



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GSE/13

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE ALTA POTÊNCIA NO CEPEL

Marcelo Guimarães Rodrigues(*)
Cepel

Thiago Pereira Amorim
Cepel

Cristiano Sobreira Xavier
Cepel

Cláudio Cerqueira Siqueira
Cepel

Marcio Ferreira da Costa e Silva
Cepel

Mario Melo Gonçalves
Cepel

Robson Bianchi
Cepel

RESUMO

Neste artigo, é apresentada a análise estatística dos ensaios realizados no Laboratório de Alta Potência do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), considerando sua ocupação, os principais ensaios realizados e as principais falhas em equipamentos submetidos aos ensaios de alta tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Equipamento elétrico, ensaio de alta potência, análise estatística.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, fabricantes e usuários de equipamentos elétricos têm se empenhado em melhorar cada vez mais a qualidade de seus produtos e instalações. Frequentemente, são feitas especificações mais exigentes quanto à segurança do usuário e das instalações e são requeridos desempenhos melhores dos equipamentos. Ultimamente, com a ênfase que tem sido dada em todo o mundo à qualidade e à produtividade, são produzidos equipamentos mais confiáveis.

Um fator importante é um sistema de garantia da qualidade do produto que deve ser realizado através de procedimentos de fabricação. Outro ponto a ser considerado é a correta utilização do equipamento pelo usuário, de acordo com recomendações do fabricante. Por último, temos os ensaios de verificação das características dos equipamentos, baseado em normas técnicas.

A realização de ensaios em equipamentos elétricos tem por objetivo verificar seu desempenho quando submetidos a condições de funcionamento previstas em normas ou situações específicas de um determinado sistema, diferentes do padrão.

No complexo de instalações para ensaios de alta tensão e alta potência que compõe o Laboratório George Zabudowski do Cepel, o laboratório de alta potência realiza ensaios de interrupção, curta duração, arco elétrico e outros aplicáveis aos equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica. O laboratório de alta potência foi colocado em serviço do setor elétrico a partir de janeiro de 1983, tendo, desde essa data, prestado serviço a seus usuários nacionais e internacionais. Com capacidade nominal de 1000 MVA durante 1 segundo, o projeto do laboratório de alta potência permite a execução de ensaios trifásicos com tensões de até 60 kV e monofásicos com tensões de até 100 kV. Por utilizar como fonte a rede elétrica, a operação do laboratório condiciona-se às normas operativas do sistema elétrico interligado. Pelos valores atuais de potência de curto-circuito disponível, é permitido ao CEPEL utilizar até 750 MVA trifásicos durante 0,3 s, podendo operar com tempos maiores para potências inferiores. Apesar dessa limitação, tem sido possível atender à maior parte das necessidades de ensaios de potência elevada demandadas no país, especialmente para equipamentos de distribuição.

O objetivo deste trabalho é realizar a análise estatística dos ensaios realizados no laboratório de alta potência e a influência da avaliação experimental do desempenho dos equipamentos no progresso da indústria nacional, conforme itemizado abaixo:

- No item 2.0, apresenta-se a ocupação do laboratório de acordo com os tipos de ensaio e de equipamento ensaiado.
- No item 3.0, apresenta-se a taxa de falhas em ensaios em função dos equipamentos ensaiados no laboratório.
- No item 4.0, apresenta-se a taxa de aprovação nos ensaios em função do número de ensaios realizados, considerando-se os tipos de equipamentos mais frequentemente ensaiados no laboratório.
- No item 5.0, apresenta-se as conclusões deste trabalho.

Foram analisados os ensaios realizados em dois períodos: de janeiro de 1983 a agosto de 1996, no início de operação do laboratório, e de janeiro de 2001 a julho de 2009, representando um período mais recente.

2.0- TAXA DE OCUPAÇÃO DO LABORATÓRIO EM FUNÇÃO DO TIPO DE ENSAIO E DO TIPO DE EQUIPAMENTOS

Este item apresenta a ocupação do laboratório de acordo com os tipos de ensaio (interrupção, arco de potência, curto-circuito,...) e de equipamento ensaiado. Mostra-se, também, sem entrar em detalhes, a taxa de aprovação dos ensaios. Particularizando o estudo, desconsideramos os ensaios caracterizados como Pesquisa e Desenvolvimento, pois não são passíveis de comparações objetivas.

