



**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES  
- GTM**

**BOA PRÁTICA PARA MANUTENÇÃO EM REATOR SHUNT COM FOCO NOS ENSAIOS DE EMISSÃO  
ACÚSTICA, DESCARGAS PARCIAIS E ANÁLISE CROMATOGRÁFICA DO ÓLEO ISOLANTE**

**ALESSANDRO FREIRE NUNES (\*)**  
**ELETROBRAS FURNAS**

**IVAIR DE MATOS DIAS**  
**ELETROBRAS FURNAS**

**HAMILTON BATISTA DE OLIVEIRA**  
**ELETROBRAS FURNAS**

**RESUMO**

O objetivo do trabalho é mostrar a combinação de técnicas de detecção, medição e localização dos pontos de anomalias de um equipamento, para auxiliar as equipes de manutenção no processo inspeção interna. Destacamos as técnicas de Análise de Gases Dissolvidos (AGD), detecção e medição de Descargas Parciais (DP) e Emissão Acústica (EA). Os ensaios mostram-se eficazes, acarretando menor tempo de inspeção, com menor tempo de indisponibilidade do equipamento. Com uma boa distribuição dos sensores no reator sob ensaio, esse trabalho mostrou-se altamente satisfatório, demonstrando que a localização do ponto de origem das atividades acústicas fosse realmente o ponto sob falha detectada através do AGD e medição de DPs.

**PALAVRAS-CHAVE**

Reator de potência, descargas parciais, emissão acústica, análise de gases dissolvidos, manutenção preditiva.

**1.0 INTRODUÇÃO**

Em função do aumento populacional e do crescimento do setor industrial, faz-se necessário um melhor planejamento da expansão da geração e consequentemente construção de novas linhas de transmissão. O sistema de transmissão de FURNAS abrange atualmente 76 subestações, sendo 55 próprias e 21 sob o regime de parcerias, por meio de SPEs.

Em razão das dimensões continentais brasileiras, extensas linhas de transmissão são requeridas no processo de interligação do SIN - Sistema Interligado Nacional, fazendo com que surjam efeitos capacitivos indesejáveis e com isso se faz necessário um projeto eficaz de correção, como por exemplo, a instalação de reatores. O reator shunt será o responsável pelo fornecimento de energia reativa indutiva fazendo com que haja compensação da carga capacitiva dessas extensas linhas de transmissão, anulando parcialmente o efeito capacitivo, facilitando o controle de tensão.

Visando melhores práticas de manutenção e confiabilidade dos seus ativos, Furnas adota como manutenção preditiva, o acompanhamento periódico dos seus reatores através da análise cromatográfica do óleo isolante.

O acompanhamento dos gases dissolvidos em óleo isolante é um meio eficaz de diagnóstico de falhas incipientes em ativos como reatores e transformadores.

**2.0 TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICOS UTILIZADAS**

**2.1. Análise de Gases Dissolvidos**

A análise de gases dissolvidos no óleo isolante (combustíveis ou não) é resultante do processo de decomposição de materiais dielétricos e outros, encontrados de forma parcial ou totalmente diluídos no óleo isolante.

Por meio da técnica analítica denominada cromatografia, é possível fazer identificação de compostos no óleo que podem indicar a presença de defeitos ou falhas associadas aos materiais dielétricos envolvidos nos sistemas de equipamentos elétricos. Por meio da análise de gases dissolvidos no óleo isolante, também é possível determinar condições de operação adequadas aos equipamentos, bem como seu monitoramento.

Os reatores podem gerar gases durante sua vida útil em função de eventos relacionados à corrente e tensão circulante. Geralmente são detectados os seguintes gases: hidrogênio (H<sub>2</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A concentração, proporção e taxa de geração desses gases são utilizadas como ferramentas de determinação de falhas, que podem ser de origem elétrica ou térmica (ver Figura 1).



Figura 1 - processo de AGD

## 2.2. Detecção e medição de Descargas Parciais

**Método Elétrico de medição de DP:** Se baseia em mensurar uma queda de tensão sobre uma impedância conhecida, com medições quantificadas em *pico coulombs* (pC) e no caso específico, utilizando o tap capacitivo da bucha de alta tensão (H1) como conexão para o equipamento, conforme IEC 60270 (ver Figura 2).

