



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **CATEGORIA 3**

### **CUIDADOS NA REENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR A ÓLEO DE GRANDE PORTE (POTÊNCIA => 500KVA) USADO.**

#### **1. OBJETIVO**

Apresentar um roteiro teórico dos cuidados necessários na reenergização de um transformador fora de operação por um período prolongado, demonstrando na prática a execução propriamente dita.

#### **2. INTRODUÇÃO**

A reativação de transformadores de grande porte, após períodos prolongados de inatividade ou substituição do óleo isolante, requer uma abordagem meticulosa para garantir a integridade do equipamento e a segurança operacional. Este artigo se propõe a oferecer um



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

guia detalhado baseado em normas técnicas, manuais de fabricantes e experiência profissional, abrangendo os procedimentos essenciais e os cuidados necessários para a correta energização desses transformadores.

Ao longo deste trabalho, serão exploradas as etapas fundamentais desde a inspeção inicial até a energização final, seguindo diretrizes precisas para mitigar os riscos associados à reativação. A metodologia aqui apresentada visa não apenas assegurar a operação segura e eficiente do equipamento, mas também fornecer um roteiro prático para profissionais responsáveis pela manutenção de sistemas elétricos de alta potência.

Adicionalmente, serão discutidos os impactos da inatividade prolongada nos componentes do transformador, destacando as consequências potenciais da degradação e enfatizando a importância de procedimentos adequados de revitalização. Este trabalho visa servir como um recurso essencial para garantir a confiabilidade contínua e a longevidade dos transformadores a óleo, contribuindo para a segurança e eficiência das redes elétricas.

Outro fator importante a ser abordado será a presença de umidade no óleo mineral isolante de transformadores, que pode comprometer seriamente a integridade do equipamento e sua operação segura. Portanto, é crucial abordar a questão com métodos eficazes de desumidificação e testes rigorosos antes de qualquer tentativa de energização. Seguindo essas etapas e precauções, é possível mitigar os riscos associados e assegurar uma operação segura e eficiente do transformador.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

## **3. CONCEITOS**

### **3.1. TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA**

Os transformadores a óleo de alta tensão desempenham um papel crucial na transmissão e distribuição de energia elétrica. Eles utilizam óleo mineral como meio isolante e de resfriamento, o que melhora a dissipação de calor e aumenta a vida útil do equipamento. Além disso a manutenção regular e a análise do óleo são essenciais para monitorar a integridade do transformador e prevenir falhas catastróficas [1].

Além dos componentes principais dos transformadores a óleo de alta tensão, como o núcleo e os enrolamentos, as buchas desempenham um papel fundamental na operação segura do equipamento. A inspeção de buchas de transformadores a óleo é essencial para garantir a integridade do isolamento e prevenir falhas elétricas. Testes como a medição de capacitância e fator de potência são utilizados para detectar degradações no isolamento das buchas [2]. Para assegurar a confiabilidade do transformador, é importante que "as buchas de transformadores a óleo devem ser submetidas a testes regulares de capacitância, fator de potência e inspeção visual para detectar sinais de envelhecimento ou degradação. A manutenção adequada das buchas é crucial para evitar falhas catastróficas. A manutenção adequada das buchas é crucial para evitar falhas catastróficas [3].



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

A análise de fator de potência é uma técnica utilizada para avaliar a condição do isolamento em transformadores a óleo, quando realizado com as buchas já montadas. Um fator de potência elevado pode indicar a presença de umidade ou outros contaminantes no óleo, sinalizando a necessidade de intervenção [4].

Além disso, a estrutura e o design dos transformadores a óleo são fundamentais para sua performance e durabilidade. Componentes como o núcleo, enrolamentos e o tanque de óleo são projetados para suportar tensões elétricas e mecânicas elevadas, garantindo uma operação eficiente e segura ao longo do tempo [5].

Na prática, pode-se afirmar que o tamanho físico da caixa de um transformador a óleo e seu design influenciam diretamente no seu resfriamento, visto que este tamanho pode determinar a quantidade de óleo necessária para este fim. Percebe-se que para fins econômicos, alguns fabricantes optam pela diminuição da caixa, onde muitas vezes se torna necessário a utilização de radiadores de calor acoplados para garantir a circulação e o resfriamento do óleo mineral isolante, mas que acabam muitas vezes apresentando vazamentos nas conexões devido à diferença de dilatação entre as partes, onde de um lado a temperatura acompanha o esforço do equipamento, elevando ou diminuindo sua temperatura e do outro lado tem-se influência externa, como as intempéries. Este acoplamento deve prover de retentores capazes de absorver estas variações físicas de dilatação.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Em projetos mais antigos pode-se observar menos utilização destes radiadores, sendo necessário o aumento da caixa e da quantidade de óleo para garantir a correta refrigeração do sistema.

Quando acoplado ao transformador um sistema de ventilação forçada, automaticamente aumenta-se a potência com que este equipamento suporta em fornecer, visto que conseguirá manter as características de segurança e integridade dos componentes mesmo trabalhando em um regime mais intenso.

