

# Energia Elétrica e Sustentabilidade 2

Jaqueline Oliveira Rezende  
(Organizadora)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE**

(Organizadora)

# **Energia Elétrica e Sustentabilidade**

## **2**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b> <b>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Energia Elétrica e Sustentabilidade; v. 2)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-46-8 DOI 10.22533/at.ed.468180110  1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira.  CDD 338.4
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

**Jaqueline Oliveira Rezende**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROKINÉTICOS ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ	
<i>Marcos Aurélio de Araujo</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
TROCADOR DE CALOR – INOVAÇÃO NO AQUECIMENTO DE ÁGUA, FUNCIONAMENTO, RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM TECNOLOGIAS SEMELHANTES	
<i>Odair Deters</i>	
<i>Paulo Valdocci Pereira</i>	
<i>Valério Monteiro</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES SMART GRIDS	
<i>João Batista Rosolem</i>	
<i>Danilo César Dini</i>	
<i>Claudio Antonio Hortêncio</i>	
<i>Eduardo Ferreira da Costa</i>	
<i>Rivael Strobel Penze</i>	
<i>João Paulo Vicentini Fracarolli</i>	
<i>Carlos Alexandre Meireles Nascimento</i>	
<i>Vítor Faria Coelho</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
PORTAL OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS ESPECIAIS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DA CONFORMIDADE E DA CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Rafael Cassiolato de Freitas</i>	
<i>Sadi Roberto Schiavon</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>46</b>
MODERNIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>62</b>
OPERAÇÃO REMOTA DE USINAS PELO CENTRO DE OPERAÇÃO DA GERAÇÃO DA ELETROBRAS ELETRONORTE	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Juliano Cortes de Souza</i>	
<i>Leonardo Siqueira Rodrigues</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>70</b>
ABORDAGEM DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA MODELAGEM PREDITIVA DE EMISSÕES DE NOX E CO DE UMA TURBINA A GÁS DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO	
<i>Eduardo Massashi Yamao</i>	
<i>Juliano Pierezan</i>	

*João Paulo Silva Gonçalves*  
*Marcos Cesar Gritti*  
*Luís Gustavo Tomal Ribas*  
*Flávio Chiesa*  
*Victor Manuel Lopes dos Santos*  
*Marcos de Freitas*  
*André da Silva Orlandi*  
*Leandro dos Santos Coelho*

**CAPÍTULO 8 ..... 82**

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

*Hugo Rafael Freitas Negrão*  
*Fernando de Souza Brasil*  
*Bárbara Medeiros Campos*  
*Maria Emília de Lima Tostes*  
*Jorge Augusto Siqueira Tostes*  
*Paulo Roberto Moutinho de Vilhena*

**CAPÍTULO 9 ..... 96**

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

*Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão*

**CAPÍTULO 10 ..... 113**

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

*José Ezequiel Ramos*  
*Alexandre Piantini*  
*Ary D'Ajuz*  
*Valdemir Aparecido Pires*  
*Paulo Roberto de Oliveira Borges*

**CAPÍTULO 11 ..... 126**

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

*Alcebíades Rangel Bessa*  
*Lucas Frizera Encarnação*  
*Paulo José Mello Menegáz*

**CAPÍTULO 12 ..... 143**

IMPLANTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA 230KV CIRCUITO DUPLO DA COPEL

*Márcio Tonetti*  
*Ilmar da Silva Moreira*  
*João Nelson Hoffmann*

**CAPÍTULO 13 ..... 153**

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

*Guilherme Hideki Shibukawa*  
*Eric Eduardo Goveia Pandolfo*  
*Ricardo Andreola*  
*Emerson Charles Martins da Silva*

**CAPÍTULO 14 ..... 168**

TARIFAS HORÁRIAS PARA SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O SINAL LOCACIONAL

*Marcio Andrey Roselli*  
*André Meister*

*Denis Perez Jannuzzi  
Robson Kuhn Yatsu  
André Veiga Gimenes  
Miguel Edgar Morales Udaeta*

**CAPÍTULO 15..... 178**

AVALIAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO MERCADO BRASILEIRO (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza  
Maurício Barreto Lisboa  
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

**CAPÍTULO 16..... 185**

AVALIAÇÃO DO MÉTODO INDEPENDENTE DE MEDIÇÃO DE PERTURBAÇÕES RADIADAS – ANEXO B DA CISPR 15 (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza  
Maurício Barreto Lisboa  
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

**CAPÍTULO 17 ..... 193**

PADRÕES DE QUALIDADE PARA SERVIÇOS DE PINTURA ANTICORROSIVA APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO

*Alberto Pires Ordine  
Cristina da Costa Amorim  
Marcos Martins de Sá  
Elber Vidigal Bendinelli*

**CAPÍTULO 18..... 209**

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

*Cristina da Costa Amorim  
Alberto Pires Ordine  
Marcos Martins de Sá  
Wendell Porto de Oliveira*

**CAPÍTULO 19 ..... 221**

ANÁLISE DE QUASE-ACIDENTES, OCORRIDOS NA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO, COMO MEIO EFICAZ E PROATIVO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES

*Cristiano José Gober  
Cresencio Silvio Segura Salas*

**CAPÍTULO 20 ..... 235**

PORTAL R3E COMO FERRAMENTA INDUTORA E DISSEMINADORA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

*Clara Ovídio de Medeiros Rodrigues  
Marcelo Bezerra de Melo Tinoco  
Aldomar Pedrini  
Edison Alves Portela Junior  
João Queiroz Krause  
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira  
Fernando Pinto Dias Perrone*

**CAPÍTULO 21..... 246**

HIERARQUIA DAS NECESSIDADES E RESILIÊNCIA NO PAGAMENTO DE SERVIÇOS PÚBLICOS UTILIZADOS: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO A ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

*Ana Lúcia Rodrigues da Silva  
Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.  
Carolina Rodrigues de Almeida Prado*

**CAPÍTULO 22 ..... 258**

PROJETO PILOTO PARCELAMENTO PRÓ-ATIVO DE DÉBITOS DE IRREGULARIDADE

*Diego Rivera Mendes*

*Julio Eloi Hofer*

*Rafael Luís de Avila*

**CAPÍTULO 23 ..... 267**

MODELAGEM ESTRATÉGICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ANTECIPAÇÃO DO ATENDIMENTO AO CLIENTE PARA A MELHORIA OPERACIONAL E DE SERVIÇOS

*Carlos Alberto Fróes Lima*

*Anderson Diego Machiaveli*

*Luciano E. A. Peres*

*Tales Neves Anarelli*

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 287**

## A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

**Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão**

Eletronorte – Eletronorte Belém – Pará

**RESUMO:** A energia elétrica provém do sistema elétrico, onde transformadores e reatores são utilizados para interligar os sistemas da geração à distribuição, fazendo a alteração e o controle dos níveis de tensão, respectivamente.

Estes equipamentos representam uma parte significativa dos investimentos. E falhas nestes resultam em elevados índices de indisponibilidade, uma vez que: nem sempre se dispõe de unidade reserva; o custo de aquisição é elevado; os equipamentos são produzidos especificamente para uma determinada instalação, não sendo fabricados em série; os prazos envolvidos no reparo, fabricação e transporte são ordem de meses.

Dessa forma o acompanhamento e a monitoração de suas condições, desde a fabricação até a retirada de operação, são essenciais para que se reduzam os custos associados ao seu ciclo de vida, e possa garantir sua confiabilidade e durabilidade.