A distribuição dos ensaios de aceitação e desenvolvimento, que são caracterizados por atenderem a uma determinada norma ou procedimento, ocorre como mostrado na Figura 1. Dos primeiros treze anos do laboratório (janeiro de 1983 a agosto de 1996) (Figura 1 (a)) ao período mais recente (janeiro de 2001 a julho de 2009) (Figura 1 (b)), houve uma mudança significativa nessa distribuição, com diminuição relativa nos ensaios de interrupção e aumento nos ensaios de arco elétrico. Isso, principalmente, devido à diminuição de ensaios em disjuntores, religadores e chaves de abertura sob carga e aumento de ensaios de arco elétrico devido à falha interna em cubículo. Esse último ensaio tem sido mais requisitado por causa da maior exigência legal quanto à segurança do trabalho.

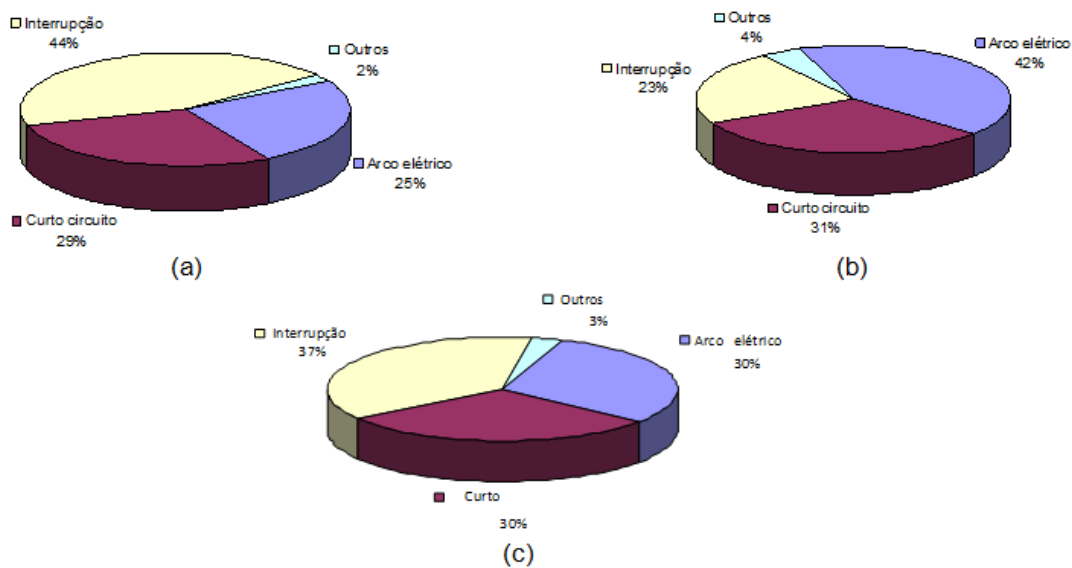


Figura 1 - Distribuição da ocupação do Laboratório de Média Potência, segundo o tipo de ensaio, nos períodos (a) janeiro de 1983 a agosto de 1996, (b) janeiro de 2001 a julho de 2009, (c) janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009.

A Figura 2 apresenta a relação entre aprovação e reprovação em ensaios realizados nos períodos janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009, classificando-os em ensaios de interrupção, curta duração e arco elétrico.

A taxa de aprovação aumentou no período janeiro de 2001 a julho de 2009 em relação aos primeiros 13 anos do laboratório. Esse aumento não foi mais significativo devido ao maior interesse de novos fabricantes, no período mais recente, em ensaiar seus equipamentos, que foram reprovados algumas vezes até o projeto ser corrigido de forma eficaz. Além disso, alguns fabricantes que já haviam alcançado boa qualidade em seus produtos, visando a diminuição de custo do equipamento, afetaram o desempenho do mesmo no ensaio.

A Tabela 1 apresenta a distribuição percentual da ocupação do laboratório em função dos principais equipamentos ensaiados no laboratório e o índice de falhas destes. Para excluir do estudo equipamentos ensaiados com pouca frequência, o que implicaria amostra muito restrita para a análise, o item 3.0 apresenta a análise de falhas dos equipamentos com taxa de ocorrência superior a 10%.