### **3.2. ÓLEO MINERAL ISOLANTE**

O envelhecimento do óleo isolante em transformadores de alta tensão é um fator crítico que afeta sua performance e segurança operacional. Com o tempo, o óleo pode sofrer oxidação, formando ácidos e sedimentos que diminuem sua eficiência isolante e podem levar à falha do transformador. A regeneração do óleo, através de processos como a filtração e a adsorção, pode restaurar parcialmente suas propriedades e prolongar a vida útil do equipamento [6]. Esses processos são especialmente importantes após longos períodos de desenergização, quando a qualidade do óleo pode ter sido comprometida [7].

Além do envelhecimento, a contaminação do óleo isolante por água, partículas sólidas e produtos de decomposição pode reduzir significativamente suas propriedades dielétricas. Testes regulares de análise de óleo, como a medição do teor de água e a contagem de



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

partículas, são cruciais para manter a qualidade do óleo e a operação segura do transformador [8].

A presença de umidade no óleo isolante pode reduzir significativamente sua rigidez dielétrica e aumentar a probabilidade de falhas de isolamento, podendo gerar arco interno entre espiras, o que é mais comum acontecer, assim como casos mais críticos em que o arco elétrico percorre até a caixa, causando o arco para terra, em ambos os casos causando a formação de gases. A desumidificação do óleo e do papel isolante é um passo crucial na preparação de transformadores para reenergização após longos períodos de desenergização [9].

#### **4. DIAGNÓSTICO**

Em fevereiro de 2024, durante os testes de rotina em uma subestação de tração, previsto no plano de manutenção preventiva foram identificadas anomalias em um dos transformadores retificadores de tração. Com o resultado dos ensaios realizados e uma avaliação técnica mais aprofundada, revelou-se a necessidade de substituir o transformador para uma avaliação mais minuciosa.

#### **5. ESTUDO DE CASO**

No local havia três transformadores sobressalentes usados. Esses transformadores foram transportados com as buchas desmontadas devido ao transporte e o óleo mineral isolante parcialmente retirado para a remoção dessas buchas.

## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **5.1. Escolha do transformador**

Foi realizada uma inspeção geral nos transformadores disponíveis, conforme figura 1, sendo escolhido aquele que apresentava as melhores condições para agilizar o processo de restabelecimento do sistema.



**Figura 1 – Transformadores sobressalentes**

#### **5.2. Verificação dos dispositivos de proteção.**

Torna-se essencial uma inspeção detalhada de todos os itens e instrumentos do transformador para assegurar condições de operação adequadas e garantir que o equipamento esteja em perfeito estado de funcionamento, sendo eles:

##### **Tanque Principal:**

- Conservação e pintura: Verificar corrosão.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

- Válvula de drenagem: Checar vazamentos.
- Nível e vazamento de óleo: Confirmar adequação.
- Aterramento e conexões: Inspeccionar segurança.

#### **Reservatório de Sílica Gel:**

- Conservação e fixação: Avaliar desgaste e suporte.
- Troca e vazamentos: Substituir sílica saturada.

#### **Relé Buchholz:**

- Conservação e conexões: Avaliar condição.
- Teste de funcionamento: Garantir operação correta.

#### **Radiadores:**

- Conservação e válvula: Verificar pintura e operação.
- Vazamentos: Corrigir problemas.

#### **Buchas:**

- Limpeza e trincas: Verificar porcelana.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

- Aperto e alinhamento: Inspeccionar conexões.

#### **Instrumentos e Indicadores:**

- Fixação e vedação: Checar posicionamento.
- Teste de atuação: Assegurar funcionamento.

#### **Painéis de Comando:**

- Conservação e vedação: Avaliar proteção.
- Conexões elétricas e limpeza: Verificar segurança.

### **5.3. Remoção do transformador avariado.**

Para facilitar o acesso em pontos difíceis do guindaste e agilizar os trabalhos, evitando que a subestação ficasse desligada por um longo período, a remoção manual do equipamento avariado foi realizada conforme demonstrado na figura 2, uma vez que o agendamento imediato do guindaste não foi possível.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 2 - Movimentação do transformador avariado

### 5.4. Preparação da área de movimentação do transformador.

Para o remanejo dos equipamentos com os guindastes, houve a necessidade da desmontagem dos barramentos de alimentação dos transformadores em 88kV, conforme mostrado na figura 3.



Figura 3 - Preparação para entrada do guindaste - Retirada dos barramentos de 88kV

A remoção dos barramentos foi agilizada com a utilização de um caminhão cesto.

## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Também foi necessário adaptar as ferragens (figura 4) de acomodação dos cabos para permitir a instalação do novo transformador, visto que ele possuía características físicas diferentes.



**Figura 4 - Adaptação das ferragens de sustentação dos cabos**

#### **5.5. Preparação para movimentação do transformador série 500932.**

Com o auxílio do guindaste (figura 5) foram remanejados os transformadores, cujo equipamento carregado de óleo mineral isolante ultrapassa 20 toneladas.



**Figura 4 - Movimentação dos transformadores**

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O transformador substituto foi colocado nos trilhos e movido até próximo ao seu local definitivo. Não era possível movê-lo diretamente com o guindaste devido à necessidade de manter o barramento de 88kV do outro transformador energizado, permitindo a continuidade no fornecimento de parte da energia de tração ao sistema. Este trecho foi realizado de forma manual.