Um levantamento elaborado entre 2000 e 2008 para companhias seguradoras do setor elétrico brasileiro, aponta que de quase cem transformadores avaliados as falhas foram: 69,9% por defeito nas bobinas, 16,3% em comutador e 10,9% em bucha. Considerando

apenas os transformadores de transmissão: 27% falharam por curto-circuito externo, 18% por defeito de fabricação, 18% por falha em bucha, 14% por falha em comutador, 9% por defeito após reparo.

Baseados nisto a Eletronorte aplicou a Análise de Resposta em Frequência (FRA), na avaliação de 44 equipamentos de 500 e 230 kV, para detectar os defeitos que podem ser diagnosticados através deste ensaio, como: deformação da bobina, falha no núcleo magnético, faltas do núcleo para a terra, conexões internas quebradas ou abertas, colapso parcial do enrolamento, espiras curto circuitadas e abertura do enrolamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Diagnóstico, Transformadores, Reatores, Análise de Resposta em Frequência.

**ABSTRACT:** The electric power comes from the electrical system, where transformers and reactors are used to interconnect the generation systems to the distribution, making the change and control of the voltage levels, respectively.

These equipment represent a significant part of the investments. And failures in these results in high indices of unavailability, since: there is always a reserve unit; the cost of acquisition is high; the equipment is produced specifically for a particular installation and is not manufactured in series; the deadlines involved in the repair,

manufacturing and transportation are order of months.

In this way, the monitoring and monitoring of its conditions, from the manufacturing to the withdrawal of operation, are essential to reduce the costs associated with its life cycle, and to guarantee its reliability and durability.

A survey carried out between 2000 and 2008 for insurance companies in the Brazilian electric sector, indicates that of almost 100 transformers evaluated the failures were: 69.9% by default in the coils, 16.3% in the commutator and 10.9% in the bushing. Considering only the transmission transformers: 27% failed by external short circuit, 18% by manufacturing defect, 18% by bushing failure, 14% by switch failure, 9% by defect after repair.

Based on this, Eletronorte applied the Frequency Response Analysis (FRA), in the evaluation of 44 500 and 230 kV equipment, to detect the defects that can be diagnosed through this test, such as: deformation of the coil, failure of the magnetic core, faults from the core to the ground, broken or open internal connections, partial winding collapse, short circuit turns and winding opening.

**KEYWORDS:** Diagnostic, Transformers, Reactors, Frequency Response Analysis.

## 1 | INTRODUÇÃO

Análise de resposta em frequência consiste em medir a função de transferência do equipamento, através da aplicação de um sinal senoidal de baixa tensão com frequência variável em um terminal do equipamento e medição do sinal transferido aos demais terminais.

Essas medidas podem ser usadas para detectar defeitos elétricos e mecânicos do equipamento, através da comparação entre a função de transferência obtida com assinaturas de referência, onde diferenças podem indicar um dano que pode ser investigado usando outras técnicas ou uma inspeção interna. ver Figura 1.

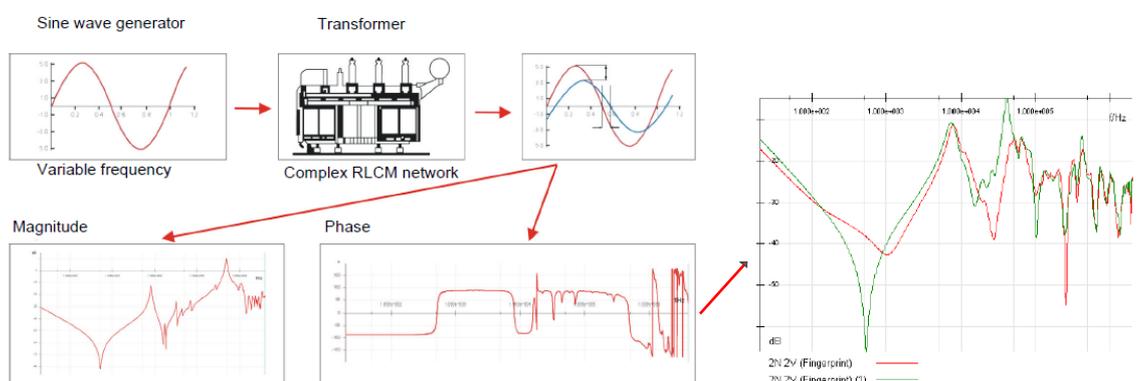


FIGURA 1 – Análise de Resposta em Frequência.

Fonte: Manual Franalyzer - Omicron

## 2 | IMPLANTAÇÃO

A implantação da técnica dentro da Eletronorte passou por quatro etapas distintas, descritas resumidamente a seguir:

- Estudo, que envolveu a pesquisa da técnica e de todas as vantagens e desvantagens que ela possui;
- Aquisição, que levou em consideração o custo x benefício dos instrumentos disponíveis no mercado;
- Capacitação, que qualificou profissionais a nível de execução e de análise;
- Aplicação, que englobou medição, diagnóstico e a consolidação de todo processo.

### 2.1 Estudo:

O circuito equivalente de um transformador/reator é composto de resistências, indutâncias e capacitâncias provenientes dos enrolamentos, assim como capacitâncias entre espiras, entre bobinas e destas para o tanque. Este circuito possui uma característica única de resposta em frequência, que funciona como uma impressão digital de cada equipamento. Desta forma, qualquer dano interno na sua estrutura, tanto na parte ativa (enrolamento e núcleo) como na parte passiva (estrutura, suportes, tanque, etc.), afeta diretamente os parâmetros deste circuito equivalente, e altera a resposta em frequência deste circuito, que comparado com a resposta original pode evidenciar a falha.

A função de transferência pode ser obtida pela relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, onde a amplitude desta relação é dada por  $k(\text{dB})=20.\log_{10}(V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$  e a fase é dada por  $k(\text{dB})=20.\log_{10}(V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$ .

Outra medição importante é relação entre a tensão de entrada e a corrente de entrada em função da frequência, onde pode-se obter a função impedância  $\frac{V_{\text{in}}}{I_{\text{in}}}(f)$  e a função admitância  $\frac{I_{\text{in}}}{V_{\text{in}}}(f)$ .

A avaliação dos resultados, baseada na comparação de diferentes representações gráficas dos elementos testados, pode ser realizada em três faixas distintas de frequência:

- Baixas frequências (inferior a 2kHz): problemas relacionados com ocorrências no núcleo. A avaliação deve levar em consideração o magnetismo residual nos circuitos magnéticos;
- Médias frequências (2kHz a 1 MHz): problemas relacionados a modificações na geometria, abertura e curto-circuito nos enrolamentos;
- Altas frequências (acima de 1 MHz): problemas relacionados com alteração de conexões de buchas, enrolamentos, comutadores e outros.

A Figura 2 mostra que nas médias frequências há uma subdivisão onde pode ser observada a interação entre os enrolamentos e a estrutura propriamente dita dos enrolamentos.