É uma técnica eficaz em condições laboratoriais e que apresenta alguns fatores de dificuldade quando da realização em campo, muito em função de fontes de ruídos, porém, com o avanço tecnológico e das técnicas multiprocessadas de separação de sinais, a medição de DP no interior de subestações tornou-se uma realidade.

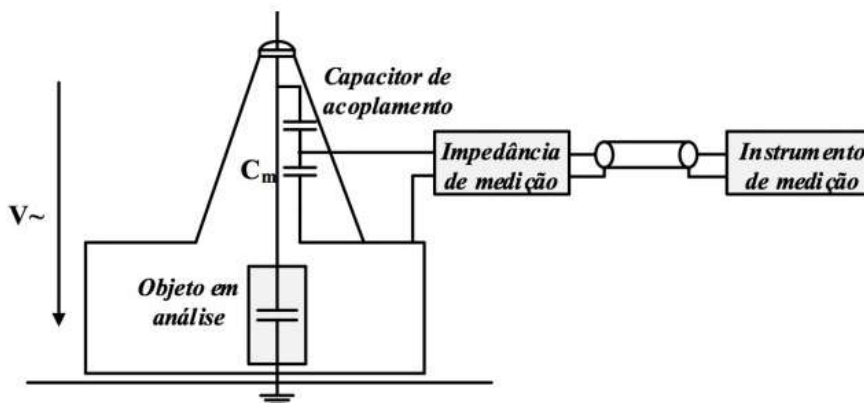


Figura 2 - utilização do tap capacitivo da bucha H1 para medição (Editado da IEC 60270)

**Método não convencional de detecção de DP:** Consiste na utilização de um transformador de corrente de alta frequência (HFCT - *High Frequency Current Transformers*), acoplado a um osciloscópio através de um cabo coaxial (ver figura 3) e que possui boa sensibilidade para detecção de pulsos elétricos.

Devido sua isolamento galvânica do circuito sistema elétrico, os ensaio é realizado sem necessidade de desligamento do equipamento sob ensaio, permitindo ensaios *on-line* diretamente no cabo de aterramento do equipamento.

Este método é utilizado para detecção de DP, não sendo possível sua quantificação em pC.





Figura 3 - HFCT - High Frequency Current Transformers e Osciloscópio

Sinais elétricos de alta frequência que apresentam características de frente de onda lenta e decaimento bastante amortecido, com várias oscilações, são interpretados como sinais oriundos de interferência eletromagnética externa (ver Figura 4).

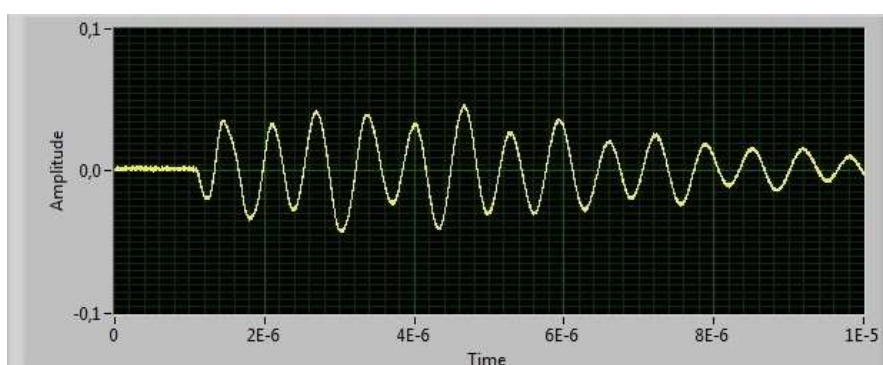


Figura 4 - ruído causado por interferência eletromagnética

Sinais elétricos de alta frequência que apresentam frente de onda rápida e decaimento quase instantâneo, são decorrentes de DPs, sinalizando para equipamentos com possíveis anomalias dielétricas (ver Figura 5).