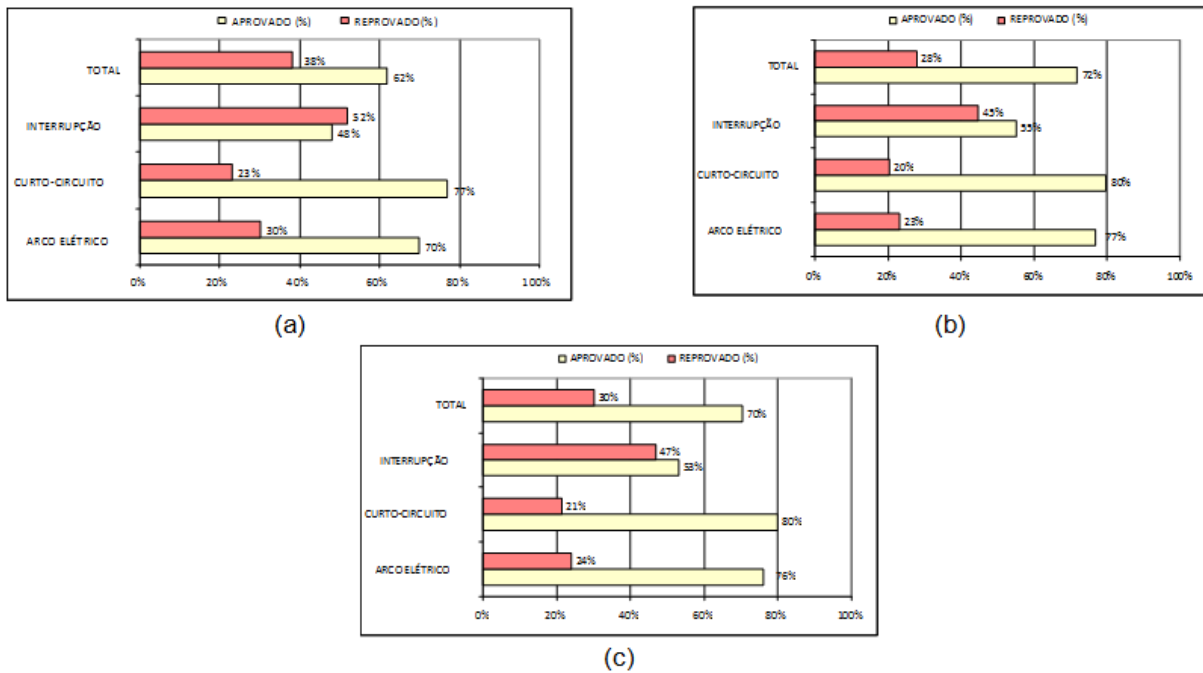


Figura 2 - Relação entre aprovação e reprovação dos ensaios de aceitação e desenvolvimento, nos períodos (a) janeiro de 1983 a agosto de 1996, (b) janeiro de 2001 a julho de 2009, (c) janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009.

Tabela 1 - Equipamentos submetidos ao estudo de análise de falhas em ensaios.

Equipamento	Ocorrência		Falha	
	No	%	No	%
Chave de abertura sob carga	106	7%	38	36%
Cubículo de distribuição	266	18%	74	28%
Disjuntor de média tensão	114	8%	42	37%
Dispositivo fusível tipo expulsão	260	17%	139	53%
Fusível limitador de corrente	31	2%	17	55%
Pára-raios	64	4%	41	64%
Religador	66	4%	44	67%
Transformador de potência	178	12%	53	30%
Transformador autoprotetido	29	2%	14	48%
Totais	1239	82%	471	38%

3.0 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS

Este item apresenta a análise estatística de falhas nos seguintes equipamentos: cubículo de distribuição, dispositivo fusível tipo expulsão e transformador de potência. Consideraram-se os ensaios realizados nos períodos janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009.

3.1 Análise estatística de falha em cubículo de distribuição

Nos ensaios analisados em cubículos, considerou-se cada compartimento de cubículo como um equipamento. As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, os números de cubículos de distribuição aprovados e não aprovados ano a ano e a descrição das falhas ocorridas. Desses ensaios, aproximadamente, 90 % foram de arco elétrico devido à falha interno e 10 %, de corrente suportável de curta duração.

Nos primeiros anos do laboratório, a concentração de solicitações de ensaios de arco elétrico devido à falha interna em cubículo de distribuição ficou concentrada em clientes do exterior. Mesmo após a norma brasileira, que prevê a realização do ensaio de arco interno, ter entrado em vigor, inicialmente, foi pequena a preocupação por parte dos compradores nacionais com o confinamento do arco e a eliminação dos danos e perdas quando da ocorrência de falhas em cubículos. Posteriormente, devido à maior exigência legal quanto a vários aspectos relacionados à segurança do trabalho, houve um crescimento significativo do número de ensaios de arco elétrico devido à falha interna e maior interesse de novos fabricantes.

Nos últimos anos, os erros básicos restringem-se a fabricantes que iniciaram a realizar ensaios recentemente e àqueles mais experientes, mas que têm diminuído os custos de produção, afetando o desempenho do produto. As falhas nestes ensaios têm se concentrado na queima dos indicadores, sobretudo os horizontais. Com isso, sempre que possível, deve-se projetar o cubículo com duto de alívio para direcionar o arco para fora da sala onde este será instalado. Quando isso não é possível, deve-se tomar extremo cuidado no projeto dos dispositivos de alívio de

pressão, para que o arco seja direcionado para o centro do teto do cubículo, diminuindo a probabilidade de queima dos indicadores horizontais. Outra providência eficaz, com essa mesma finalidade, é a instalação de chapas diagonais nas bordas do teto do cubículo.