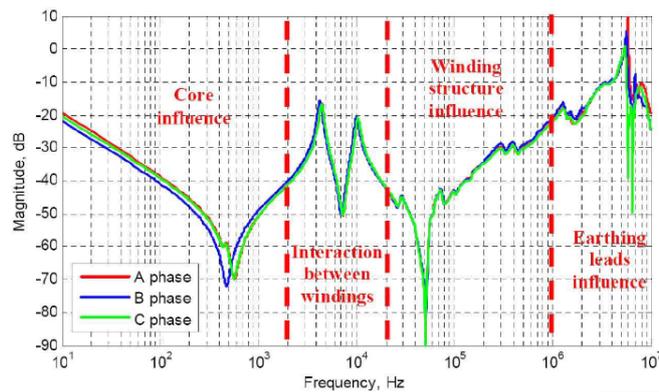


FIGURA 2 – Interpretação das escalas

Fonte: Princípios de Avaliação de Resultados – MP

As assinaturas podem ser comparadas:

- Com base no tempo – medições do mesmo equipamento em períodos de tempo distintos, sendo esta a comparação que apresenta um diagnóstico mais preciso;
- Com base nas fases – uma vez que os enrolamentos das três fases são fabricados com características muito similares;
- Com base em unidades “irmãs” – equipamentos fabricados em série e que apresentam o mesmo projeto.

O ensaio de resposta em frequência deve ser executado: na fábrica como garantia da qualidade; quando houver transporte do equipamento; após grandes manutenções que envolvam conexões de buchas, enrolamentos e comutadores; após ocorrência de curto-circuito; na alteração de gases específicos, após detecção de anomalias em ensaios tradicionais.

## 2.2 Aquisição:

Para aquisição do instrumento de teste, levou-se em consideração, além do custo, os recursos oferecidos pelos equipamentos disponíveis no mercado da época. Sendo fatores determinantes nesta escolha: a ampla faixa de variação de frequência; o sistema de aterramento usado para minimizar interferências externas; o fato do instrumento ter a capacidade de também medir a impedância terminal; e principalmente a disponibilidade de um algoritmo de análise dos resultados baseado na única Norma disponível no momento.



FIGURA 3 – Franalyzer.

Fonte: Manual Franalyzer – Omicron

## 2.3 Capacitação:

Um treinamento operacional para sete pessoas fazia parte do fornecimento do instrumento. Foram capacitados então um grupo de engenheiros de manutenção que seriam responsáveis pela execução e análise dos ensaios e posteriormente fariam a replicação do conhecimento dentro da empresa.

No entanto, ainda durante o treinamento, identificou-se que apesar de teoricamente se tratar de um ensaio simples de execução, sua análise demandava uma expertise que só seria adquirida com o tempo e estudo aprofundado sobre o tema.

## 2.4 Aplicação:

### 2.4.1 Medição:

Como o diagnóstico de resposta em frequência é baseado em comparações, o passo seguinte, após a capacitação, era iniciar as medições para criar um banco de dados com as assinaturas de cada equipamento de nossas instalações. A partir daí novas medições seriam realizadas somente quando fosse necessário um diagnóstico específico sobre cada equipamento.

As primeiras medições foram realizadas nos equipamentos reservas, pois estes já se encontravam fora de operação. Percebeu-se nesta etapa que existe uma infinidade de fatores que podem interferir na repetibilidade do ensaio e, conseqüentemente prejudicar o diagnóstico, tais como:

- Condição do equipamento – temperatura, condição do óleo e papel, posição do comutador, aterramentos de neutro e núcleo, etc.;
- Fatores estocásticos – ambiente eletromagnético, remanência, etc.;
- Testador e instrumento – cabos de medição, pontos de injeção, arranjo dos cabos de medição, etc.

Para contornar parte destes fatores foi necessário utilizar um formulário com algumas informações básicas sobre o teste, como: dados do equipamento, posição do comutador, grupo fasorial, tipo de núcleo, temperatura do óleo, motivo do teste, etc. E assim garantir a repetibilidade do ensaio sempre que fosse necessário executá-lo.

Foram realizados ensaios em 44 equipamentos de 500, 230 e 69 kV, conforme detalhado nas Tabelas 1 e 2.

Equipamento	500 kV	230 kV	69 kV	Total
Transformador	-	21	2	23
Autotransformador	6	1	-	7
Reator	10	4	-	14

Tabela 1 – Equipamentos testados por classe de tensão

Ano	Teste	Subestação	Equipamento	Tensão (kV)	Nº Série	Fabricante
2010	Assinatura	Macapá	Transformador	69	SP-9038	BBC
2010	Ensaio 1	Santana	Transformador	69	SP-9038	BBC
2009	Assinatura	Ariquemes	Transformador	230	92855	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Ariquemes	Transformador	230	92856	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Ensaio 1	Altamira	Reator	230	111195.2	AREVA
2011	Ensaio 1	Altamira	Reator	230	8929053	WEG
2008	Assinatura	Boa Vista	Reator	230	59750	ABB
2008	Assinatura	Boa Vista	Reator	230	59751	ABB
2009	Assinatura	Guamá	Transformador	230	500713	TUSA
2009	Ensaio 2	Guamá	Transformador	230	500710	WEG
2009	Assinatura	Guamá	Transformador	230	500715	TUSA
2009	Assinatura	Guamá	Transformador	230	500714	TUSA
2010	Ensaio 1	Guamá	Transformador	230	1004225601	WEG
2010	Ensaio 1	Guamá	Transformador	230	1004249537	WEG
2010	Ensaio 1	Guamá	Transformador	230	1004282510	WEG
2010	Assinatura	Imperatriz	Transformador	230	46589	COEMSA / SIEMENS
2010	Ensaio 1	Marabá	Transformador	230	46446	COEMSA
2010	Ensaio 1	Santa Maria	Transformador	230	1004165232	WEG
2010	Ensaio 1	Santa Maria	Transformador	230	1004062673	WEG
2009	Assinatura	Jirau	Transformador	230	92861	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Ensaio 1	Utinga	Transformador	230	500710	WEG
2010	Assinatura	Utinga	Transformador	230	58657	ASEA
2010	Assinatura	Utinga	Transformador	230	58658	ASEA
2010	Assinatura	Utinga	Transformador	230	58604	ASEA
2010	Assinatura	Rurópolis	Autotransformador	230	59752	ABB
2011	Assinatura	Vila do Conde	Transformador	230	91429	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Vila do Conde	Transformador	230	46435	COEMSA
2011	Assinatura	Jaru	Transformador	230	KA1793A001	TRAFO

2008	Assinatura	Colinas	Reator	500	1112061	AREVA
2008	Ensaio 1	Marabá	Autotransformador	500	217438-04	ALSTHOM / ABB
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	91430	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	93064	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/1	AREVA
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/2	AREVA
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/4	AREVA
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/3	AREVA
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91420	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91421	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91422	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Ensaio 1	Vila do Conde	Autotransformador	500	91425	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91426	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Vila do Conde	Reator	500	91439	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Ensaio 1	Vila do Conde	Reator	500	91438	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Vila do Conde	Reator	500	91440	JEUMONT SCHNEIDER

Tabela 2 – Equipamentos testados de 2008 a 2011

#### 2.4.2 Diagnóstico:

Será mostrado o estudo de caso de um autotransformador monofásico de 100 MVA – 500 / 230 / 13,8 kV que foi fabricado em 1980 e reformado em fábrica em 2002. A sequência dos fatos inicia em abril/2008, quando foram realizados ensaios de resposta em frequência e impedância terminal no equipamento para obter a assinatura do equipamento.

No final do mês de setembro do mesmo ano, houve atuação do relé diferencial (87) e relés de gás do comutador (63CSC) e do autotransformador (63). Após ensaios e inspeções foram constatados atuação da válvula de segurança do tanque principal, rompimento da membrana de alívio de pressão do comutador, presença de 367 ppm de acetileno, alteração de fator de potência, resistência ôhmica e relação de transformação.

