



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Signie Laureano França Santos	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	signie@lactec.org.br
Marcelo Antonio Ravaglio	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	marcelo@lactec.org.br
Antonio Paulo Junior	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia	apjunior@coelba.com.br
Dailton Pedreira Cerqueira	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia	dcerqueira@coelba.com.br
Mario Antonio Duarte Bomfim	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia	mbomfim@coelba.com.br
Marcio Rot Sans	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	marcio.sans@lactec.org.br
Edemir Luiz Kowalski	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	edemir@lactec.org.br
Ricardo Costa Scholz	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	ricardo.scholz@lactec.org.br
Marcus Vinicius Andrea Alvares	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia	malvares@coelba.com.br

**Avaliação da Taxa de Falhas de Transformadores de Distribuição de Classes 15 kV e 36,2 kV na
COELBA**

Palavras-chave

Análise Estatística
Taxa de Falhas e Vida Útil
Transformadores de Distribuição

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise estatística da vida útil e taxa de falhas dos transformadores de distribuição da COELBA, a partir do cadastro de equipamentos da Concessionária e o registro de falhas e de recuperações. Adicionalmente, apresenta resultados de inspeção interna realizada em transformadores avariados, incluindo a avaliação da qualidade dos materiais e processos de fabricação empregados nestes equipamentos. Em complemento, foram realizados ensaios de tipo, rotina e especiais em equipamentos novos e recuperados, visando alcançar uma melhoria no desempenho dos transformadores na rede de distribuição da COELBA. Admitindo-se que o critério de fim-de-vida de transformadores está associado à deterioração da sua isolação de papel, para operação nos limites normalizados de temperatura, estima-se que sua vida útil seja de 20 anos. Entretanto, a experiência da Concessionária tem mostrado que a vida dos transformadores de distribuição instalados em redes aéreas é bem menor que os 20 anos previstos em normas técnicas, mesmo quando estes operam com carregamentos baixos e em temperaturas bem abaixo dos limites estabelecidos. Portanto, acredita-se que outros fatores, além do envelhecimento do papel isolante, devem estar contribuindo mais significativamente para a ocorrência de falhas nos transformadores e a investigação destes fatores é o objetivo principal do trabalho em realização.

1. Introdução

As falhas nos transformadores de distribuição são atribuídas principalmente às descargas atmosféricas, curtos-circuitos na rede secundária, sobrecargas excessivas, infiltração de umidade, corrosão do tanque e falha de isolamento nas buchas do transformador. A vulnerabilidade do transformador à ação destes agentes está associada à sua qualidade, modo de instalação, aterramento, arranjo e características dos seus dispositivos de proteção contra surtos de tensão e sobrecorrentes.

Com a diversidade de fatores intervenientes é difícil precisar as causas primeiras das falhas em transformadores. Propôs-se através deste trabalho diminuir essas dificuldades através da realização de diversas atividades distintas e que abrangem:

- Análise estatística das falhas e do banco de dados dos transformadores de distribuição da COELBA;
- Inspeção interna dos transformadores avariados;
- Avaliação da qualidade dos materiais e processos de fabricação empregados nos transformadores, pela realização de ensaios de tipo, rotina e especiais em equipamentos novos e recuperados.

Muitos transformadores têm sido danificados em decorrência de falta de qualidade nos materiais empregados, a exemplo do tanque que, em consequência, provoca vazamento de óleo e a queima do equipamento, a utilização de óleo com indícios de degradação prévia, o processo de secagem insuficiente resultando em alta umidade no papel, etc. Para tanto, propôs-se avaliar as falhas apresentadas por transformadores de distribuição e a qualidade destes equipamentos e com base nestes resultados são sugeridas alterações na especificação técnica destes equipamentos.

Primeiramente, está apresentada a análise estatística realizada no banco de dados de transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV da COELBA, caracterizando as falhas e estimando a vida útil dos 243 mil equipamentos já cadastrados na Concessionária. Na sequência, apresenta-se a inspeção interna realizada em 29 transformadores de distribuição avariados com o intuito de identificar a real causa da avaria destes equipamentos. Além disso, estão apresentados os resultados de diversos ensaios realizados em 15 transformadores de distribuição, contando com ensaios de tipo, de rotina e especiais, padronizados ou não por normas técnicas. Posteriormente, são indicados os aspectos identificados na realização de tais atividades como significantes para falha de transformadores de distribuição e são feitas algumas sugestões para minimizar a quantidade de falhas observadas e aumentar a vida útil destes equipamentos.

Os resultados apresentados neste trabalho fazem parte do escopo de atividades realizadas no projeto de P&D ANEEL "Redução da taxa de falhas de transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV na COELBA", em realização pelo LACTEC para a Concessionária.

