
- O histórico de operação dos Transformadores Principais nos últimos 10 anos revelou um carregamento médio entre 75% e 85% da capacidade nominal dos equipamentos e temperaturas estimadas de ponto quente não superiores à 90 °C, o qual encontra-se dentro do limite suportado para o papel Kraft termoestabilizado (até 110 °C).