Para enriquecer o diagnóstico, novos ensaios de resposta em frequência e impedância terminal foram realizados. As Figuras 4 a 6 mostram os pontos de injeção e coleta dos sinais, e as amplitudes das respostas em frequência obtidas.

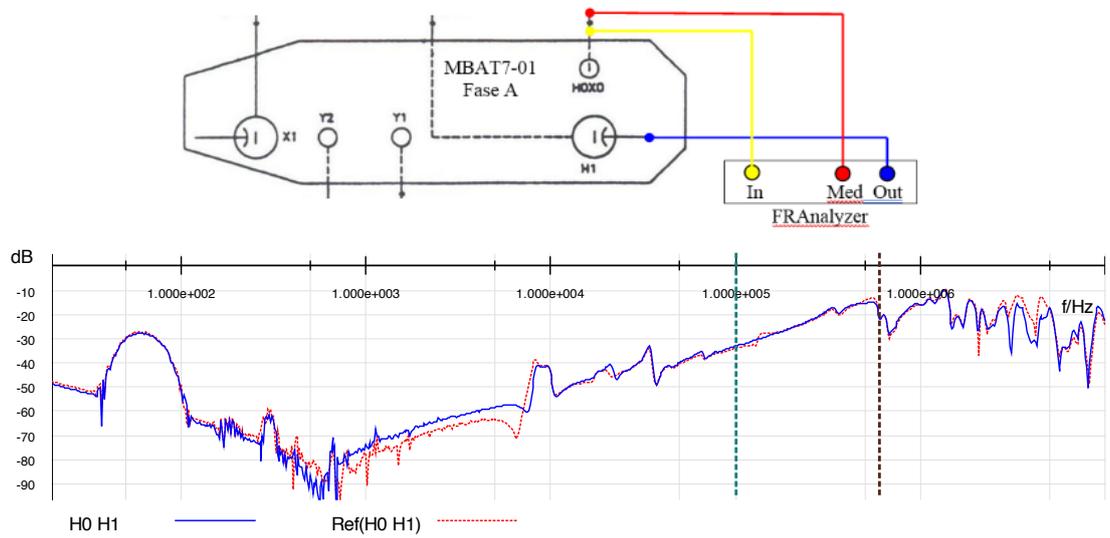


FIGURA 4 - Análise resposta em frequência no enrolamento de 500 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

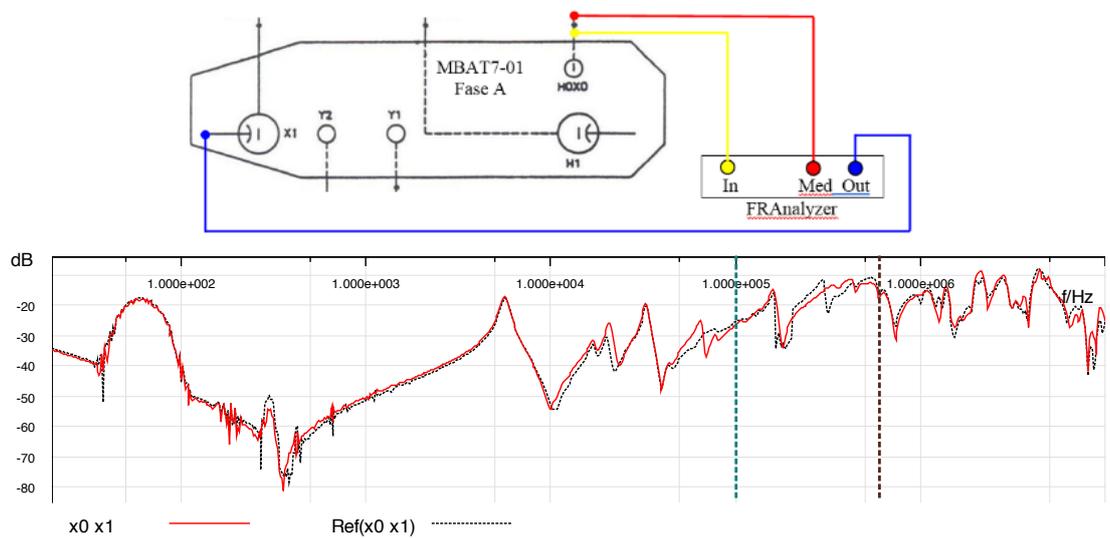


FIGURA 5 - Análise resposta em frequência no enrolamento de 230 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

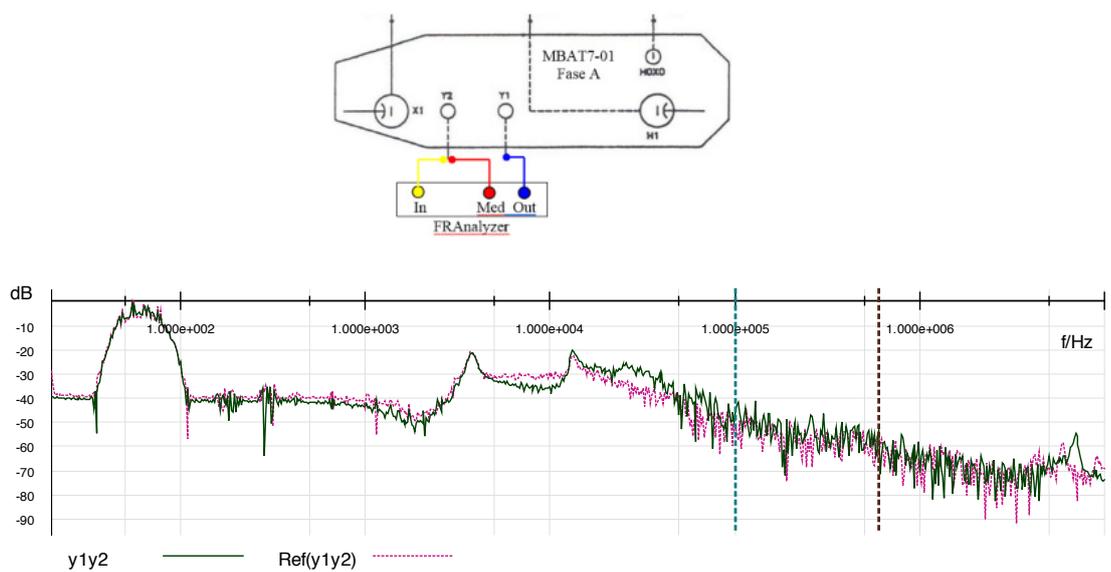


FIGURA 6 - Análise resposta em frequência no enrolamento de 13,8 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

Analisando as figuras 4 a 6, que se referem às respostas em frequências dos enrolamentos primário, secundário e terciário do autotransformador, percebe-se alterações em todos os enrolamentos. No entanto, após analisar as informações dos formulários de registro de teste, verificou-se que as medições de resposta em frequência do enrolamento terciário foram realizadas em condições diferentes. Em 04/2008 as medições foram realizadas com o enrolamento aterrado, já em 10/2008 este enrolamento foi medido sem aterramento. Por isto, para o enrolamento terciário, a análise de resposta em frequência não pôde ser levada em consideração.

As Figuras 7 a 8 mostram os pontos de injeção e coleta dos sinais, e as partes reais e imaginárias das impedâncias terminais obtidas para os enrolamentos primário, secundário e terciário do autotransformador. Percebe-se que os enrolamentos primário e secundário mostram diferenças significativas entre as medições realizadas em 04/2008 e as medições realizadas em 10/2008, indicando que havia um problema estrutural nos enrolamentos.