2. Desenvolvimento

2.1 Análise Estatística

Visando caracterizar a distribuição de falhas de transformadores de distribuição da COELBA e avaliar a vida útil destes equipamentos, trabalhou-se no levantamento dos bancos de dados de cadastro, movimentações, avarias e reformas de transformadores no sistema da COELBA. Nesse levantamento foram encontrados 243.328 transformadores de distribuição cadastrados no sistema da Concessionária até o fim do ano de 2010, dos quais 43.410 equipamentos apresentaram ao menos uma avaria e 28.805 foram reformados no mínimo uma vez. O número absoluto de avarias registradas, considerando-se aquelas sofridas tanto em equipamentos novos como em equipamentos reformados, foi aproximadamente 61 mil avarias em transformadores de distribuição. Fazendo-se esta mesma análise para a quantidade de reformas, considerando todas as vezes que os equipamentos foram recuperados, aproximadamente 41 mil reformas foram realizadas em transformadores de distribuição. Cabe ressaltar que estes números correspondem ao levantamento realizado no banco de dados da COELBA, entretanto, ocorrências de falha que, por algum motivo não foram registradas, conseqüentemente, também não foram consideradas nas análises realizadas. Na Figura 1 é possível verificar o histograma de transformadores adquiridos anualmente pela Concessionária.

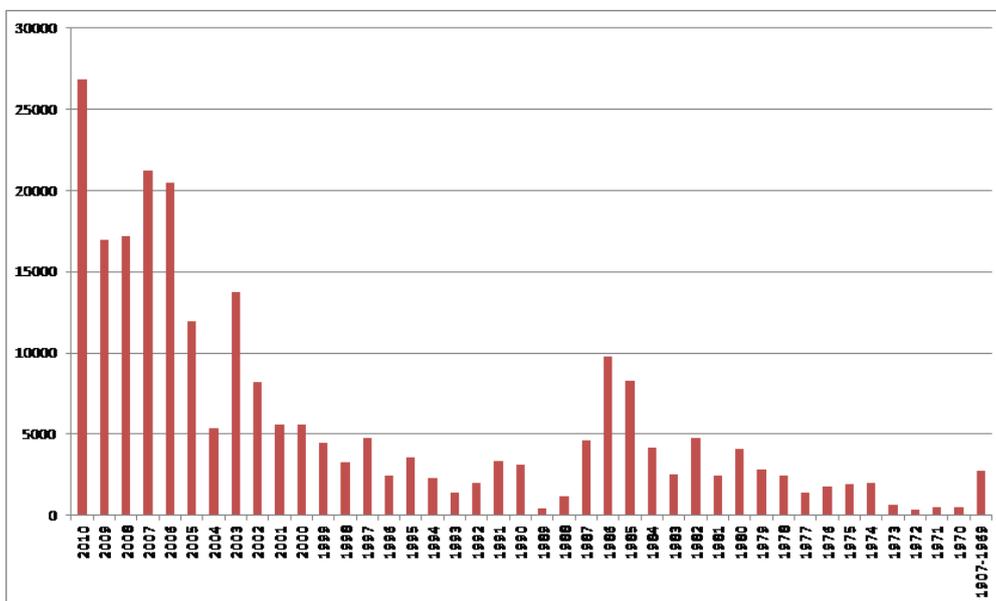


Figura 1 – Transformadores adquiridos anualmente pela COELBA

2.1.1 Transformadores Avariados

Realizou-se análise estatística dos transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV, novos e recuperados, com pelo menos um registro de falha no banco de dados da COELBA, com danos permanentes na parte ativa. A evolução da taxa de falhas dos últimos cinco anos dos transformadores de distribuição está apresentada na Figura 2, considerando-se o número anual de falhas observadas no banco de dados e o número total de equipamentos em operação na rede de distribuição, ao final de cada ano. Pode-se notar a tendência de crescimento da taxa de falhas no período analisado, podendo-se projetá-la para aproximadamente 2,75 % no final de 2012. Tal crescimento na taxa de falhas no parque de transformadores da COELBA é provavelmente decorrente do grande número de transformadores de distribuição de baixo custo, adquiridos recentemente para cumprir o programa "Luz para Todos" no Estado da Bahia.

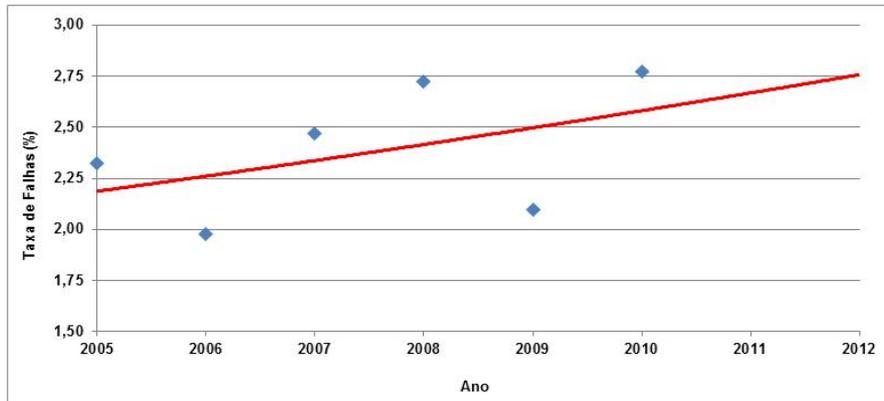


Figura 2 – Taxa de falhas de transformadores de distribuição na COELBA

A análise estatística realizada para estimar a vida até a avaria e o correspondente risco de falha dos transformadores de distribuição utilizou a distribuição de Weibull (WEIBULL, 1951) [1], ajustada pelo método da máxima verossimilhança, na qual verificou-se que 50 % das 61.763 avarias registradas em transformadores ocorre antes de 9,4 anos. O risco de falha destes equipamentos com 1 ano de operação corresponde a 4,5 %. A Figura 3 mostra o histograma de avarias de transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV na rede de distribuição da COELBA. A Figura 4 mostra a distribuição acumulada de avarias registradas, ajustada conforme a função de Weibull.