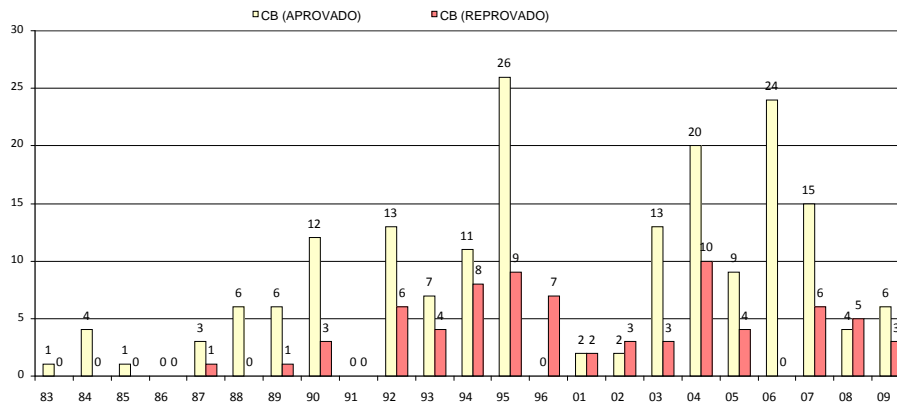


Figura 4 – Relação entre o número de cubículos de distribuição aprovados e reprovados em função do tempo.

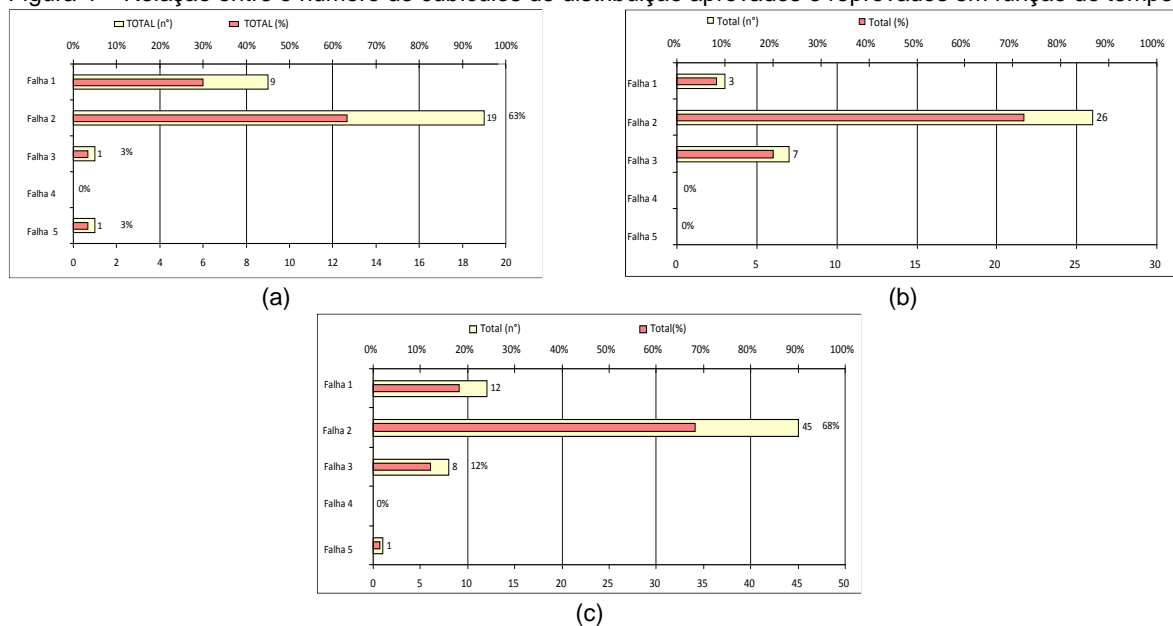


Figura 4 – Defeitos mais frequentes apresentados durante ensaios em cubículos, nos períodos (a) janeiro de 1983 a agosto de 1996, (b) janeiro de 2001 a julho de 2009, (c) janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009: falha 1 – arremesso de portas e tampas, falha 2 – queima de indicadores horizontais ou verticais, falha 3 – abertura de portas e lados acessíveis, falha 4 – desconexão do cabo de terra, falha 5 – falha no ensaio de corrente suportável de curta duração.