Já no enrolamento terciário, tais diferenças não são observadas, indicando que este enrolamento permaneceu nas mesmas condições que se encontrava na sua medição original, em 04/2008.

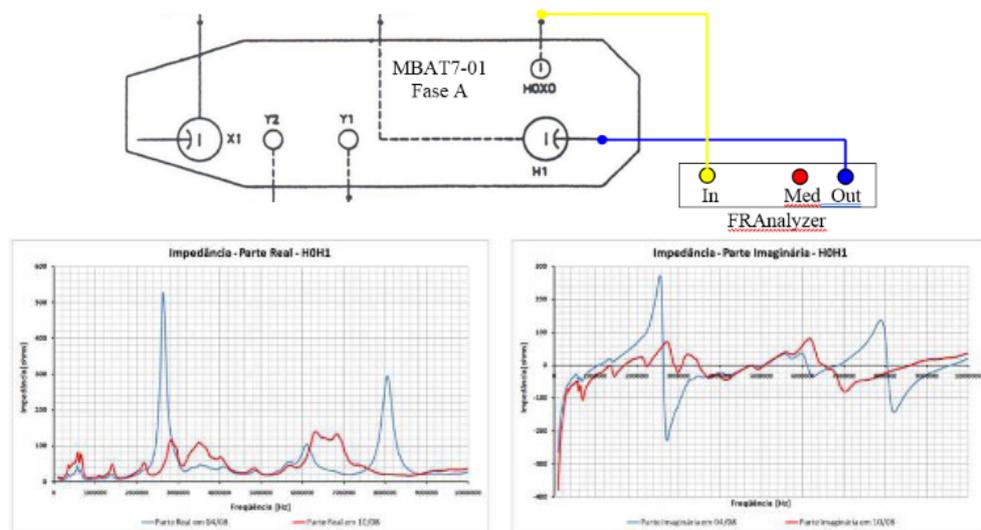


FIGURA 7 - Análise de impedância terminal no enrolamento de 500 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

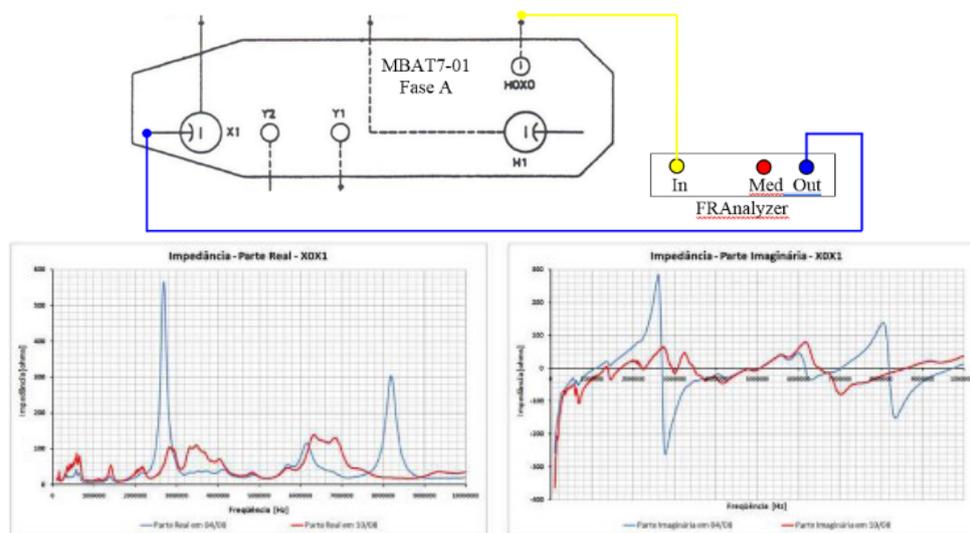


FIGURA 8 - Análise de impedância terminal no enrolamento de 230 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

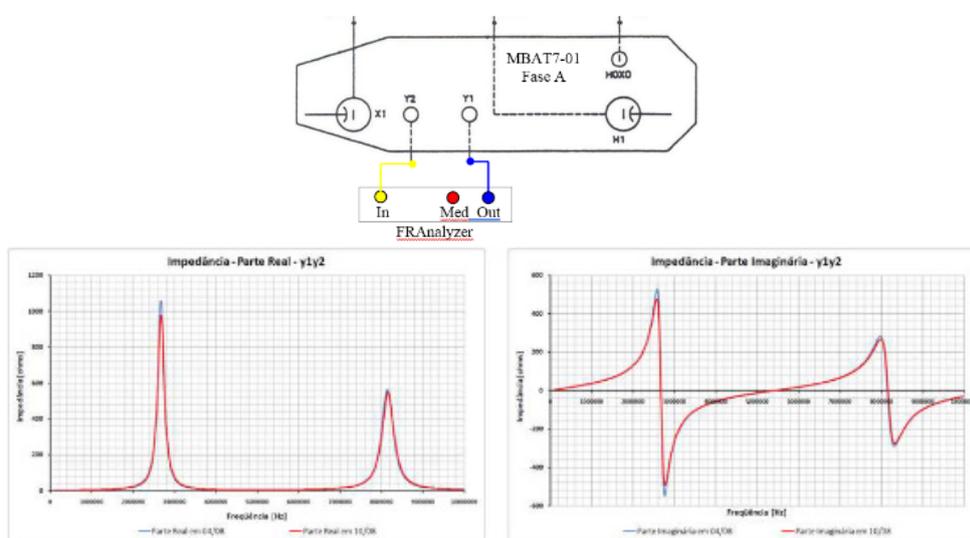


FIGURA 9 - Análise de impedância terminal no enrolamento de 13,8 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

Com base nos resultados obtidos, que apontavam haver um problema estrutural que atingia tanto o enrolamento primário quanto secundário, e no esquema de ligação do autotransformador, optou-se por fazer uma inspeção interna no equipamento iniciando pelo comutador, conforme mostra a Figura 10.

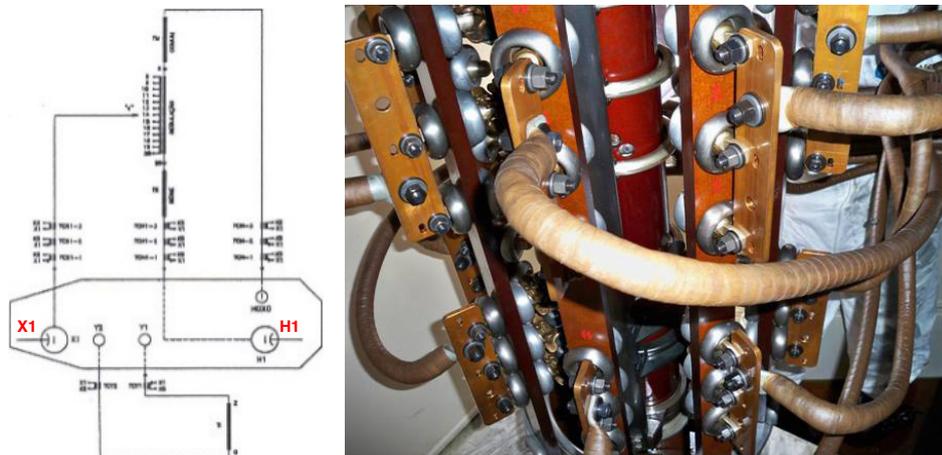


FIGURA 10 – Esquema de ligação do comutador no autotransformador.