Figura 5 - Posicionamento final do transformador

### 5.6. Manutenção nas buchas de alta tensão.

As buchas do transformador ficaram expostas ao tempo por alguns anos. A primeira ação, após ter os equipamentos sujeitos às intempéries, é a realização de uma limpeza pesada. Após serem limpas, as buchas foram colocadas em uma estufa com temperatura controlada

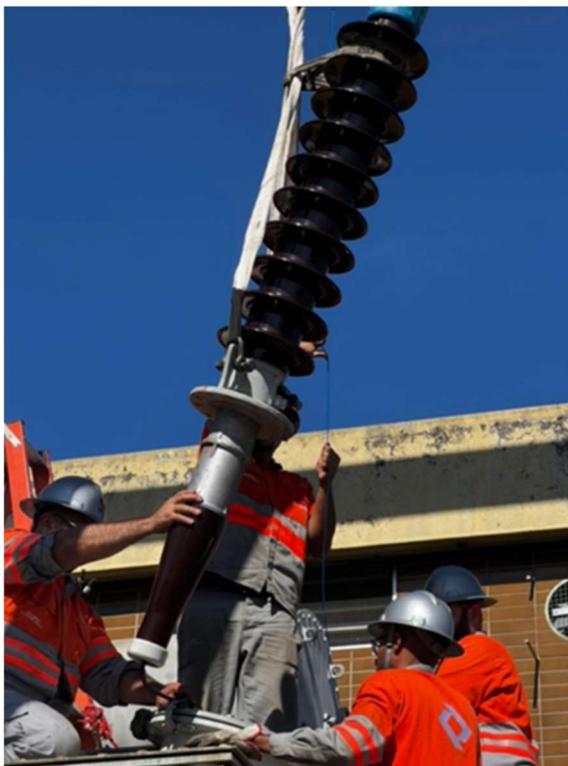
## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

durante uma semana, até que o transformador estivesse corretamente posicionado para o processo de instalação.

#### **5.7. Instalação das buchas isolantes.**

Após a limpeza e secagem em estufa e com o transformador em seu local definitivo, foram instaladas as buchas de entrada, sempre tomando-se os devidos cuidados por conta de sua fragilidade. O fato das buchas precisarem ser acopladas em ângulo (figura 7) a dificuldade aumenta, mesmo utilizando-se do caminhão munck para auxiliar no processo. Também foram substituídas todas as juntas de vedação.



**Figura 6 - Instalação das buchas de entrada**

## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

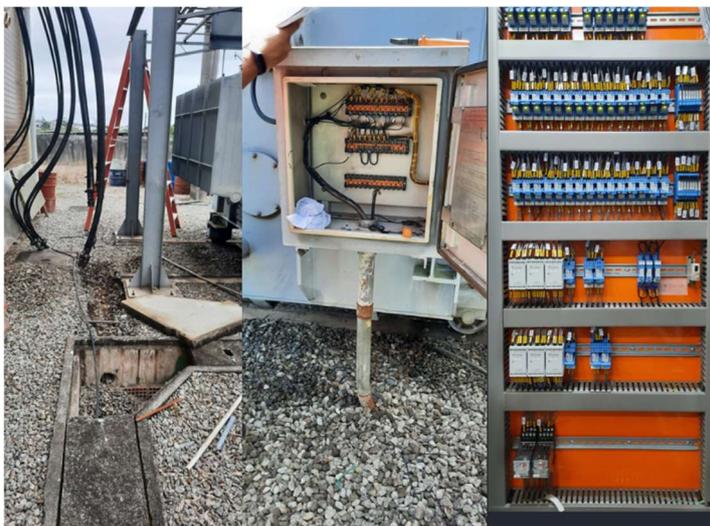
### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **5.8. Confecção dos adaptadores dos terminais das buchas de entrada e de saída.**

As conexões variam de fabricante para fabricante, onde houve a necessidade de usar peças para o perfeito acoplamento dos terminais.

#### **5.9. Adaptação no circuito de comando.**

Com a nova posição da caixa de comando do transformador substituído, foi necessário instalar um novo eletroduto para interligar os cabos de comando. Também foi preciso reconfigurar as lógicas no painel de controle e proteção, pois os contatos de proteção do transformador avariado eram normalmente fechados, enquanto os do substituto são normalmente abertos.



**Figura 7 - Adaptação na lógica de comando**

## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **5.10. Substituição do óleo mineral isolante.**

Com uma caixa comportando cerca de 10.000 litros de óleo mineral isolante, o processo é moroso. Especialistas recomendam esgotar o óleo pela parte inferior para remover impurezas acumuladas no fundo. A injeção do novo óleo deve ser feita pela parte superior, evitando a movimentação de resíduos que podem se alojar nos enrolamentos, aumentando o risco de fugas de tensão e dificultando a circulação do óleo por convecção.



**Figura 8 - Substituição do óleo mineral isolante**

#### **5.11. Realização do vácuo**

Antes da inserção do óleo mineral isolante, foi realizado vácuo em todo o sistema, utilizando-se a bomba mencionada na figura 10, selando o transformador para manter esta condição até

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

a etapa de enchimento com o novo óleo. Este processo visa eliminar qualquer umidade ou ar presente no seu interior, assim como nas buchas.