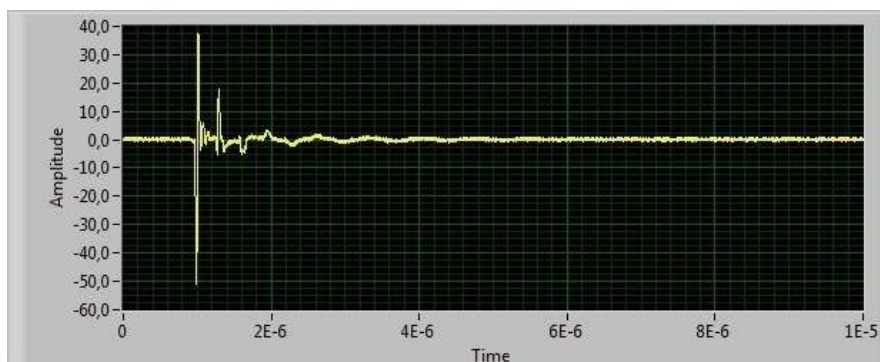


Figura 5 - sinal oriundo de DP

### 2.3. Emissão Acústica

É uma técnica de Ensaio Não Destrutivo (END), não invasiva e de grande utilidade na detecção de defeitos internos em equipamentos.

Dentre as vantagens que apresenta em relação às demais técnicas existentes pode-se destacar: a sua facilidade de aplicação, a possibilidade de realização dos ensaios com o equipamento em operação, eliminando a necessidade de interrupções do seu funcionamento, a detecção e análise de defeitos em tempo real, sua relativa imunidade a ruídos eletromagnéticos e a possibilidade de localização tridimensional de defeitos.

Os sinais de EA são ondas mecânicas, transientes, que se propagam através do óleo isolante e da estrutura interna do equipamento, até atingir a sua superfície externa. Em ensaios de Emissão Acústica de transformadores e reatores, estas ondas são captadas e convertidas em sinais elétricos por meio de sensores piezoelétricos, montados sobre a superfície do tanque. Estes sinais são amplificados e transmitidos, através de cabos coaxiais, a um sistema de medição de Emissão Acústica, computadorizado, multicanal, onde são digitalizados e processados para identificação, quantificação e análise de suas características (ver Figura 6).

Os sensores piezoelétricos utilizados possuem frequência de ressonância em 150kHz (ver figura 7).



Figura 6 - sistema de medição de EA



Figura 7 - (a) sensor acústico, (b) base de fixação do sensor

### 3.0 Estudo de Caso

Reator de 345 kV e 35 MVar, fabricado em 2014 e instalado em Itumbiara-GO (ver figura 8).



Figura 8 - reator instalado em Itumbiara

O reator shunt opera conectado a uma linha de transmissão o tempo todo, somente pode ser desligado caso a linha seja desligada.

Como forma de manutenção preditiva, Furnas realiza a cromatografia do óleo isolante de todos os seus reatores e transformadores periodicamente, a cada seis meses.

Na cromatografia realizada em dezembro de 2018 do reator em questão, os gases encontravam-se em níveis baixos e estáveis. Após o período de seis meses, em junho de 2019 foi realizada nova cromatografia, sendo constatado aumento de gases, em especial  $C_2H_2$  (Acetileno),  $C_2H_4$  (Etileno) e  $H_2$  (Hidrogênio), indicando a presença de Descargas Parciais internas.

No mês de julho de 2019 ainda foram realizadas mais duas cromatografias, na primeira sendo constatada estabilidade na geração de gases, porém, na segunda foi novamente constatada uma evolução na geração de gases (ver Tabela).