Fonte: Adaptado de RT-VMB-2008013

A inspeção realizada no comutador, não encontrou nenhuma anomalia no cilindro de óleo nem na chave de carga, houve necessidade apenas de substituição da tampa do cilindro de óleo, que foi danificada na atuação da membrana de alívio de pressão do comutador.

Como não havia danos no comutador, decidiu-se baixar o óleo do tanque principal e inspecionar o circuito dos enrolamentos primário e secundário, onde foram constatados danos no cabo de conexão H0X0, conforme sequência de fotos da inspeção mostrada na Tabela 3.

<p>a) Vestígios de descarga elétrica e camada de papel isolante danificada</p>	<p>b) Vestígio de descarga elétrica na base do suporte isolante do condutor</p>	<p>c) Detalhe do caminho da descarga</p>
<p>d) Detalhe dos pinos isolantes de fixação do condutor</p>	<p>e) Ponto do dano na isolação do condutor</p>	<p>f) Detalhe do condutor com mais de 60% dos fios rompidos</p>

Tabela 3 – Inspeção interna no tanque principal do autotransformador

Conclui-se que, o formato dos pinos isolantes gerou o desgaste na isolação de papel do cabo condutor o que provocou o rompimento da isolação neste ponto, com a abertura de arco elétrico. Esta situação foi caracterizada, pela seguradora, como defeito oculto, uma vez que pelo histórico de manutenção não havia como identificar

tal defeito.

### 2.4.3 Consolidação:

O caso apresentado, foi somente um dos muitos que certificaram o potencial da técnica de resposta de frequência. No entanto, haviam muitas questões a serem alinhadas dentro do processo e, para resolve-las, foi criado um grupo de estudo, com uma lista de tarefas a serem cumpridas:

- a. Criar uma Instrução Técnica de Manutenção (ITM):

Com o objetivo de padronizar planejamento, execução, análise e arquivamento dos dados dos ensaios, foi elaborada uma ITM com os principais pontos a serem levados em consideração, conforme ilustra a Figura 11.



1. Objetivo
2. Campo de aplicação
3. Considerações preliminares
  - 3.1. Transformador / Autotransformador
    - 3.1.1. Monofásicos
    - 3.1.2. Trifásicos
  - 3.2. Reatores
    - 3.2.1. Monofásicos
    - 3.2.2. Trifásicos
4. Recursos para aplicação
  - 4.1. Recursos humanos
  - 4.2. Recursos materiais
5. Procedimentos de segurança

#### ÍNDICE

6. Atividades
  - 6.1. Ensaio de resposta em frequência
    - 6.1.1. Planejamento
    - 6.1.2. Execução
    - 6.1.3. Análise
  - 6.2. Ensaio de impedância terminal
    - 6.2.1. Planejamento
    - 6.2.2. Execução
    - 6.2.3. Análise
7. Arquivamento no banco de dados
8. Referências
9. Anexos

FIGURA 11 – Procedimento de ensaio de FRA.

Fonte: Adaptado de ITM-FRA-001-ELN

Um guia para testes de SFRA e IT, conforme ilustra a Figura 12, auxilia no planejamento do tempo e das condições necessárias para realização dos ensaios.

Eletrobras Energia		Guia para Testes de SFRA e IT	
Se necessário, utilize o campo Observações Adicionais, no final deste Guia			
Data da última revisão para ensaio			
Local (Estação):			
Pessoa de contato:			
Razão para o teste:			
<b>4. Dados do Transformador</b>			
Identificação			
Tipo-objeto			
Ano de fabricação			
Identificação do transformador (como dado pelo fabricante)			
Autotransformador			
Restor			
Função			
Tipo núcleo			
Dados Elétricos			
Tensão lado primário			
Tensão lado secundário			
Organização do Enrolamento			
Grupo fatorial de transformadores trifásicos			
Grupo fatorial para Autotransformadores			
Dados das buchas			
Dados do Comutador sob carga			
Arranjo			
Comutador sem carga			
<b>5. Condições de Medida</b>			
Temperatura de óleo			
Temperatura ambiente			
Nível de óleo total?			
Umidade no óleo			
Ocorrência de algum evento de alta corrente no barramento do transformador?			
Condições de operação antes da medida			
<b>6. Execução de outros teste antes das medidas a serem realizadas:</b>			
Resistência de enrolamento			
Tange da eletrodinâmica (FDS)			
Análise de Óleo (DGA, PD, Furans)			
Impedância CC			
Relação			
Corrente de magnetização			
Outros (especificar):			
<b>3. Circunstâncias especiais</b>			
Sem buchas			
Sem óleo			
Sem tanque			
Ocorreu registro sensor de impacto durante o transporte?			
<b>6. Ensaio SFRA executado anteriormente</b>			
Existem resultados de pontuais de teste anteriores de SFRA deste transformador?			
Existem testes utilizados disponíveis de teste anteriores de SFRA de transformador irmão?			
Existem transformadores irmãos na empresa?			
<b>5. Condição dos terminais durante a medida</b>			
Existem condições predeterminadas para as medidas:			
ponto de injeção			
ponto de medida			
conexão lado AT:			
Flutuando			
Curto circuito			
Curto circuito e aterrado			
Aterrado			
conexão lado BT			
Flutuando			
Curto circuito			
Curto circuito e aterrado			
Aterrado			
<b>7. Condições para a realização dos testes</b>			
O transformador estará liberado para teste por quantas horas ininterruptas após o início dos testes?			
O transformador estará totalmente desconectado do sistema (exceto aterramento)?			
A ART (anotação de responsabilidade técnica) ficará a cargo do contratante ou do executante?			
<b>8. Condições adicionais para diagnóstico de falhas</b>			
O transformador possui sistema de monitoramento?			
O sistema de monitoramento detectou alguma anomalia?			
O transformador esteve sujeito a altas correntes (falhas no sistema, correntes de inrush, chaveamentos)?			
O transformador esteve sujeito a sobretensões (falhas no sistema, chaveamentos)?			
Observações adicionais:			
Data preenchida por:			
Data:			

FIGURA 12 – Padrão de conexões do ensaio de FRA.

De acordo com a bibliografia consultada – Cigre WG A2.26 (Guide), DL 911/2004 (Standard), IEC 60076-18 (Draft) e IEEE WG PC57.149 (Guide) D8 – e, que trata sobre o circuito de medição e as conexões de SFRA, dependendo do equipamento sob ensaio, um transformador trifásico com três enrolamentos por exemplo, pode haver até 48 modos de teste, conforme ilustra a Figura 13.

Nº	In	Out	Others
	Red	Blue	
1	H0	H1	Open
2	H0	H2	Open
3	H0	H3	Open
4	X0	X1	Open
5	X0	X2	Open
6	X0	X3	Open
7	y1	y2	Open
8	y2	y3	Open
9	y3	y1	Open
10	H1	X1	Open
11	H2	X2	Open
12	H3	X3	Open
13	X1	y1	Open
14	X2	y2	Open
15	X3	y3	Open
16	H1	H0	Open

Nº	In	Out	Others
	Red	Blue	
17	H2	H0	Open
18	H3	H0	Open
19	X1	X0	Open
20	X2	X0	Open
21	X3	X0	Open
22	y2	y1	Open
23	y3	y2	Open
24	y1	y3	Open
25	H0	H1	Short-circuit
26	H0	H2	Short-circuit
27	H0	H3	Short-circuit
28	X0	X1	Short-circuit
29	X0	X2	Short-circuit
30	X0	X3	Short-circuit
31	y1	y2	Short-circuit
32	y2	y3	Short-circuit

Nº	In	Out	Others
	Red	Blue	
33	y3	y1	Short-circuit
34	H1	X1	Short-circuit
35	H2	X2	Short-circuit
36	H3	X3	Short-circuit
37	X1	y1	Short-circuit
38	X2	y2	Short-circuit
39	X3	y3	Short-circuit
40	H1	H0	Short-circuit
41	H2	H0	Short-circuit
42	H3	H0	Short-circuit
43	X1	X0	Short-circuit
44	X2	X0	Short-circuit
45	X3	X0	Short-circuit
46	y2	y1	Short-circuit
47	y3	y2	Short-circuit
48	y1	y3	Short-circuit

FIGURA 13 – Padrão de conexões do ensaio de FRA.