Figura 90 - Bomba de vácuo utilizada

### 5.12. Realização do termovácuo

Com o transformador completamente preenchido com óleo, foi realizado o termovácuo, onde é aplicada uma elevação de temperatura controlada ao óleo que circula pela máquina. Esse aquecimento ajuda a eliminar qualquer resíduo de umidade presente no óleo enquanto este circula pelo termovácuo.

## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



**Figura 11 - Máquina de termovácuo utilizada**

Continuamos monitorando a temperatura e a pressão interna, ajustando conforme necessário para garantir uma desumidificação completa.

### **5.13. Análise do óleo mineral isolante.**

Os ensaios de óleo isolante são essenciais para garantir que os transformadores de potência funcionem corretamente e durem por muito tempo. Esses testes revelam informações importantes sobre as condições internas do equipamento e ajudam a identificar problemas que possam atrapalhar sua operação.

#### **5.13.1. Análise Físico-Química**

Segundo a norma NBR 10576:2017, o teor de inibidor deve ser monitorado em intervalos regulares, cuja frequência depende da temperatura operacional e dos níveis de carga:

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- a) Reinibição do óleo para o valor original da concentração do inibidor, se outros parâmetros indicarem um baixo grau de oxidação;
- b) Se o óleo apresentar grau elevado de oxidação, executar regeneração e inibição até a concentração original [10].

**Tabela 1 - Valores-limite para óleo em transformadores e reatores em uso.**

Característica	Método de ensaio	≤ 36,2 kV	> 36,2 kV ≤ 72,5 kV	> 72,5 kV ≤ 145 kV	> 145 kV
Aparência	Visual	Claro, isento de materiais em suspensão			
Rigidez dielétrica, kV eletrodo tipo calota, mín.	ABNT NBR IEC 60156	40		50	60
Teor de água, mg/kg, máx.	ABNT NBR 10710	40		30	20
Fator de perdas, %, máx. a 25 °C a 90 °C a 100 °C	ABNT NBR12133		0,5 15 20		– 12 15
Índice de neutralização mg KOH/g, máx.	ABNT NBR 14248	0,20		0,15	
Tensão interfacial, a 25 °C, mN/m, mín.	ABNT NBR 6234	20		22	25
Ponto de fulgor, °C, mín.	ABNT NBR 11341	130 °C			
Sedimentos	Ver Anexo A	Nenhum sedimento ou borra precipitável deve ser detectado. Resultados inferiores a 0,02 % em massa devem ser desprezados			
Inibidor (DBPC)	ABNT NBR 12134	Reinibir para 0,3 % quando forem atingidos valores menores que 0,1 %			



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

**Tabela 2 - Análise físico-química - Valores medidos**

Ensaio	Método	Limite	Resultado
Determinação do teor de água (ppm)	NBR 10710:2022	Máx. 30	15
Fator de perdas dielétricas a 100°C (%)	NBR 12133:1991	Máx. 20	0,51
Rigidez dielétrica (kV)	NBR IEC 60156:2019	Mín. 50	65
Índice de neutralização (mgKOH/g)	NBR 14248:2009	Máx. 0,15	0,02
Tensão interfacial (mN/m)	NBR 6234:2015	Mín. 22	36,2
Cor	NBR 14483:2015	-	1
Densidade a 20/4°C (g/mL)	NBR 7148:2013	-	0,878
Aspecto visual	-	-	Límpido

Os resultados indicam que o óleo isolante está em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 10576, garantindo sua adequação para uso no transformador, conforme tabela 3.

**Tabela 2 - Análise físico-química - Conclusões do Laboratório Contratado**

Análise físico-química					
Série	Identificação	RE	Classificação	Ação	Reamostragem
500932		16617/24	Normal	Resultados físicos-químicos atendem os requisitos da ABNT NBR 10576:2017.	15/05/2025
500932		16616/24	Normal	Não é aplicável sugerir um novo período de reamostragem.	

### 5.13.2 Análise Cromatográfica

Para a análise cromatográfica de PCBs, a norma especifica o uso de curvas de calibração e a comparação das áreas obtidas nos cromatogramas. As áreas obtidas em cada cromatograma



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

devem ser utilizadas, com as respectivas concentrações, para preparação das curvas de calibração [11].

Deve-se observar que durante o processo de purificação, cada amostra foi diluída em 20 vezes e este fator deve ser considerado após a interpolação em uma das curvas-padrão [11].

**Tabela 4 - Análise Cromatográfica – Resultados encontrados**

Ensaio	Método	Resultado
Hidrogênio - ppm	NBR 7070:2006	1
Oxigênio - ppm	NBR 7070:2006	15100
Nitrogênio - ppm	NBR 7070:2006	44600
Metano - ppm	NBR 7070:2006	ND
Monóxido de carbono - ppm	NBR 7070:2006	ND
Dióxido de carbono - ppm	NBR 7070:2006	120
Etileno - ppm	NBR 7070:2006	ND
Etano - ppm	NBR 7070:2006	ND
Acetileno - ppm	NBR 7070:2006	ND
Total gases		59821
Total gases combustíveis		1

**Tabela 3 - Análise Cromatográfica - Conclusões do Laboratório Contratado**

Cromatografia de gases dissolvidos					
Série	Identificação	RE	Classificação	Ação	Reamostragem
500932		16619/24	Normal	De acordo com a NBR 7274 (para óleo mineral isolante) os resultados indicam que o equipamento opera em condições normais.	15/05/2025
500932		16618/24	Normal	Não é aplicável sugerir um novo período de reamostragem.	