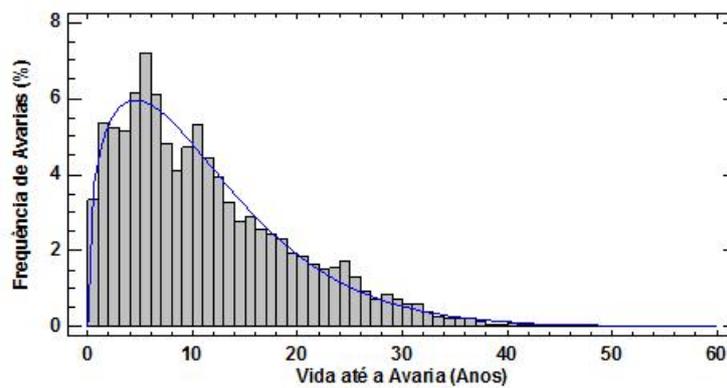


Figura 3 – Avarias registradas em transformadores de distribuição da COELBA

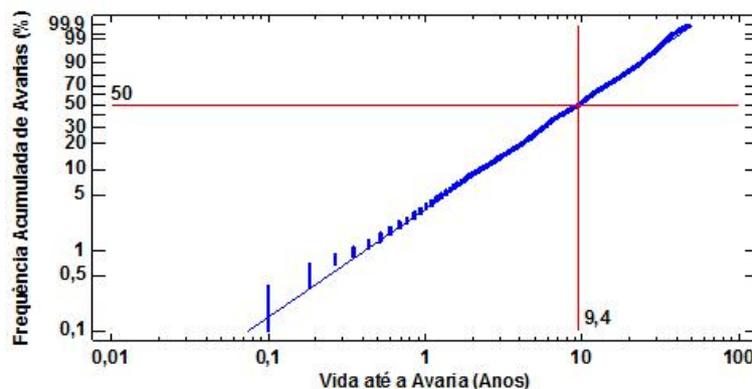


Figura 4 – Distribuição de Weibull de avarias em transformadores de distribuição na COELBA

Se forem considerados apenas os 18.353 registros de avarias em transformadores reformados, alguns deles mais que uma vez, a vida até a avaria reduz-se para 5,5 anos, com risco de falha para o primeiro ano de operação de 8,6 %. O histograma de avarias em transformadores recuperados é mostrado na Figura 5. Deve-se enfatizar que os equipamentos avaliados nesta análise sofreram recuperação total de sua parte ativa, conforme padrão COELBA, sendo reutilizados apenas o tanque, núcleo e buchas de média e de baixa tensão. Tal estatística indica que a reforma realizada, ainda que restaure totalmente a parte ativa dos equipamentos avariados, utilizando materiais novos de boa qualidade, não conduz o equipamento reformado à mesma longevidade de um transformador novo.

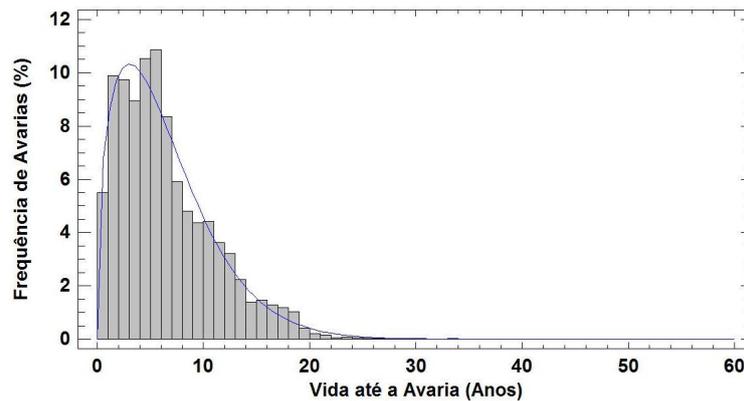


Figura 5 – Avarias registradas em transformadores de distribuição recuperados da COELBA

A COELBA possuía aproximadamente 180 mil transformadores de distribuição instalados em seu sistema de distribuição no final de 2010. Destes, quase a metade corresponde a equipamentos monofásicos (uma ou duas buchas na média tensão) e em torno de 90 % daqueles são de classe 15 kV. Para o caso dos transformadores recuperados, a maioria corresponde a transformadores de distribuição trifásicos e de classe 15 kV (87 %), possivelmente em função deles serem predominantes no parque de transformadores da Concessionária até alguns anos atrás.

A Tabela 1 mostra o número de falhas registradas no banco de dados da COELBA, com relação aos conjuntos totais de transformadores novos e recuperados e apenas daqueles já recuperados. Também estão apresentados a vida calculada até a avaria e o risco de falhas para um ano de operação dos equipamentos destes conjuntos, não levando em conta todos os transformadores que ainda não apresentaram defeito durante sua operação na rede de distribuição.