3.2 Análise estatística de falha em dispositivo fusível do tipo expulsão

Nos ensaios analisados em dispositivos fusíveis tipo expulsão, consideraram-se os ensaios em chave fusível de distribuição e em elos fusíveis de distribuição.

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, a relação entre o número de dispositivos fusíveis tipo expulsão aprovados e não aprovados ano a ano e a descrição das falhas ocorridas.

Nos ensaios analisados em dispositivos fusíveis tipo expulsão, consideraram-se os ensaios em chave fusível e em elos fusíveis de distribuição.

O ensaio de interrupção em chave fusível de distribuição consiste em cinco grupos de ensaio. Os grupos 1, 2 e 3 são realizados com 20% a 100% da máxima capacidade de interrupção simulando falta entre transformadores ou circuitos protegidos e as chaves. O grupo 4 é realizado com valor de corrente correspondente à que ocorre na chave instalada no primário do transformador no caso de uma falha no secundário. O grupo 5 é realizado com corrente de sobrecarga para determinar a eficácia de expulsão do elo fusível e a ação de queda do porta-fusível na falta de forças de pressão de gás resultante do arco.

Nos primeiros anos do laboratório, o índice de reprovação era de quase 100 %, embora essas chaves fossem equipamentos utilizados no sistema elétrico. Nesse período, as reprovações estavam concentradas nos grupos de

mais altas correntes de curto-circuito (grupos 1 a 3). Depois de se obter êxito nos ensaios de maior corrente, focaram-se esforços no desenvolvimento de projetos para atender as condições dos grupos 4 e 5.

Em relação aos ensaios dos grupos 1 a 3, uma das maiores preocupações dos fabricantes tem sido a qualidade do material empregado nos porta-fusíveis, que é crucialmente importante para o desempenho desse dispositivo.

Nesse equipamento, não cabe uma descrição de defeitos ocorridos porque, no laboratório, a proteção de retaguarda fica ajustada próxima ao tempo de operação do dispositivo, o que impede, na maioria das vezes, a ocorrência de explosão. Nas vezes em que essa segurança não foi suficiente, houve grande emissão de chama, ruído intenso e arremesso do porta-fusível (inteiro ou fragmentado) a grandes distâncias.

Baseado em informações dos clientes, entre os equipamentos ensaiados no laboratório, aparentemente, os fabricantes de dispositivos fusíveis são os que mais buscam a diminuição do custo de produção, com possíveis implicações na qualidade. Provavelmente, por causa disso, não houve diminuição mais significativa no índice de falha nesse equipamento.

Baseado na análise das falhas nos ensaios de interrupção realizados no período janeiro de 2001 a julho de 2009, aproximadamente, 42% dos ensaios referem-se ao grupo 1, 12% ao grupo 2, 8% ao grupo 3, 19% ao grupo 4 e 19% ao grupo 5. Assim, a falha de interrupção de correntes altas continua sendo o maior óbice para o sucesso nesses ensaios.

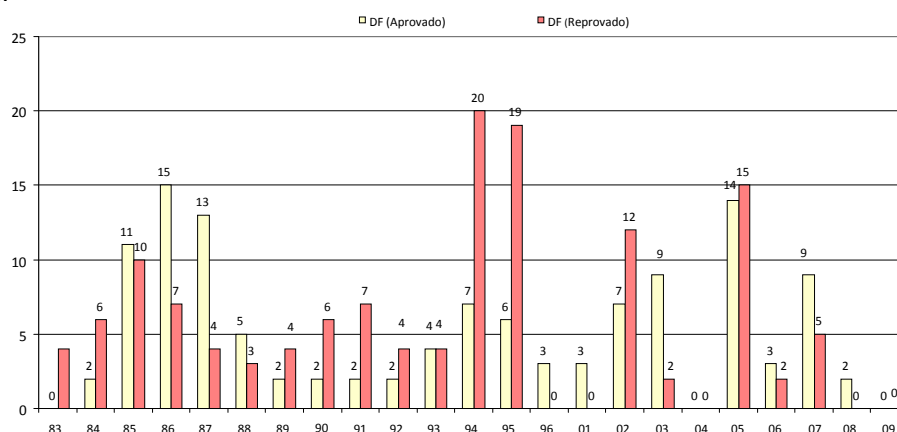


Figura 5 – Relação entre o número de dispositivos fusíveis tipo expulsão aprovados e reprovados em função do tempo.