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

## **6. COMISSIONAMENTO.**

### **6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Serão apresentados os resultados obtidos na análise do transformador. Esses resultados são fundamentais para garantir a integridade e a segurança operacional do equipamento.

#### **6.1.1. Teste de Resistência de Isolação (Megger)**

O teste de resistência de isolação é realizado para verificar a qualidade do isolamento entre os enrolamentos do transformador e entre os enrolamentos e a massa. Por meio de ensaios com aplicação de tensão de até 5 kV, obter a resistência de isolação entre bobinas e entre as bobinas e a massa. Certificando-se que os resultados estejam dentro de um limite tolerável, comparando as medições com valores de fábrica ou referência técnicas.

- **Equipamento Utilizado:** Megômetro (Megger) Megabras, MI 5500 - 5 kV

As medições foram realizadas em diferentes partes do transformador, garantindo que todas as conexões fossem testadas, os valores dos testes estão apresentados da Tabela 6.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

**Tabela 6 - Resistência de Isolação (Megger) - Valores Encontrados**

Ensaio	Conexões			Leituras em MΩ
	Positivo (+)	Negativo (-)	Guarda	1 min.
AT x BT1	AT	BT1	M + BT2	12000
AT x BT2	AT	BT2	BT1 + M	20000
AT x M	AT	M	BT1 + BT2	12000
BT1 x BT2	BT1	BT2	AT + M	2000
BT1 x M	BT1	M	AT + BT2	4000
BT2 x M	BT2	M	AT + BT1	4000
(AT + BT1 + BT2) x M	AT + BT1 + BT2	M	-	3000

### **Resistência de Isolação (Megger) - Conclusão do Laboratório Contratado**

As medições de resistência de isolação realizadas com o Megger MI 5500 5 kV mostraram que todas as partes do transformador testadas possuem resistência dentro dos limites toleráveis, indicando que o isolamento está em boas condições.

#### **6.1.2. Teste de Fator de Potência (tg Δ)**

O teste de fator de potência mede a eficiência do isolamento dos enrolamentos do transformador. Utiliza-se um medidor específico que aplica uma tensão e mede o fator de potência e a capacitância entre os enrolamentos e a massa, obtendo-se o fator de potência e a capacitância dos arranjos CH (Alta para massa), CHL (Alta para baixa) e CL (Baixa para massa).

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

### 1. Equipamento Utilizado: Medidor de Fator de Potência: Vegtron FT-10



Figura 10 - Equipamento de medição do fator de potência utilizado

As medições foram realizadas em diferentes arranjos de enrolamentos, garantindo que todas as combinações críticas fossem testadas.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

**Tabela 7 - Fator de Potência (tg Δ) - Valores Encontrados**

Temp. ambiente:		28 °C		Temp.do óleo :		27 °C		Umidade rel.:		58%	
Tensão de Ensaio :		( X ) 2,5 kV				( ) 10 kV					
ENSAIO	CONEXÕES DOS CABOS				MEDIÇÃO			Fator de potência %		Capacitância	
	HV	Cx	Terra	Malha HV	Seleção	Medido	Ensaio	Medido	à 20 °C	µF	
1	H	L	GND	T	GSTg	GST	C1HL + C2H	0,325		5797	
2	H	L	GND	T	GSTg	GSTg	C2H	0,285		-28395	
3	H	L	GND	T	GSTg	UST	C1HL	0,292		34192	
4	L	T	GND	H	GSTg	GST	C1LT + C2L	0,318		50947	
5	L	T	GND	H	GSTg	GSTg	C2L	0,451		16878	
6	L	T	GND	H	GSTg	UST	C1LT	0,252		34069	
7	T	H	GND	L	GSTg	GST	C1HT + C2T	0,737		626,947	
8	T	H	GND	L	GSTg	GSTg	C2T	0,038		571,276	
9	T	H	GND	L	GSTg	UST	C1HT	7,909		55,672	
10	H+L+T	-	GND	-	GST	GST	C2H+C2L+C2T	0,376		23219	

Ensaio	1 - 2 = 3	34192
	4 - 5 = 6	34069
	7 - 8 = 9	55,671
	2 + 5 + 8 = 10	-10945,7

### Fator de Potência (tg Δ) - Conclusão do Laboratório Contratado

As medições do fator de potência mostraram que todas as partes do transformador testadas possuem fatores de potência dentro dos limites toleráveis. Isso indica que o isolamento está em boas condições, com baixa perda dielétrica e boa eficiência.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

### 6.1.3. Teste de Resistência Ôhmica dos Enrolamentos

O ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos é crucial para avaliar perdas ôhmicas e garantir boas conexões e condutividade. As normas IEEE C57.12.90 e NBR 5356-1 especificam os métodos para medições corretas. Este ensaio serve como referência, não como critério de aprovação [12].