Considerando-se o número de falhas registradas nos conjuntos avaliados, a maior parte das avarias ocorrem em transformadores trifásicos, independentemente da classe de tensão, com quantidade de avarias superior a 30 % no conjunto de transformadores novos e recuperados. Para o conjunto constituído apenas por transformadores recuperados, tal índice é significativamente maior, atingindo a cifra de 58 % de avarias em transformadores trifásicos de classe 36,2 kV. Deve-se observar que o número de avarias em transformadores monofásicos é atualmente expressivo na COELBA, entretanto a maioria desses transformadores foram recém adquiridos, não permitindo ainda a avaliação estatística com a incerteza requerida. De modo geral, pode-se afirmar que quase um terço dos transformadores que compõem os conjuntos de equipamentos novos e recuperados já apresentaram pelo menos uma falha na rede de distribuição da COELBA, assim como a metade dos transformadores recuperados.

A vida até a avaria calculada para os transformadores de classe 15 kV é significativamente superior a dos equipamentos de classe 36,2 kV (da ordem de 10 anos e 6 anos, respectivamente), independentemente se foram recuperados ou não, indicando que a tecnologia para sua fabricação/recuperação é mais simples e dominada. O risco de falhas para o primeiro ano de operação dos transformadores é de aproximadamente 4 % para os equipamentos de 15 kV e superior a 12 % para os transformadores monofásicos de classe 36,2 kV. Para os transformadores de distribuição trifásicos é interessante notar que a vida reduz e o risco de falhas aumenta à medida que a potência nominal dos transformadores é maior, independentemente da classe de tensão, contrariando à expectativa de que transformadores mais caros possuem melhor desempenho e maior longevidade.

Para os transformadores de distribuição reformados, verifica-se na Tabela 1 que a vida até a avaria cai pela metade em relação aos equipamentos que compõem o conjunto de transformadores novos e recuperados, enquanto que o risco de falhas para o primeiro ano de operação dobra. Transformadores reformados de 10 kVA apresentam risco de falha de 8,5 % e 20,7 %, respectivamente para as classes de 15 kV e 36,2 kV.

Tabela 1 – Estatísticas do parque de transformadores de distribuição da COELBA (2010)

TENSÃO (kV)	TIPO	POTÊNCIA (kVA)	TRANSFORMADORES NOVOS E RECUPERADOS					TRANSFORMADORES RECUPERADOS				
			QUANTIDADE	AVARIAS	AVARIAS (%)	VIDA (ANOS)	RISCO DE FALHAS (%)	QUANTIDADE	AVARIAS	AVARIAS (%)	VIDA (ANOS)	RISCO DE FALHAS (%)
15	MONOFÁSICO	5	7.595	1.753	23,1	12,5	1,2	596	289	48,5	7,3	3,9
		10	81.649	5.282	6,5	8,4	5,8	2.418	613	25,4	6,0	8,5
		15	10.279	2.559	24,9	13,3	1,0	1.077	378	35,1	7,9	3,2
		25	6.544	1.174	17,9	10,7	3,7	737	234	31,8	6,1	6,6
		37,5	647	241	37,2	12,2	2,1	142	54	38,0	7,2	2,3
		TOTAL	106.957	11.117	10,4	10,5	3,3	4.974	1.569	31,5	6,7	5,7
	TRIFÁSICO	15	27.142	8.884	32,7	9,3	3,7	5.174	2.689	51,6	6,7	4,8
		30	32.931	12.678	38,5	9,7	3,9	10.084	4.767	47,3	5,9	7,4
		45	29.128	11.597	39,8	9,4	4,5	9.432	4.381	46,4	5,2	9,9
		75	23.595	5.789	24,5	10,6	4,2	4.679	1.764	37,7	4,7	12,7
		112,5	14.527	2.938	20,2	9,9	4,6	2.110	709	33,6	4,5	13,0
		TOTAL	136.983	42.622	31,1	9,8	4,1	31.797	14.375	45,2	5,6	8,5
36,2	MONOFÁSICO	5	470	32	6,8	6,6	12,4	-	-	-	-	-
		10	17.490	1.560	8,9	4,4	15,0	533	122	22,9	3,2	20,7
		15	1.091	272	24,9	13,2	0,4	82	18	22,0	9,3	0,4
		25	1.346	274	20,4	6,0	10,3	134	31	23,1	2,6	26,6
			TOTAL	20.426	2.155	10,6	5,5	11,8	750	171	22,8	3,5
	TRIFÁSICO	15	3.771	1.591	42,2	7,5	7,9	778	490	63,0	5,9	5,9
		30	4.074	2.034	49,9	6,5	7,7	1.615	936	58,0	4,4	11,6
		45	3.571	1.463	41,0	6,0	9,4	1.054	564	53,5	4,3	12,6
		75	1.910	535	28,0	7,0	7,9	375	176	46,9	3,7	15,8
		112,5	958	214	22,3	6,8	8,4	161	70	43,5	3,9	16,1
			TOTAL	15.399	5.867	38,1	6,7	7,5	3.995	2.238	56,0	4,6

2.1.2 Vida Útil dos Transformadores da COELBA

Para a avaliação da vida útil dos transformadores de distribuição da COELBA, foram considerados todos os 284.847 registros de entrada em operação de transformadores de distribuição, incluindo equipamentos novos (243.328) e recuperados (41.516), levando em consideração todos aqueles que nunca tiveram registro de avaria. A vida útil dos transformadores de distribuição da COELBA foi estimada através da distribuição de Weibull, ajustada pelo método da verossimilhança, considerando-se os conjuntos de transformadores com e sem registro de avaria. Sendo assim, a vida útil estimada para 50 % das unidades do parque de transformadores é de até 26,0 anos. Deve-se notar que a vida útil estimada é bem superior à vida até a avaria (9,4 anos), mostrada no item 2.1.1, pois a vida útil considera quantidade significativa de transformadores, antigos ou recentes, que nunca tiveram avarias registradas no banco de dados da Concessionária.