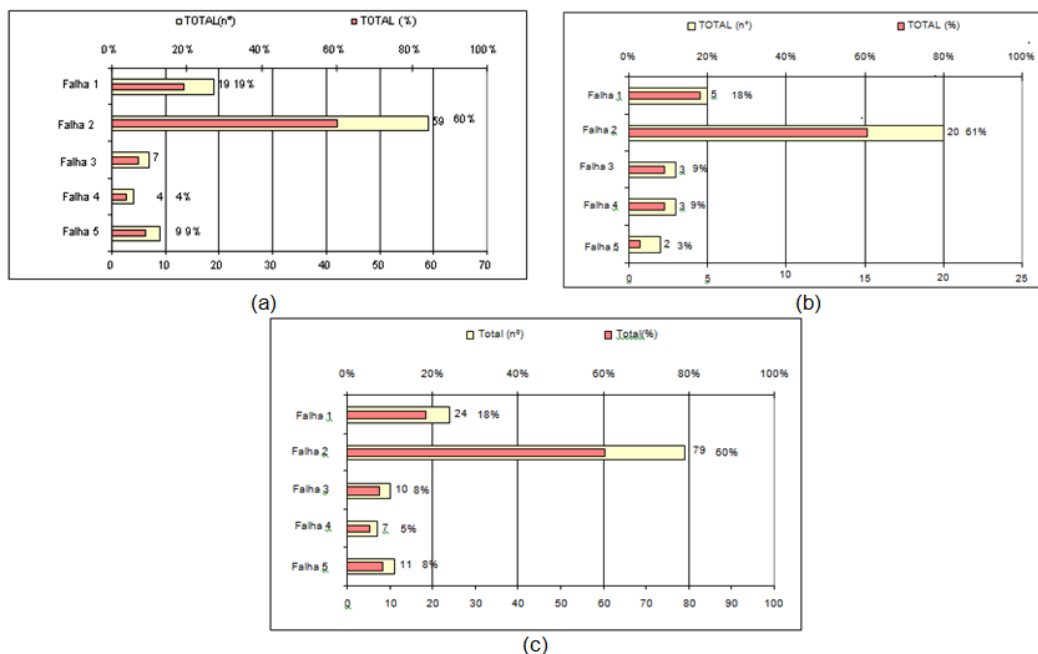


Figura 6 – Defeitos mais frequentes apresentados durante ensaios em dispositivo fusível tipo expulsão, nos períodos (a) janeiro de 1983 a agosto de 1996, (b) janeiro de 2001 a julho de 2009, (c) janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009: falha 1 – arremesso do porta-fusível, falha 2 – não interrupção, falha 3 – não sinalização, falha 4 – falha na fixação da base, falha 5 – tempo de arco acima do limite

3.3 Análise estatística de falha em transformador de potência

As Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, a relação entre o número de transformadores de potência aprovados e não aprovados ano a ano e a descrição das falhas ocorridas.

Nos primeiros 10 anos, a solicitação pelo ensaio se concentrou em transformadores com potência a partir de 500 kVA. Nos anos seguintes, cresceu a demanda de ensaios em transformadores de potência utilizados em distribuição.

Pelo exposto, vemos que o defeito de maior incidência em ensaios de curto-circuito em transformadores de potência é a variação de reatância acima dos limites tolerados em norma (núcleo circular concêntrico < 2 % e para núcleo não circular concêntrico < 7,5 %).