*Tabela - análise de gases dissolvidos*

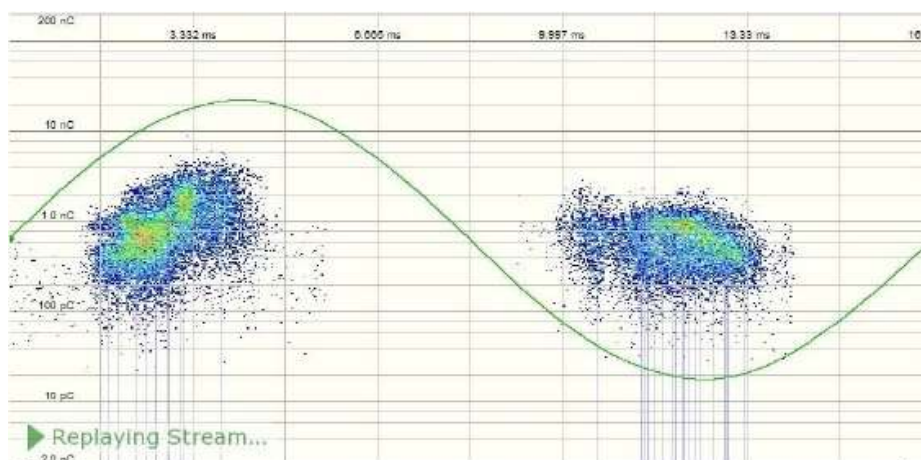
Reator shunt 345 kV - Análise de Gases Dissolvidos									
Data	C2H2 (ACETILENO)	C2H4 (ETILENO)	C2H6 (ETANO)	CH4 (METANO)	CO (MON. CARB.)	CO2 (DIOX. CARB.)	H2 (HIDROGENIO)	N2 (NITROGENIO)	O2 (OXIGENIO)
18/12/2018	0	0	1	12	303	2892	8	22321	5278
15/06/2019	19	18	2	54	464	5151	62	23475	3543
02/07/2019	14	15	3	43	340	4020	45	22137	5264
16/07/2019	19	20	4	44	355	4352	44	18342	2394

Diante de tal fato, não foram coletadas novas amostras de óleo devido ao risco de exposição próximo ao reator, além disso, a engenharia de manutenção de Furnas solicitou ao Departamento de Ensaios e Suporte à Manutenção que realizasse os ensaios complementares.

Foram realizados ensaios de medição e detecção de descargas parciais pelos métodos elétrico (IEC 60270), não convencional utilizando um HFCT e acústico que serviram de base para a realização posterior de inspeção interna. Os resultados encontrados seguem abaixo.

### 3.1. Medição de DP (IEC 60270)

DP com amplitude de 6000 pC (ver Figura 9)



*Figura 9 - DP com amplitude de 6000 pC*

### 3.2. Detecção de DP (Método não convencional) - (ver Figura 10)



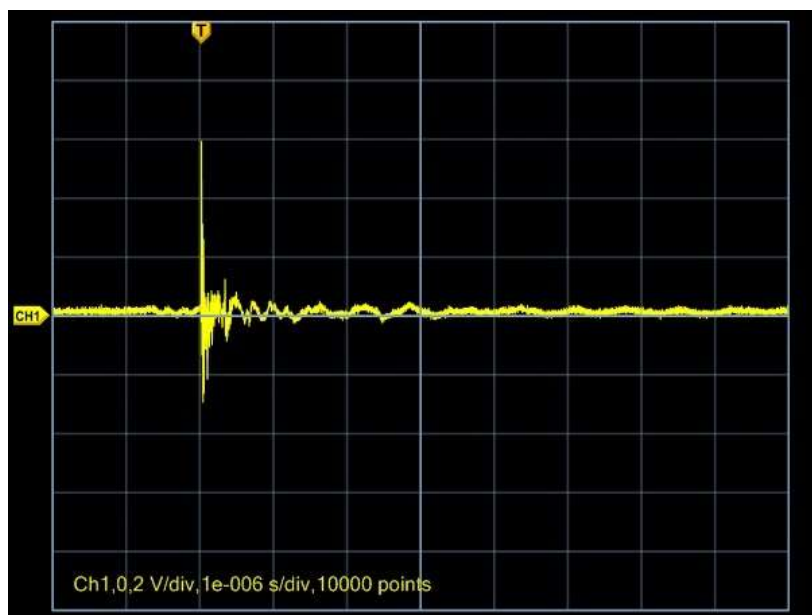


Figura 10 - pulso de DP detectado pelo aterramento do reator

### 3.3. Localização do sinal de DP pelo método de Emissão Acústica

Foram localizados dois pontos de atividades acústicas como segue (ver Figuras 11 e 12):

Localização 1: Onde há maior concentração de atividades, logo abaixo da bucha H1, sendo estes os sinais provenientes de DPs.