A Figura 6 mostra o histograma combinado da vida útil dos transformadores de distribuição com e sem avaria da COELBA. Na Figura 7, está mostrada a distribuição acumulada de frequências, ajustada conforme a função de Weibull.

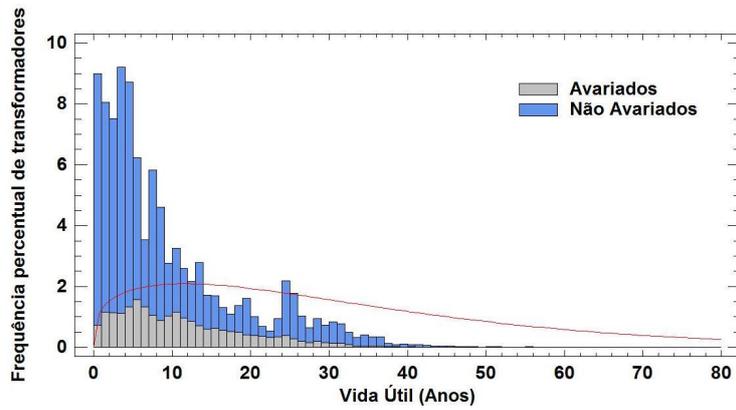


Figura 6 – Histograma da vida útil dos transformadores de distribuição da COELBA

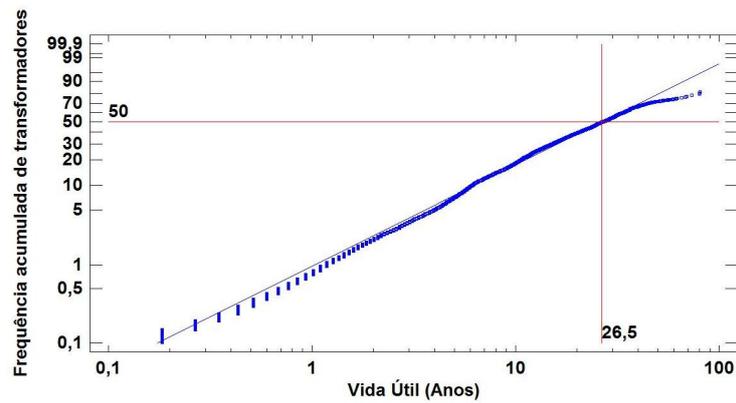


Figura 7 - Vida útil dos transformadores de distribuição da COELBA

O risco de falha para o primeiro ano de operação é de 1,30%, conforme pode ser visto na Figura 8. A vida útil assim estimada pode ser considerada maior que a real, em função da grande quantidade de transformadores adquiridos recentemente pela COELBA e da possível falta de registros de avarias/reformas nos bancos de dados de equipamentos mais antigos.

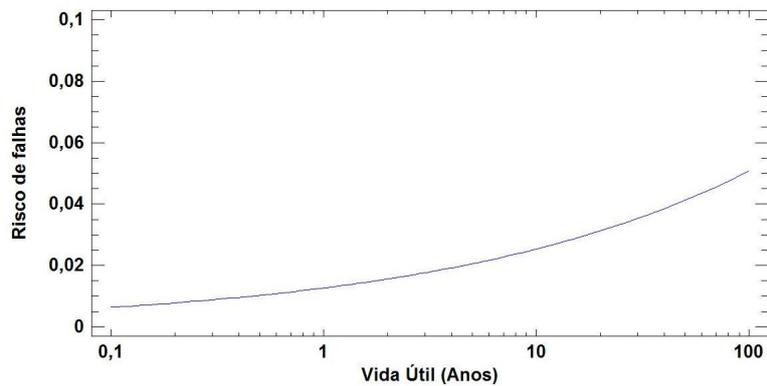


Figura 8 – Risco de falhas dos transformadores de distribuição da COELBA

2.2 Inspeção interna de transformadores avariados

A abertura de transformadores avariados foi realizada com o intuito de colaborar na identificação das possíveis causas que estão levando os transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV da COELBA à falha. Sendo assim, realizou-se a abertura de vinte e nove transformadores que, em princípio, estavam avariados. Estes transformadores foram todos retirados da rede de distribuição da COELBA, por ocorrências que causaram o desligamento da rede, e foram encaminhados à reformadora para verificação da viabilidade de reforma destes equipamentos.

O trabalho de abertura dos transformadores foi realizado de maneira bem detalhada, com o objetivo de obter a maior quantidade de informações possíveis da falha destes equipamentos. Primeiramente, foram retiradas as tampas dos tanques dos transformadores e coletadas amostras do óleo isolante dos transformadores (daqueles que ainda possuíam óleo). Posteriormente, o óleo dos transformadores foi retirado totalmente, com a intenção de analisar a parte ativa destes equipamentos. Amostras do papel isolante e do fio esmaltado foram coletadas para posterior análise destes materiais. Além disso, foi realizada a inspeção visual para identificar as prováveis causas da queima de cada um destes transformadores.