2. Utiliza-se um microhmímetro que aplica uma corrente específica e mede a resistência ôhmica dos enrolamentos. O objetivo é garantir que a resistência esteja dentro de limites toleráveis, conforme valores de fábrica ou referências técnicas, medindo-se a resistência das bobinas de alta tensão (AT), baixa tensão (BT) e terciário.
3. **Equipamento Utilizado:** Microhmímetro: DV Power, RMO 030TW



Figura 11 - Microhmímetro utilizado

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

As medições foram realizadas em diferentes combinações de enrolamentos para garantir a precisão dos resultados apresentado na tabela 8.

**Tabela 8 - Resistência Ôhmica dos Enrolamentos**

PRIMÁRIO									
Comutador	Conexão	H1 - H3		Conexão	H2 - H1		Conexão	H3 - H2	
	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C
2	2	5,98	7,08	2	6,02	7,13	2	5,95	7,04
3	2	5,55	7,33	2	5,56	6,58	2	5,55	6,57
SECUNDÁRIO									
Comutador	Conexão	X1 - X3		Conexão	X2 - X1		Conexão	X3 - X2	
	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C
	60	2385	2769	60	2377	2760	60	2429	2820
TERCIÁRIO									
Comutador	Conexão	Y1 - Y3		Conexão	Y2 - Y1		Conexão	Y3 - Y2	
	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C	Corrente Aplicada (A)	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ )	Resistência Medida ( $\mu\Omega$ ) 75 °C
	60	3601	4181	60	3540	4110	60	3545	4116

### 6.1.4 Medição da relação de transformação e polaridade e verificação do deslocamento angular e sequência de fases.

A relação de transformação do transformador é verificada para assegurar que a tensão de saída esteja de acordo com o que diz na placa do transformador. Este ensaio é feito para confirmar a integridade dos enrolamentos e a correta operação do transformador.

Conforme descrito na NBR 5356-1, mede-se a relação de transformação em cada derivação. Deve-se verificar a polaridade de transformadores monofásicos e o esquema de ligação para transformadores trifásicos [12].

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Por meio de ensaios com aplicação de tensão em AT (Alta Tensão) e medição de tensão em BT (Baixa Tensão), obter a relação de transformação em cada TAP do equipamento, certificando-se que os resultados estejam dentro de um limite tolerável, comparando as medições com valores de fábrica ou referência técnicas.

Equipamento utilizado: AEMC (Chauvin Arnoux), DTR 8510



Figura 12 - TTR utilizado

Os resultados obtidos nos TAPs 2 e 3 são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Relação de Transformação - Resultados obtidos

Relação medida Dd0										
Comutador	Tensões de placa		Relação (V1/V2)	Relação medida				Desvio em % (H1 - H2)	Desvio em % (H1 - H3)	Desvio em % (H2 - H3)
	V1	V2		(H1 - X2)	(X1 - X2)	(H1 - H3)	(X1 - X3)			
2	90100	1224	73,61111	73,79	0	73,67	0	0,242	0,076	0,099
3	88000	1224	71,89542	71,97	0	72	0	0,101	0,122	0,144
Relação medida Dy1										
Comutador	Tensões de placa		Relação (V1/V2)	Relação medida				Desvio em % (H1 - H2)	Desvio em % (H1 - H3)	Desvio em % (H2 - H3)
	V1	V2		(H1 - X2)	(X1 - X2)	(H1 - H3)	(X1 - X3)			
2	90100	1224	73,61111	73,79	0	73,67	0	0,242	0,076	0,099
3	88000	1224	71,89542	71,97	0	72	0	0,101	0,122	0,144

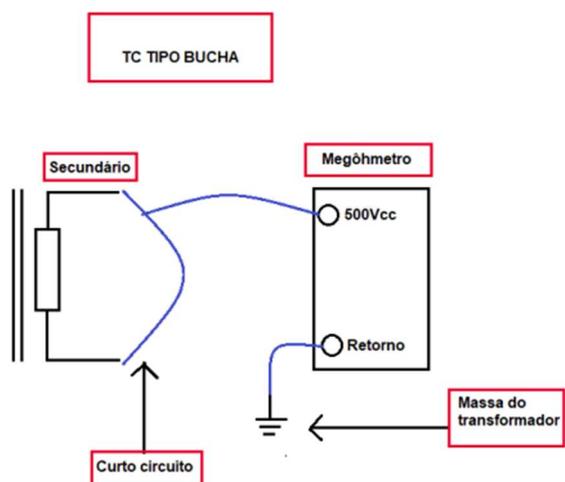
## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

### Relação de Transformação - Conclusão do Laboratório Contratado

Os valores obtidos foram condizentes com os esperados.

#### 6.1.4. Ensaio do Transformador de Corrente Tipo Bucha

Por meio de ensaios com aplicação de tensão de até 5 kV, verificação da isolação do TC, como também toda a fiação conectada ao painel de comando até o TC e certificando-se que os resultados estejam dentro de um limite tolerável, sendo comparadas com as medições dos valores obtidos nos ensaios em fábrica ou de referências técnicas.



**Figura 13 - Conexões para a medição da resistência ôhmica**



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Os dados obtidos são demonstrados na tabela 10.