Localização 2: Onde há menor concentração de atividades, provenientes de vibração excessiva do painel do reator.

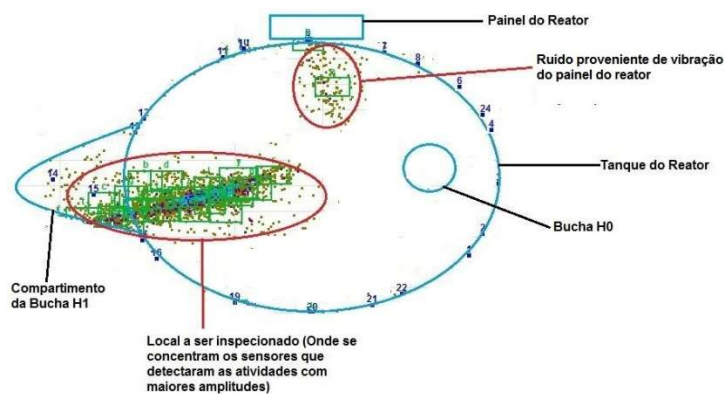


Figura 11 - vista de planta do reator

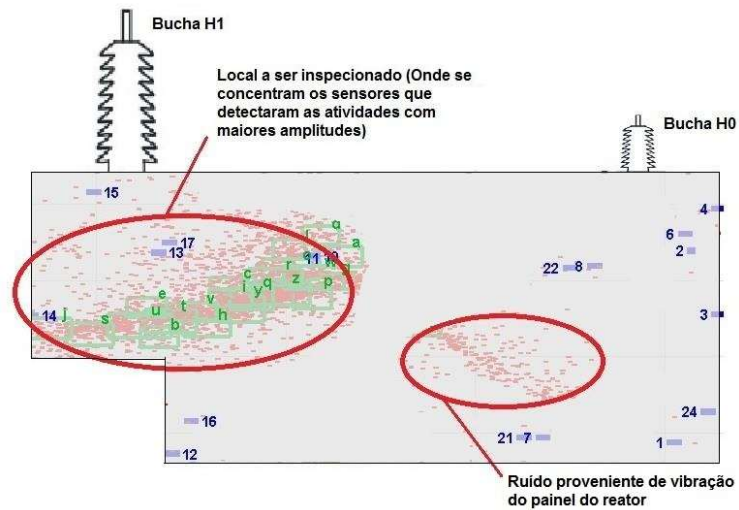


Figura 12 - vista lateral do reator

### 3.4. Inspeção interna

Durante a inspeção interna pode ser constatado que haviam partes carbonizadas dentro do *shield* anti corona da bucha H1, onde é feita a conexão entre a bucha e o enrolamento do reator (ver Figuras 13, 14, 15 e 16).

O *shield* foi enviado para o fabricante para reparo e retornou, sendo novamente instalado na mesma bucha. Durante o período de reparo, o banco de reatores operou com o reserva substituindo a fase com problema.



Figura 13 - *shield* anti corona instalado na bucha



*Figura 14 - shield anti corona com marcas de carbonização*



*Figura 15 - shield anti corona com marcas de carbonização*





*Figura 16 - shield anti corona com marcas de carbonização*

#### 4.0 Conclusão

A medição e detecção de DP pelos métodos elétrico e método não convencional foram de difícil realização e análise, pois este tipo de ensaio em campo apresenta alto grau de dificuldade devido à presença acentuada de fontes diversas de interferências (ruídos) que podem atrapalhar todo o processo de medição.

Os resultados foram considerados satisfatórios e serviram de parâmetro para a tomada de decisão da engenharia de manutenção no sentido de evitar perdas de receita e insegurança ao sistema interligado nacional.

A fim de mitigar possíveis erros de medição, a equipe de ensaio fez todo o levantamento do ruído ambiente presente na instalação, onde é possível identificar previamente sinais que serão descartados durante os ensaios, separando dessa forma o ruído de fundo do sinal de DP.