Resumidamente, pode-se dizer que dos 29 transformadores de distribuição supostamente avariados, 4 não apresentavam avarias identificadas na inspeção realizada e 7 estavam sem óleo isolante. Dos 25 transformadores avariados, a vida média até a avaria foi 13,6 anos, com apenas 7 transformadores possuindo vida superior a 20 anos e 7 equipamentos com vida de até 5 anos. A causa de defeito mais diagnosticada nesses transformadores foi curto-circuito interno, o que não indica a real causa da falha do equipamento. As demais causas de avaria foram sobrecarga excessiva e curto-circuito externo, defeitos que poderiam ser evitados com a utilização de elos fusíveis bem dimensionados e adequada construção do equipamento.

Com a análise efetuada, evidenciou-se também o fato de que a infiltração de água nos transformadores de distribuição pode estar levando estes equipamentos a apresentarem falha. Além disso, nota-se que parte dos equipamentos avaliados também apresentou papel isolante com indícios de degradação prévia (antes da falha), possivelmente em função do regime de operação com sobrecarga a que os equipamentos foram submetidos, da infiltração de água ou também de má qualidade no processo de secagem do papel durante a fabricação dos equipamentos. O teor elevado de furfuraldeído e o aspecto visual de acúmulo de borra na parte superior da culatra indicam que estes transformadores estavam operando com sobrecarga excessiva, mas não existem garantias de que o sistema de resfriamento dos transformadores estava adequadamente projetado para a condição imposta.

De modo geral, observou-se que a maioria dos transformadores inspecionados apresentou fio esmaltado com classe térmica adequada (180°C). Em um dos transformadores inspecionados, a classe térmica do fio esmaltado foi apenas 140°C, que pode corresponder à temperatura de operação do equipamento em condições de ponta de carga. A rigidez dielétrica medida nos fios esmaltados amostrados foi sempre superior a 2 kV, parecendo ser adequada para os fins que se destina. Em alguns transformadores, foi notada a utilização de impregnação total da parte ativa com um certo tipo de verniz isolante. Neste caso, a cura insuficiente deste material pode ter provocado seu derretimento e acúmulo na parte superior da culatra do núcleo do transformador, eventualmente causando o entupimento dos canais internos de circulação do óleo e o superaquecimento do transformador.

2.3 Avaliação da qualidade dos materiais e processos de fabricação empregados nos transformadores, pela realização de ensaios de tipo e rotina em equipamentos novos e recuperados

Com base na análise estatística do banco de dados de transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV da COELBA, foram escolhidos 15 transformadores (11 novos e 4 reformados) para avaliação de sua qualidade, através da realização de análises físico-químicas e de gás-cromatografia do óleo isolante, ensaios dielétricos de tipo e rotina normalizados e diversos ensaios não convencionais propostos, incluindo ensaios dielétricos a quente, ensaio de vibração mecânica, verificação das funções de transferência e de polarização do isolamento empregado. Tais transformadores de distribuição foram retirados do almoxarifado da Concessionária, sem nunca terem sido instalados para operação na rede de distribuição.

A primeira constatação que chamou a atenção na análise dos ensaios de transformadores de distribuição foram os resultados obtidos nos ensaios físico-químicos e de gás-cromatografia das amostras de óleo isolante coletadas nestes equipamentos, antes da realização dos ensaios elétricos. Notou-se que o óleo isolante da maior parte dos transformadores de distribuição novos e recuperados apresentou características que indicam sua degradação prévia, seja por aquecimento excessivo, descargas parciais, arco elétrico interno ou teor elevado de furfuraldeído (envelhecimento do papel). Além disso, há indícios de que a regeneração do óleo isolante de transformadores de distribuição recuperados seja insuficiente. Com relação às indicações de degradação prévia nos óleos isolantes de transformadores novos, acredita-se que trata-se de resquícios dos ensaios realizados em fábrica nestes equipamentos, óleo de má qualidade ou previamente utilizado, incompatibilidade de materiais, prensagens e conexões mal feitas, problemas na solda entre cobre e alumínio, entre outros motivos.

Durante a avaliação da qualidade dos materiais e processos de fabricação empregados em transformadores de distribuição notou-se que o enrolamento de alta tensão desses equipamentos são fabricados com fios de bitola reduzida. Este é o caso principalmente dos transformadores de distribuição de classes 36,2 kV e potência nominal 10 kVA, no qual são utilizados fios de bitola 28 ou 29 AWG. Em função da utilização de fios com bitolas reduzidas nestes transformadores, observa-se que pode ocorrer o seu rompimento durante o transporte ou movimentação do transformador. Além da questão da utilização de fios com bitolas reduzidas, sabe-se que o transporte dos transformadores do pátio dos fabricantes para os almoxarifados das Concessionárias e destes para seus locais de operação, percorrendo grandes distâncias, muitas vezes em rodovias mal conservadas, submete os equipamentos a condições de vibração severas. Caso os transformadores de distribuição não estejam adequadamente projetados para suportar estas condições de vibração, rompimentos do fio esmaltado ou deslocamentos indesejáveis na parte ativa destes equipamentos podem ocorrer.