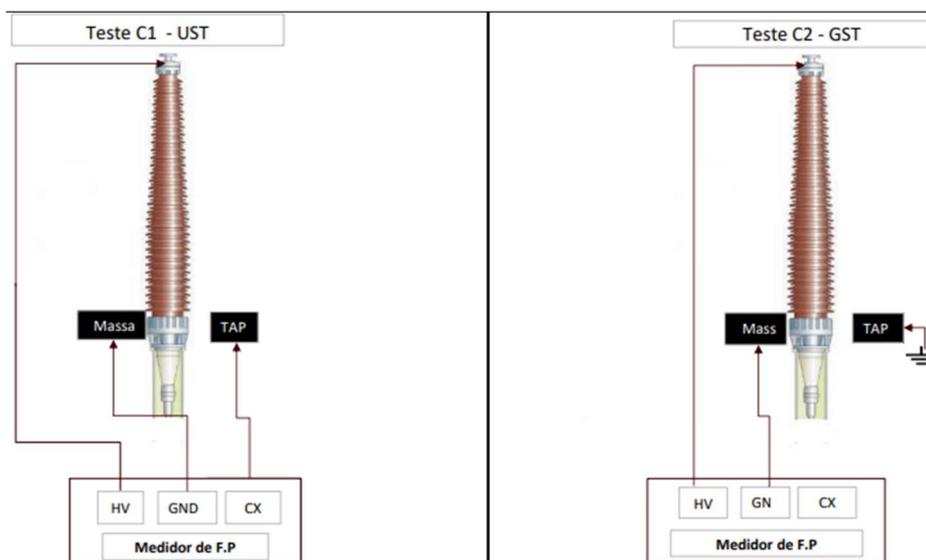
**Tabela 40 - Valores medidos – Transformadores de Corrente Tipo Bucha**

TC's	Terminal Secundário	Relação de transformação						Resistência ôhmica		Resistência do isolamento 500Vcc (MΩ)
		Corrente Primário	Corrente Secundário	Relação Teórica	Relação medida	excitação (mA)	Erro %	medido mΩ	medido a 75°C mΩ	
TC1	S1 - S2	500	5	100	100,01	119	0,01	254,7	300,21673	NA
TC2	S1 - S2	500	5	100	100,18	113	0,18	263,5	310,58935	NA
TC3	S1 - S2	500	5	100	100,05	119	0,05	270,9	319,31179	NA

### 6.1.5. Fator de Potência da Bucha de Alta Tensão

O fator de potência (FP) é uma medida da eficiência do isolamento elétrico, representando a relação entre a corrente resistiva (perdas) e a corrente capacitiva (útil) em um material isolante. Um fator de potência baixo indica um bom isolamento, enquanto um fator de potência alto pode indicar problemas, como contaminação ou degradação do isolante. O teste de fator de potência de buchas de alta tensão é fundamental para garantir a integridade e a confiabilidade dos sistemas de energia elétrica. Por meio de ensaios com aplicação de tensão de 2,5 kV como é mostrado na Figura 16, obter o fator de potência e a capacitância dos arranjos CH (Alta para massa), CHL (Alta para baixa) e CL (Baixa para massa). Certificando-se que os resultados estejam dentro de um limite tolerável, comparando as medições com valores de fábrica ou referência técnicas.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



**Figura 14 – Conexão para a realização da medição do fator de potência**

As medições de resistência ôhmica dos enrolamentos realizadas com o microhmímetro DV Power, RMO 030TW. A tabela 11 evidencia que todas as partes do transformador testadas possuem resistências dentro dos limites toleráveis. Isso indica que os enrolamentos estão em boas condições, garantindo a eficiência e a segurança do transformador durante sua operação.

**Tabela 11 - Valores medidos**

ENSAIO	Tensão de Ensaio : ( X ) 2,5 kV ( ) 10 kV			CONEXÕES DOS CABOS		MEDIÇÃO		Fator de potência %		Capacitância
	HV	Cx	Terra	Teste	Seleção	Medido	à 20 °C	pF		
	1	H1	TAP	GND	C1	UST	0,280	0,224	278,424	
2	H1	-	GND	C2	GST	-	-	-		
3	H2	TAP	GND	C1	UST	0,287	0,230	274,425		
4	H2	-	GND	C2	GST	-	-	-		
5	H3	TAP	GND	C1	UST	0,281	0,225	278,941		
6	H3	-	GND	C2	GST	-	-	-		



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

### **CONCLUSÃO GERAL DO LABORATÓRIO CONTRATADO**

O Laboratório Contratado concluiu que todos os valores obtidos durante o comissionamento foram satisfatórios, sugerindo manter o monitoramento constante dos instrumentos e acessórios.

### **7. PROCEDIMENTOS DE ENERGIZAÇÃO**

Primeiramente, foi realizado um teste “em vazio”, energizando as entradas do transformador com suas saídas “em aberto”, desconectando-se os cabos de potência.