Fonte: Autoria própria

No entanto, realizar todas estas medidas, demandaria um tempo excessivo de indisponibilidade do equipamento, e por este motivo foi adotado, para este tipo de equipamento, um padrão reduzido de medições, conforme ilustra a Figura 14, mas estas conseguem caracterizar de forma satisfatória o equipamento sob análise.

Traces						
Name	Red	Blue	Tap Changer	Tertiary Winding	Other Windings	
H0 H1	H0	H1	1	closed	open	
H0 H2	H0	H2	1	closed	open	
H0 H3	H0	H3	1	closed	open	
x0 x1	x0	x1	1	closed	open	
x0 x2	x0	x2	1	closed	open	
x0 x3	x0	x3	1	closed	open	
y1 y2	y1	y2	1	closed	open	
y2 y3	y2	y3	1	closed	open	
y3 y1	y3	y1	1	closed	open	
H1 x1	H1	x1	1	closed	open	
H2 x2	H2	x2	1	closed	open	
H3 x3	H3	x3	1	closed	open	
x1 y1	x1	y1	1	closed	open	
x2 y2	x2	y2	1	closed	open	
x3 y3	x3	y3	1	closed	open	

Impedância Terminal

FIGURA 14 – Padrão de conexões do ensaio de SFRA e IT.

Outras configurações de ensaio como faixa de frequência, nº de pontos medidos e modo de teste, conforme ilustra a Figura 15, podem influenciar significativamente na resposta obtida do equipamento sob ensaio, assim é importante padronizar essas configurações e garantir com isso a repetibilidade das medidas.

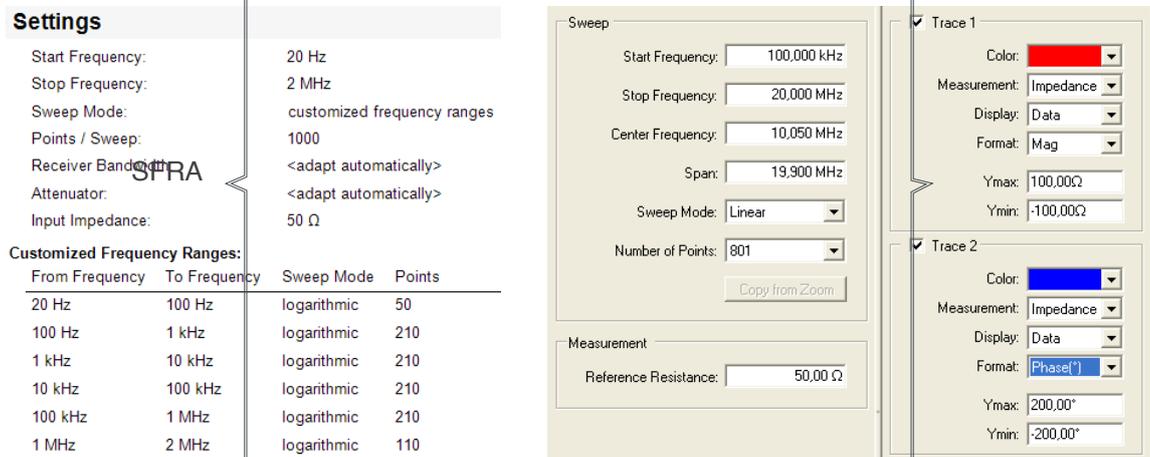


FIGURA 15 – Configurações do ensaio de SFRA e IT.

Fonte: Adaptado de Franalyzer / Bode 100 - Omicron

Com relação à análise dos ensaios, estas são baseadas na comparação das curvas medidas, e no caso específico do ensaio de SFRA, também são usados dois algoritmos de análise, NCPRI e DL 911/2004, conforme ilustra a Figura 16.

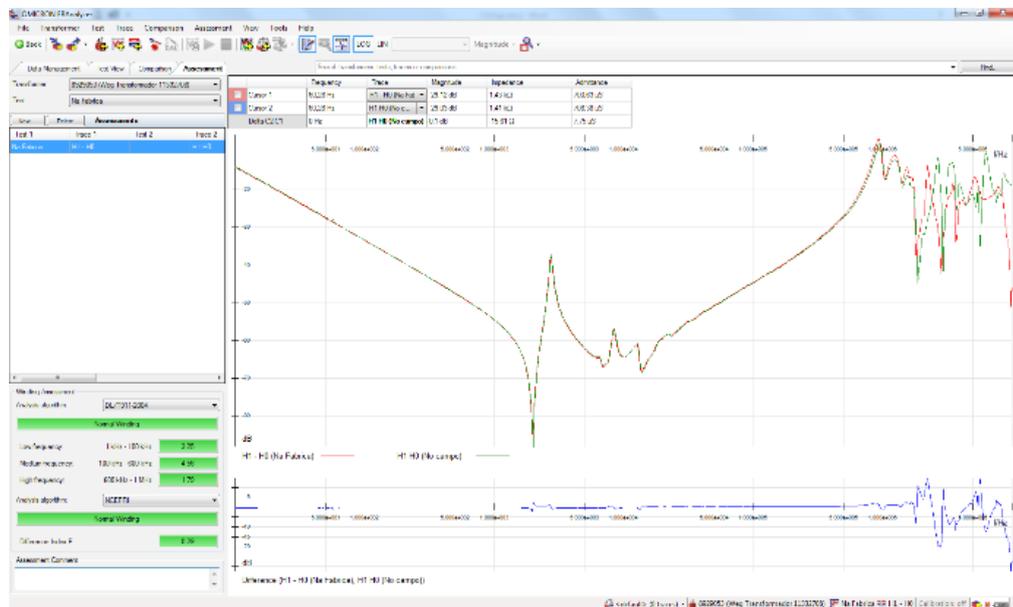


FIGURA 16 – Análise de ensaio de SFRA.

Fonte: Adaptado de Franalyzer - Omicron

O instrumento usado na medição de impedância terminal, Franalyzer – Omicron, disponibiliza os resultados no formato de arquivo “.csv”, valores separados por vírgula. Anteriormente, estes arquivos precisavam ser tratados no Microsoft Excel, para serem

transformados em gráficos e usados para o diagnóstico, isso demandava tempo e era passível de erro.

Foi criado então um script em linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) da Microsoft que gera automaticamente os gráficos das medições de impedância terminal e possibilita a comparação de duas ou três curvas medidas. A Figura 17 mostra as duas formas de análise e também *links* para a Lição Ponto a Ponto, que descreve como usar o script, e para o manual do instrumento de ensaio, facilitando o acesso a informações importantes para o responsável pelo ensaio.