Cabe ressaltar que um dos transformadores de distribuição (36,2 kV – 10 kVA) pertencente ao conjunto de quinze equipamentos avaliados, estava com o enrolamento de alta tensão interrompido (em aberto). Tal fato foi identificado através da realização dos ensaios em estudo e na medição da relação de transformação. Este equipamento foi aberto para inspeção e identificou-se um rompimento de condutor próximo ao terminal H2. Possivelmente este condutor tenha rompido em decorrência do transporte do transformador e da utilização de fios esmaltados muito finos em sua construção.

Com o intuito de avaliar os danos que podem ser causados em função do transporte de transformadores de distribuição, realizou-se ensaio mecânico de vibração em duas amostras de transformadores de distribuição. Este ensaio foi executado de acordo com procedimento ASTM D 4728-06 [2], utilizando-se o espectro sugerido para caminhões na ASTM D 4169-09 [3]. O ensaio realizado teve duração de 6h com utilização da aceleração 0,73 G, simulando as vibrações referentes ao transporte em rodovias de má qualidade, por uma distância de aproximadamente 3.000 km. Os resultados obtidos na realização do ensaio de vibração mecânica foram bastante positivos, principalmente pelo fato de se tratar de um ensaio padronizado que simula as condições de transporte de embalagens e equipamentos.

Após a realização do ensaio de vibração em dois transformadores (15 kV e 36,2 kV – 10 kVA), estes equipamentos foram submetidos a novos ensaios de laboratório. No caso do transformador de 15 kV, exceto os danos externos, como quedas de parafusos, não foram observadas anomalias nos ensaios elétricos pós-vibração. Já no transformador de 36,2 kV, observou-se que, além dos danos externos, houve o rompimento do condutor do enrolamento de alta tensão.

Do total de 15 transformadores avaliados no Laboratório de Alta Tensão do LACTEC, 11 apresentaram elevação de temperatura superior aos valores prescritos na norma ABNT NBR 5440/1999 [4]. Este fato indica deficiências no projeto dos sistemas de resfriamento dos equipamentos, sugerindo que a potência nominal de placa destes transformadores é superior à especificada. Sabendo-se que a temperatura de operação do transformador estabelece o grau de envelhecimento de sua isolação, particularmente a do papel, a constatação de que a maioria dos transformadores avaliados apresenta superaquecimento em condições nominais pode justificar o elevado índice de falhas de transformadores por sobrecarga e indica a importância da realização de ensaios de elevação de temperatura durante o recebimento de lotes de transformadores pela Concessionária.

Dos quinze transformadores de distribuição cuja isolação foi avaliada nos ensaios de impulso atmosférico, aplicado aos enrolamentos de alta e de baixa tensão, apenas um deles se mostrou completamente de acordo com as prescrições das normas ABNT NBR 5356 [5] e NBR 5380 [6]. A maioria dos defeitos observados, entretanto, não foi permanente, indicando que os projetos dos transformadores encontram-se abaixo ou muito próximos dos limites prescritos na especificação técnica.

É possível que o posicionamento da chave comutadora de derivações utilizada pela COELBA na lateral superior do tanque do transformador, muito próxima ao núcleo, na altura do nível de óleo, além do comprimento excessivo dos condutores que interligam os enrolamentos ou o comutador de derivações aos seus terminais externos, verificado em diversos casos, tenha contribuído significativamente para o diagnóstico desfavorável observado nos ensaios de suportabilidade ao impulso atmosférico do enrolamento de alta tensão. Na baixa tensão, observou-se diagnóstico similar, com muitos casos de defeitos não permanentes, possivelmente provocados pelo posicionamento das buchas de baixa tensão muito próximo do nível do óleo isolante.

Durante a realização dos ensaios de suportabilidade ao impulso atmosférico em alguns transformadores, foram observados casos em que ocorreram descargas disruptivas externas entre os terminais de alta tensão e o suporte de pára-raios destes equipamentos, assim como entre terminais das buchas de alta tensão, apontando possíveis deficiências no projeto destes equipamentos.

Todos os transformadores de classe 36,2 kV e inclusive três de classe 15 kV apresentaram níveis de tensão de radiointerferência acima do recomendado em norma, indicando que o projeto destes equipamentos não é adequado, possivelmente resultante da proximidade excessiva do comutador de derivações da parte ativa do transformador, em particular em relação ao terminal H3.

A proposta de realizar a sequência de ensaios em estudo e de alguns ensaios dielétricos padronizados a quente nos transformadores de distribuição visou determinar o comportamento dielétrico e avaliar a eventual degradação dos materiais empregados nestes equipamentos, quando ensaiados a uma temperatura média dos enrolamentos similar a de sua operação normal na rede de distribuição, sob condições de carregamentos nominais. A realização de ensaios em transformadores de distribuição a quente tratou-se de um estudo inovador realizado visando à redução da taxa de falhas em transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV da COELBA. Nota-se que, em geral, não ocorreram diferenças significativas entre os resultados obtidos nos ensaios realizados a temperatura ambiente e a uma temperatura próxima de sua temperatura de operação em condições nominais. Dos oito transformadores nos quais aplicou-se esta técnica, três passaram a serem reprovados nos ensaios de rotina (tensão aplicada e tensão induzida). Entretanto, deve-se salientar que os ensaios com temperatura elevada foram realizados após os transformadores terem sofrido diversas solicitações dielétricas durante toda a bateria de ensaios à temperatura ambiente. Além disso, observou-se elevação do nível do óleo isolante, cobrindo melhor e com maior eficiência a parte ativa do transformador de distribuição e particularmente do comutador de derivações. Assim sendo, não se pode afirmar que as disrupções internas verificadas em alguns transformadores tenham sido causadas pela temperatura superior do óleo isolante durante os ensaios.