Furnas nos últimos anos investiu na aquisição de tecnologia de ponta para medição de descargas parciais e treinamento de pessoal.

A aplicação da técnica de AGD como forma de manutenção preditiva, se mostra de suma importância e grande eficácia para a detecção de falhas incipientes nos ativos como, transformadores e reatores, que são em grande parte os ativos de maior custo em uma subestação.

O ensaio de Emissão Acústica teve grande importância e êxito no estudo de caso demonstrado. Através da localização assertiva do ponto de falha, a inspeção interna pode ser refinada e direcionada, reduzindo assim o tempo necessário para o trabalho, além de expor o reator aberto pelo menor tempo possível, evitando a entrada de umidade.

#### 5.0 Bibliografia

- (1) Azevedo, C.H.B.; Marques, A.P.; Ribeiro, C.J.; XX SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica) - Requisitos e procedimentos para a melhoria na detecção descargas parciais pelo método de emissão acústica
- (2) Ilias, H.; Yuan, T.S.; Bakar A.H.A.; Mokhlis, H.; 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)
- (3) Azevedo, C.H.B.; Metodologia para a eficácia da detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção em transformadores de potência imersos em óleo isolante (Programa de pós-graduação Universidade Federal de Goiás - 2009)
- (4) Filho, G.L.; Carneiro, J.C.; XVII SENDI 2008 (Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica)
- (5) Dias, I.M.; Nunes, A.F.; Oliveira, H.B.; IX WORKSPOT (Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos de Transmissão e Distribuição, Subestações, Materiais e Tecnologias Emergentes)

- (6) ABNT NBR-IEC 60270:2015 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Medição de descargas parciais
- (7) ABNT NBR 15633:2020 - Ensaios não destrutivos - Emissão acústica - Detecção e localização de descargas parciais e anomalias térmicas e mecânicas (DPATM) em transformadores de potência e reatores isolados a óleo
- (8) ABNT NBR 5356-6:2014 - Transformadores de potência, Parte 6: Reatores

## DADOS BIOGRÁFICOS



ALESSANDRO FREIRE NUNES. Engenheiro Eletricista formado pelo Centro Universitário Claretiano - CEUCLAR (2018), possui pós-graduação em Sistemas de Potência pela Universidade Educa Mais - UNIMAIS (2021). Ingressou em Furnas Centrais Elétricas no ano de 2000, atuando como operador de sistemas elétricos. No ano de 2011 foi transferido para Departamento de Ensaios e Suporte à Manutenção (DES.O), atuando de forma direta na execução/análise de ensaios especiais em equipamentos de transmissão. Dentre estes destaca-se a aplicação da técnica de Medição de Descargas Parciais e Emissão Acústica na identificação/avaliação de falhas incipientes em Transformadores de Potência e Reatores e Subestações Blindadas (GIS).



IVAIR DE MATOS DIAS - Engenheiro Eletricista formado pela Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG (2006). Ingressou em Furnas no ano de 2000, atuando como operador de Usina Hidroelétrica. No ano de 2010 foi transferido para o Departamento de Ensaios e Suporte à Manutenção (DES.O), atuando na área de metrologia até o ano de 2016 e posteriormente passando a atuar na execução/análise de ensaios especiais em equipamentos de transmissão. Dentre estes destaca-se a aplicação da técnica de Medição de Descargas Parciais e Emissão Acústica na identificação/avaliação de falhas incipientes em Transformadores de Potência e Reatores e Subestações Blindadas (GIS).



Hamilton Batista de Oliveira - Engenheiro Eletricista formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC/MG (2002), possui pós-graduação em Manutenção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (2011) e MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas - FGV (2020). Trabalhou na TOSHIBA DO BRASIL S/A, na área de ensaios elétricos em transformadores e reatores (1995 a 2004). Desde 2004 trabalha em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, onde atuou como engenheiro especialista na área de ensaios elétricos em equipamentos de transmissão (2004 a 2013). Atualmente gerencia a Divisão de Ensaios e Apoio à Manutenção em FURNAS.