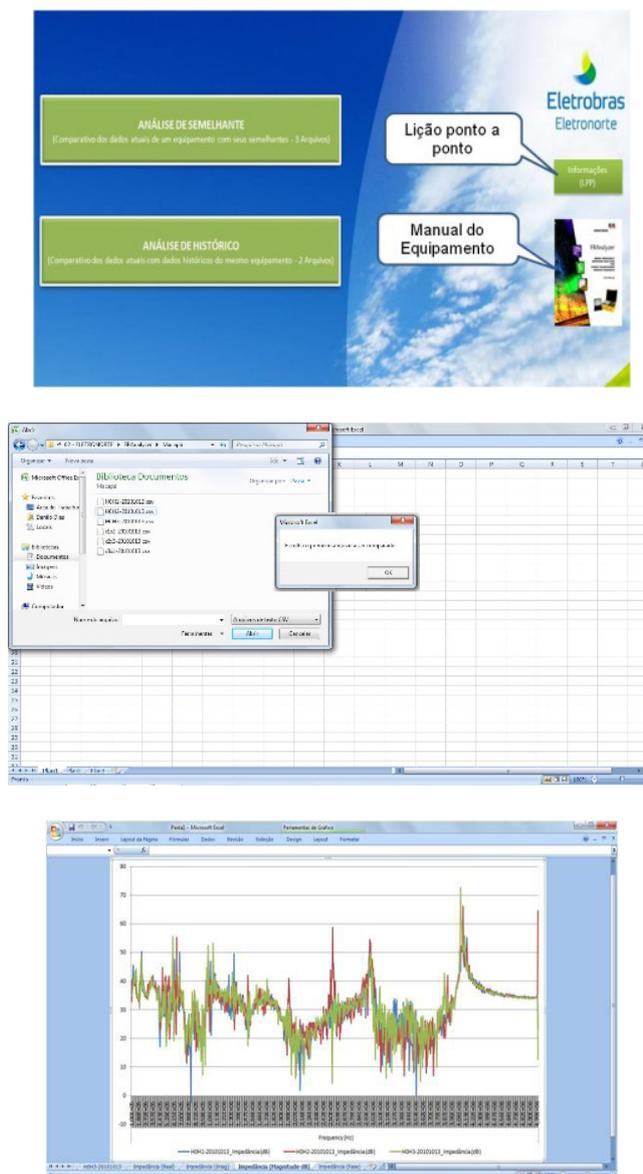


FIGURA 17 – Telas do Franalyzer Grafics.

Fonte: Franalyzer Grafics

Os relatórios foram compilados de forma a serem elaborados rapidamente e mostrar resultados concisos e diretos para uma tomada de decisão, conforme mostrado na Figura 18.

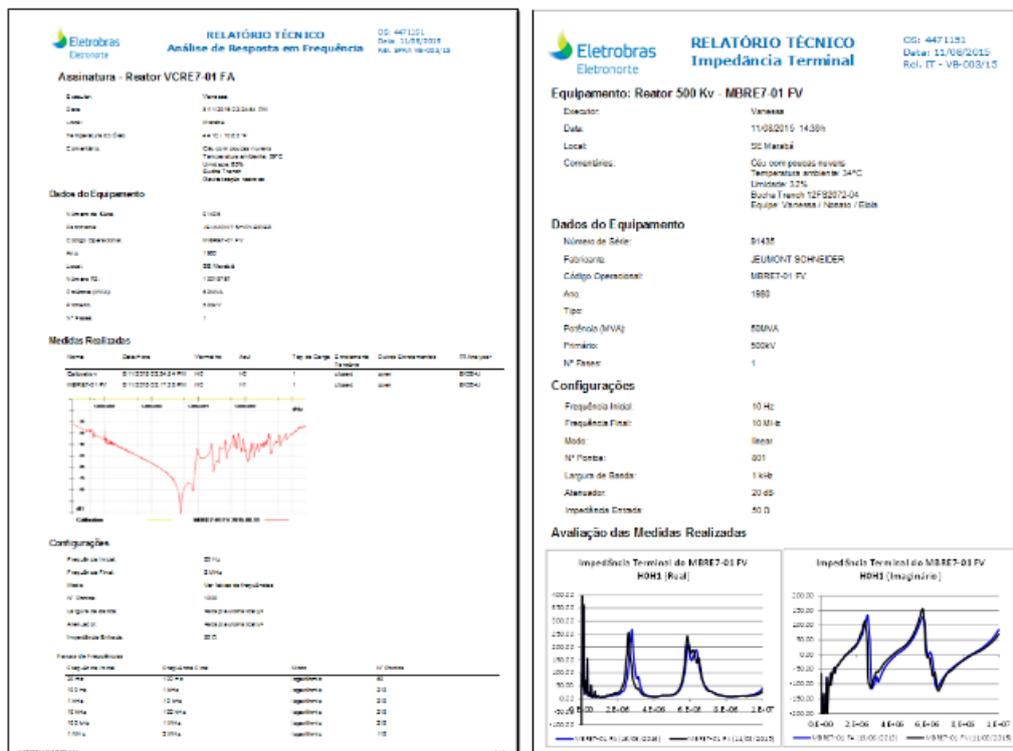


FIGURA 18 – Relatórios de SRA e IT.

Fonte: Adaptado de RT-VMB-2015003

O arquivamento dos dados de ensaios segue alguns padrões: *Medições* – “nº de Série\_Cod. Operacional\_aaaammdd” e *Relatórios* – “RT-3 iniciais-aaa sequencial”.

a. Alterar a especificação de transformadores e reatores:

Para que todos os equipamentos tivessem suas assinaturas registradas desde a fábrica, foi necessário alterar a especificação de transformadores e reatores, incluindo um item para realização do ensaio de resposta em frequência na fábrica (antes do transporte) e no campo (após sua montagem na base).

As condições de teste, configurações, quantidades de medidas, formato de relatórios e critério de aprovação são definidas em consenso com o fornecedor. Sendo uma cópia dos arquivos contendo as medidas de fábrica e de campo entregues à Eletronorte para inserção em seu banco de dados. Isto é importante, pois é com base nestas medidas que serão feitos os diagnósticos da condição destes equipamentos, durante todo o seu ciclo de vida.

b. Participar do grupo de trabalho GT D1.35 do Cigre:

Como este grupo de trabalho é responsável pelas questões referentes à FRA no Brasil, inclusive com a atribuição de elaborar normas e procedimentos, é extremamente importante a participação de pelo menos um representante no grupo e assim estar em consonância com as últimas atualizações sobre a técnica.

### 3 | CONCLUSÃO

Os ensaios de resposta em frequência e impedância terminal se mostraram uma ferramenta importante para diagnóstico de problemas elétricos e mecânicos internos aos transformadores, autotransformadores e reatores através da comparação de assinaturas.

Apesar de muitos problemas terem sido vencidos durante a implantação da técnica na Eletronorte, ainda existem muitas dificuldades que precisam ser superadas:

- Existem poucos cursos de capacitação;
- A formação de especialistas requer tempo e dedicação;
- A execução, análise e diagnósticos ainda são considerados complexos;
- Falta de padronização de forma geral, pois não existe uma Norma no Brasil.

### REFERÊNCIAS

A2.26 Working Group (CIGRÉ) – **Brochure 342 Mechanical-Condition Assessment of Transformers Windings Using Frequency Analysis (FRA)**, 2008.

Bechara, R. – **Análise de Falhas de Transformadores de Potência** – Dissertação (mestrado em Eng. Elétrica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**Jaqueline Oliveira Rezende** Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-46-8