Ensaio não padronizados realizados, incluindo as medições de resposta em frequência, espectroscopia dielétrica, resistência do isolamento, fator de perdas dielétricas, polarização e despolarização, não indicaram diagnósticos conclusivos em relação ao estado da isolação dos transformadores, porém, podem ser de grande valia para uso futuro, quando forem conhecidos com maiores detalhes todos os mecanismos de envelhecimento e suportabilidade dos materiais empregados particularmente em transformadores de distribuição, assim como os pontos falhos no processo de fabricação deste tipo de equipamento.

3. Conclusões

A COELBA possui aproximadamente 180 mil transformadores em operação em sua rede de distribuição, na grande maioria deles de classe 15 kV. O número de equipamentos em operação tem crescido muito, recentemente, visando a implantação do Programa "Luz para Todos" no Estado da Bahia, com ampliações significativas no sistema de classe 36,2 kV.

A taxa de falhas dos últimos cinco anos de transformadores de distribuição da COELBA tem apresentado tendência de crescimento. Além disso, para todos os transformadores que já tiveram pelo menos um registro de avaria (61 mil), verifica-se que 50 % deles falham antes de 9,4 anos, com risco de falha para o primeiro ano de operação de 4,5 %. Se forem consideradas apenas as avarias em transformadores reformados (18 mil), a vida reduz-se para 5,5 anos, com risco de falha de 8,6 %.

A maior parte das avarias registradas no banco de dados da Concessionária ocorreu em transformadores trifásicos, independentemente da classe de tensão, com quantidade de avarias superior a 30 %. Para os transformadores recuperados, tal índice é maior, atingindo a cifra de 58 % para transformadores trifásicos de classe 36,2 kV. Atualmente, entretanto, o número de avarias em transformadores monofásicos é expressivo, decorrente de grande quantidade de equipamentos deste tipo ter sido recém adquirida. A vida até a avaria calculada para os transformadores de classe 15 kV é significativamente superior a dos equipamentos de classe 36,2 kV, independentemente se foram recuperados ou não, indicando que a tecnologia para sua fabricação/recuperação é mais simples e dominada.

A vida útil da metade de todos os transformadores de distribuição da COELBA, com e sem registro de avarias, é de até 26 anos. A vida útil estimada é superior à vida até a avaria, pois considera quantidade

bem expressiva de transformadores, antigos ou recentes, que nunca tiveram avarias registradas no banco de dados da Concessionária.

As causas de falha mais frequentes observadas em inspeção visual de transformadores de distribuição em processo de reforma incluem curto-circuito interno, sobrecarga, infiltração de água e curto-circuito externo. Apesar disso, não se pode afirmar que as causas de falha indicadas correspondam à realidade, pois, em geral, são desconhecidas as condições do sistema no momento do defeito, estado do sistema de aterramento, estado das proteções instaladas de sobretensão e sobrecorrente, etc. Um curto-circuito interno pode ser decorrente da falta de qualidade dos materiais empregados no transformador, incluindo o fio esmaltado, papel isolante, borrachas de vedação, óleo isolante, etc.

Em função dos resultados preliminares obtidos nos ensaios de tipo, rotina e especiais realizados no Laboratório de Alta Tensão do LACTEC, a COELBA decidiu, a partir de Janeiro de 2012, alterar a especificação técnica destes equipamentos, visando garantir maior qualidade de fabricação e maior confiabilidade operacional. Dentre as principais alterações, destacam-se:

- Realização de análises de gás-cromatografia no óleo isolante, antes e após os ensaios dielétricos;
- Realização dos ensaios de elevação de temperatura e impulso atmosférico em amostras representativas de cada lote de transformadores adquiridos, durante o seu recebimento, independentemente destes já terem sido realizados em ensaios de tipo.

Adicionalmente, estuda-se a inclusão de outros ensaios não convencionais, em avaliação neste projeto de P&D, como o ensaio de vibração mecânica, medição do teor de umidade do papel, identificação da qualidade do fio esmaltado, avaliação da isolação no domínio do tempo e frequência, entre outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento às equipes técnicas do LACTEC, COELBA, ROMAGNOLE E RHEDE, pela importante contribuição na realização deste trabalho. Em particular, agradecem ao Eng. Mário Seixas Cabussú pela iniciativa, profissionalismo e importante apoio na condução desta pesquisa.

4. Referências bibliográficas

1. WEIBULL, W. & SWEDEN, S. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. In ASME Journal of Applied Mechanics, Transactions of the American Society, Setembr 1951, p. 293-297.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standart Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Container, D4728-06. Philadelphia, 2006, p7.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems, D4169-09, Philadelphia, 2009.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformadores para redes aéreas de distribuição - Padronização, NBR 5440, 1999.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformadores de potência - Especificação, NBR 5356, 1993.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformadores de potência - Método de ensaio, NBR 5380, 2007.
7. RAVAGLIO, M. A et all. "Avaliação da vida útil dos transformadores de distribuição da COPEL". Relatório final, LACTEC, Janeiro, 2003.