#### **7.1. Testes em vazio**

O processo de energização do transformador em vazio é crucial para avaliar seu funcionamento sem carga, garantindo uniformidade na temperatura do óleo isolante e dos materiais internos. Este procedimento, que pode durar de 8 a 10 horas, envolvendo:

- **Indicadores de Temperatura:** Monitoramento contínuo para garantir que estão dentro dos limites.
- **Dispositivos de Proteção:** Verificação da atuação de válvulas de alívio e relés Buchholz para detectar anomalias.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- Corrente do Relé de Proteção: Acompanhamento para identificar desequilíbrios de corrente.
- Inspeção Termográfica: Identificação de pontos de aquecimento excessivo.

Foi realizado o teste em vazio do transformador, energizado sem carga no secundário, por 12 horas. A corrente e a temperatura foram monitoradas por medidores e inspeção termográfica. Os resultados foram satisfatórios, com corrente muito baixa e equilibrada entre as fases, temperatura estabilizada e sem atuação das proteções.



Figura 15 - Inspeção termográfica



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **7.2. Testes em carga.**

O processo de energização do transformador sob carga envolve a aplicação gradual de carga no sistema, monitorando corrente e tensão para garantir uma transição suave e segura. Assim como no processo de energização do transformador em vazio, é efetuado um monitoramento constante do transformador, observando os mesmos aspectos do processo de energização em vazio.

Durante este teste, o transformador foi submetido a uma corrente parcial, aumentando até atingir a corrente nominal, conforme mais trens eram colocados no sistema de tração. Isso permitiu avaliar a regulação de tensão, eficiência e comportamento térmico, conforme mostrado na figura 18.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



**Figura 18 - Inspeção termográfica do transformador com corrente nominal**

Os resultados demonstraram que o transformador operou conforme os parâmetros especificados, garantindo assim sua confiabilidade e segurança para permanecer em operação após o teste sobre carga. Este ensaio confirma a capacidade do transformador de suportar as condições operacionais previstas e desempenhar suas funções de maneira eficaz no sistema de tração.

## 8. CONCLUSÕES

Todos os procedimentos realizados antes da reenergização são essenciais para prevenir a ocorrência de arcos voltaicos internos entre espiras ou em direção à carcaça. A adoção dessas medidas é crucial não apenas para evitar esse tipo de avaria, mas também para garantir a



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

preservação da integridade do equipamento. Dada a complexidade logística e o alto custo de implantação e manutenção desses transformadores, a implementação rigorosa dos procedimentos de segurança se torna indispensável. Assim, além de prolongar a vida útil dos componentes, assegura-se a eficiência operacional e a segurança geral do sistema elétrico.

O processo de retirada e troca do transformador envolveu uma série de etapas cuidadosamente planejadas e executadas, incluindo a desenergização, desconexão, remoção, substituição, e a posterior realização de testes em vazio e em carga. Cada uma dessas etapas é fundamental para garantir a correta instalação e funcionamento do novo transformador. A execução dos testes não só verificou o desempenho do transformador, mas também proporcionou um valioso aprendizado para a equipe envolvida nesses longos dias de trabalho na substituição do transformador, agregando conhecimento e experiência que são fundamentais para futuras operações e manutenções.

## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] S. & S. M. Tenbohlen, "High Voltage Oil-Immersed Power Transformers: Characteristics and Applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, nº 2, pp. 512-520, 2012.



**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

- [2] R. & K. J. Gilbert, "Bushing Inspection and Testing for Oil-Immersed Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, nº 1, pp. 286-292, 2012.
- [3] E. & B. D. Mombello, "Maintenance and Testing of Transformer Bushings," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, nº 1, pp. 467-473, 2015.
- [4] J. & M. S. Lapworth, "Power Factor Testing of Transformer Insulation," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 20, nº 3, pp. 9-24, 2004.
- [5] K. & P. J. Jabbari, "Design Considerations for High Voltage Oil-Immersed Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, nº 4, pp. 1800-1808, 2009.
- [6] R. & D. D. Seifert, "Aging and Reclamation of Transformer Oils: Techniques and Benefits," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 66, nº 5, pp. 297-303, 2015.
- [7] A. & C. B. Chatterjee, "Oil Reclamation Techniques for Power Transformers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, nº 4, pp. 508-514, 2000.
- [8] S. A. Ryder, "Diagnosing Transformer Faults Using Oil Analysis," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, nº 2, pp. 16-22, 2003.
- [9] B. & A. A. Garcia, "Effects of Moisture on the Insulation System of Power Transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 22, nº 6, pp. 31-38, 2006.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

- [10] A. B. d. N. T. (ABNT), “NBR 10576:2017 - Óleos Isolantes - Avaliação da Estabilidade à Oxidação e Análise Físico-Química,” ABNT, Rio de Janeiro, 2017.
- [11] A. B. d. N. T. (ABNT), “NBR 13882 - Líquidos Isolantes Elétricos - Determinação do Teor de Bifenilas Policloradas (PCB),” ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- [12] A. B. d. N. T. (ABNT), “NBR 5356-1 - Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades,” ABNT, Rio de Janeiro, 2008.
- [13] I. P. & E. Society, “Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers,” IEEE, 2019.
- [14] H. A. Antunes e M. P. Brito, “Comissionamento de Transformadores de Força: Do Projeto à Entrada em Operação,” Vitória, ES, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO PROGRAMA DE MOBILIZAÇÃO DA INDÚSTRIA NACIONAL DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL, 2010, p. Pg. 28 a 38.