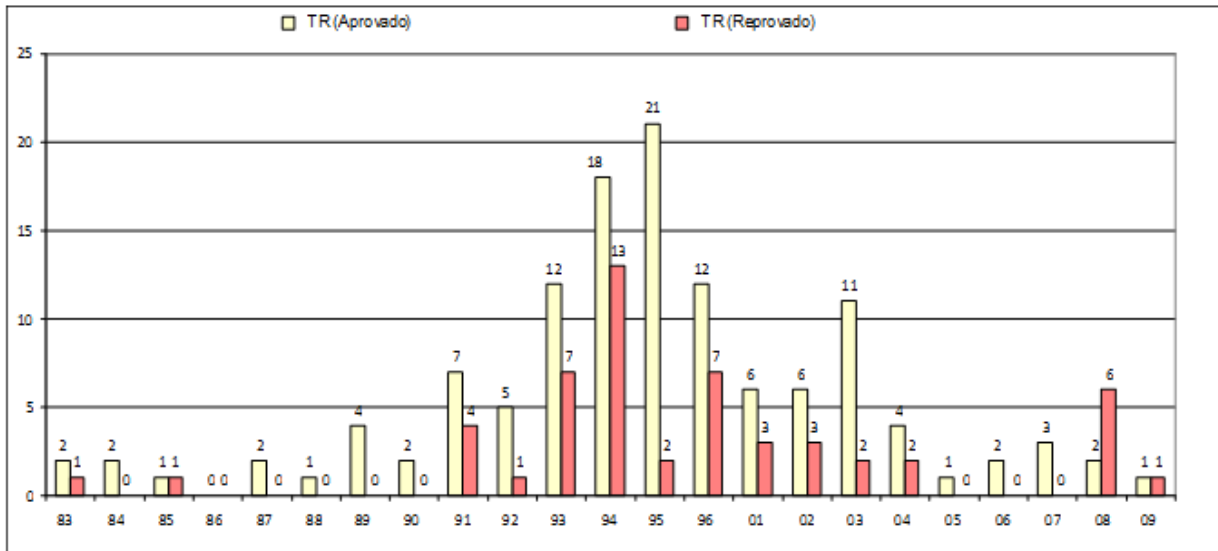


Figura 7 – Relação entre o número de transformadores de potência aprovados e reprovados em função do tempo.

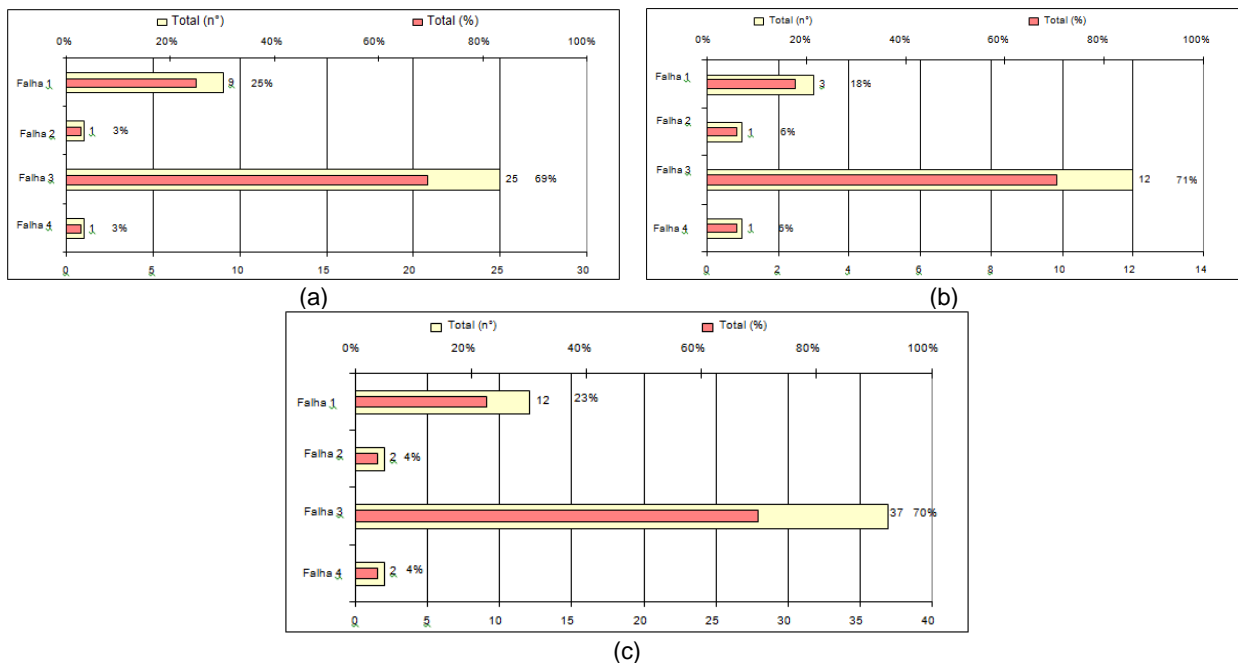


Figura 8 – Defeitos mais frequentes apresentados durante ensaios em transformadores de potência, nos períodos (a) janeiro de 1983 a agosto de 1996, (b) janeiro de 2001 a julho de 2009, (c) janeiro de 1983 a agosto de 1996 e janeiro de 2001 a julho de 2009: falha 1 – explosão, falha 2 – quebra de calços, falha 3 – variação de indutância acima do permitido por norma, falha 4 – quebra de isoladores do barramento de baixa tensão.

4.0 ÍNDICE DE APROVAÇÃO DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS ENSAIADOS

O progresso tecnológico industrial passa por vários caminhos e se baseia em vários tipos de contribuições, teóricas, experimentais e empíricas. A escolha sobre quais linhas de pesquisas se devem seguir, assim como a avaliação sobre o sucesso ou insucesso de um dado projeto final tem, nos ensaios laboratoriais, o método mais seguro de verificação, pois tais ensaios são elaborados para serem o mais representativo possível dos fenômenos ocorrentes na rede elétrica. Assim, a atuação dos laboratórios do Cepel são essenciais para o desenvolvimento da indústria nacional. A influência dos ensaios na melhoria do desempenho dos equipamentos, baseado no que exigem as normas nacionais e internacionais, é apresentada na Figura 9, que mostram a taxa de aprovação nos ensaios em função do número de vezes em que os clientes ensaiam seus equipamentos.

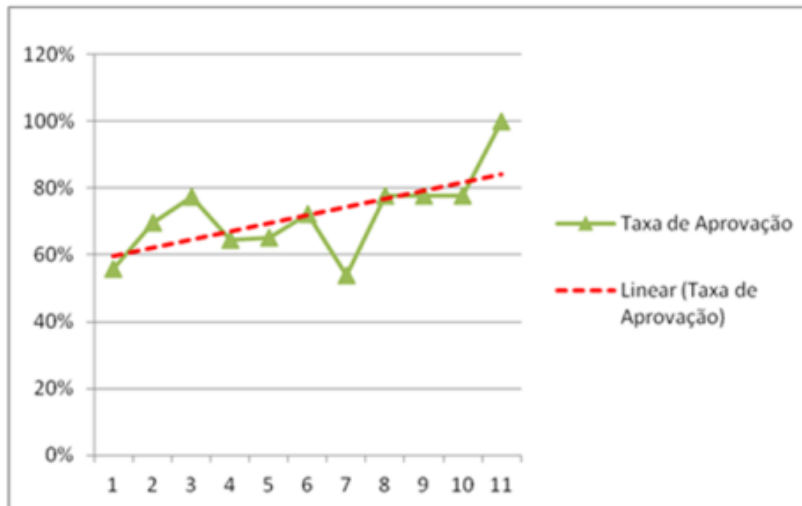


Figura 9 – Taxa de aprovação nos ensaios em função do número de vezes em que os clientes ensaiam seus equipamentos.

5.0 CONCLUSÕES

Nos últimos anos, houve mudança significativa na distribuição da ocupação do laboratório, segundo o tipo de ensaio, com diminuição relativa dos ensaios de interrupção em disjuntores, religadores e chaves de abertura sob carga e aumento dos ensaios de arco elétrico, sobretudo os de arco elétrico devido à falha interna em cubículo, por causa da maior exigência legal quanto à segurança do trabalho.

Os ensaios e a ocupação do laboratório têm se concentrado em alguns equipamentos. No período janeiro de 2001 a julho de 2009, ensaios em cubículo, dispositivo fusível e transformadores ocuparam 47% do tempo destinado a ensaio no laboratório.

Relativamente aos equipamentos mais frequentemente ensaiados recentemente, cubículos, dispositivos fusíveis de tipo expulsão e transformadores de potência, os defeitos mais frequentemente apresentados foram:

- Em ensaios de interrupção em dispositivo fusível do tipo expulsão, as reprovações têm se concentrado nos grupos de ensaio de mais altas correntes de curto-circuito.
- Em ensaios de curto-circuito em transformadores, o defeito de maior incidência é a variação de reatância acima dos limites tolerados em norma, que está relacionada a deformações no enrolamento.
- Em ensaios de arco elétrico devido à falha interna em cubículos, as falhas têm se concentrado na queima dos tecidos indicadores, que representam a queima da pele do profissional que estaria próximo do equipamento durante este evento.

Há dificuldade de se avaliar quantitativamente a influência da realização sucessiva de ensaios no progresso do desempenho dos equipamentos, pois muitos fabricantes, devido à necessidade de reduzir custos de produção e de alterar projetos, têm seu projetos reprovados após já terem conseguido aprová-los. Ainda assim, os dados apresentados neste trabalho mostram uma tendência em que quanto maior o número de ensaios realizados pelos fabricantes maior a taxa de aprovação nestes.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62271-200: HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR - PART 200: AC METAL-ENCLOSED SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR FOR RATED VOLTAGES ABOVE 1 KV AND UP TO AND INCLUDING 52 KV. 2011.

(2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7282: DISPOSITIVOS FUSÍVEIS DE ALTA TENSÃO — DISPOSITIVOS TIPO EXPULSÃO — REQUISITOS E MÉTODOS DE ENSAIO. 2011.

(3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356-5: TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PARTE 5: CAPACIDADE DE RESISTIR A CURTOS-CIRCUITOS. 2007.

7.0 BIOGRAFIA

Marcelo Guimarães Rodrigues possui graduação em Engenharia Elétrica Ênfase em Sistema de Potência pela Universidade Federal Fluminense (1994), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1997) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2004). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em ensaios em equipamentos de alta tensão e em modelagem de sistema de aterramento.