XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Análise da Taxa de Falha de Transformadores de Distribuição do Sistema Ampla

Mário Luiz Pereira Alves	Roberta C. dos Santos	Michelle Braga dos Santos
Ampla Energia e Serviços S.A.	**Ampla Energia e Serviços**	**Medral Engenharia**
mario.lp.alves@ampla.com	rcsantos@ampla.com	msantos.medral@ampla.com

Palavras-chave

Indicadores de Qualidade
Transformadores de Distribuição
Taxa de Falha

Resumo

Até o ano de 2005, as informações relacionadas à taxa de falha de transformadores de distribuição da Ampla consideravam somente a quantidade de transformadores falhados, não existindo a análise das informações referentes à identificação destes transformadores e de seus pontos de instalação.
A partir do ano de 2006 foram adotados procedimentos para o registro sistemático dessas informações, com a criação de uma base de dados.
Este trabalho tem como objetivos apresentar as informações coletadas ao longo dos anos de 2006 e 2007, identificar as principais causas das falhas, bem como indicar propostas para a diminuição da quantidade de transformadores falhados.

1. Introdução

A Ampla Energia e Serviços é responsável pela distribuição de energia elétrica para 66 municípios do estado do Rio de Janeiro, possuindo aproximadamente 2,3 milhões de clientes. Para a realização dos serviços de operação e manutenção do sistema de distribuição, a Ampla é dividida em 9 pólos operacionais que apresentam características geográficas, econômicas e sociais diferentes.
Transformadores de distribuição são partes constituintes do sistema primário de distribuição de energia elétrica, representando, na Ampla, entre 20% e 25% do orçamento destinado às obras de crescimento do sistema.
Em dezembro de 2.007 se encontravam instalados 98.001 transformadores de distribuição em seu sistema. Como todos os demais componentes, também estão sujeitos a falhas e defeitos, mas, por possuírem características construtivas propícias, os transformadores são submetidos, após a sua retirada do sistema, a processos de recuperação e/ou revitalização, permitindo sua reutilização. Por todas estas razões, os transformadores de distribuição são tratados de forma diferenciada em relação aos demais componentes, possuindo indicadores próprios de desempenho, sendo um deles a taxa de falha. Mais do que simplesmente traduzir uma relação entre a quantidade de transformadores falhados

e os instalados nos sistema, as informações necessárias para a determinação da taxa de falha podem ser fonte de indicadores sobre o desempenho da manutenção dos transformadores, do desempenho dos produtos oferecidos pelos fabricantes, do carregamento e das condições de instalação a que foram submetidos.

Para que sejam possíveis todas estas análises foi adotado, a partir do ano de 2.006, um sistema de coleta de dados para permitir a catalogação de cada falha de transformador. Em formato de planilha, passou a ser respondido mensalmente por todos os pólos operacionais, registrando-se as informações sobre o transformador falhado. As informações colhidas pelos pólos operacionais foram comparadas com a base de dados de cadastro e manutenção dos transformadores.

2. Definições

2.1. Falha

Entende-se por falha a incapacidade de execução da função prevista para um determinado equipamento. A falha leva ao estado de indisponibilidade. No caso de transformadores de distribuição, um equipamento falhado é aquele que não realiza mais a função de reduzir (no caso de um transformador abaixador) a tensão primária nominal do sistema de distribuição para a(s) tensão(ões) secundária(s) projetada(s).

2.2. Taxa de Falha

A taxa de falha de transformadores de distribuição é um indicador utilizado para determinar o desempenho dos transformadores de distribuição e de suas instalações. Conforme mostrado na equação (1), a taxa de falha exprime a relação percentual entre a quantidade de falhas e a média de transformadores instalados em um determinado período, normalmente, um ano.

$$tf = \frac{\sum trafosfalhados}{\overline{Trafosinstalados}} \qquad (1)$$

onde:

tf é a taxa de falha;

Σtrafosfalhados é o somatório de transformadores falhados;

trafosinstalados é a média de transformadores instalados.

3. Cálculo da Taxa de Falha

Estão registradas na Ampla as informações referentes às quantidades de falhas de transformadores de distribuição e as respectivas taxas de falhas desde o ano de 1.990. A análise das informações até o ano de 2.005 indica uma média de 2.357 falhas de transformadores anuais, bem como uma taxa de falha média de 5,20%.

No ano de 2.006 foram registradas 2.059 falhas de transformadores de distribuição, que proporcionaram uma taxa de falha de 2,27% para o ano. Este valor está abaixo de metade da média dos 16 anos anteriores. Já no ano de 2007 foram registradas 1.894 falhas de transformadores de distribuição, que proporcionaram uma taxa de falha de 1,98% para o ano. Valor que representa uma melhoria de 12,8% em relação à taxa de falha de 2.006 e é o terceiro melhor desempenho da Ampla desde o ano de 1990.

4. Distribuição Mensal das Falhas

Embora nunca estudado estatisticamente, a cultura da empresa relata uma relação entre o aumento da temperatura e a aumento da taxa de falha. Desta forma existiriam dois períodos distintos ao longo do ano, o primeiro, relacionado aos meses quentes, ou seja, de novembro a março, apresentariam quantidades de falhas de transformadores elevadas. O outro período, nos meses mais amenos do ano, de abril a outubro, apresentaria menores quantidades de falhas de transformadores. O aumento das falhas no período quente estaria relacionado a dois fatores:

- O aumento da temperatura provocaria um aumento de demanda, e este aumento de demanda seria responsável por sobrecargas nos transformadores;
- O aumento de tempestades típicas de verão, com grande incidência de ventos fortes, potenciais causadores de curtos circuitos provocados por galhos de árvores, e descargas atmosféricas.

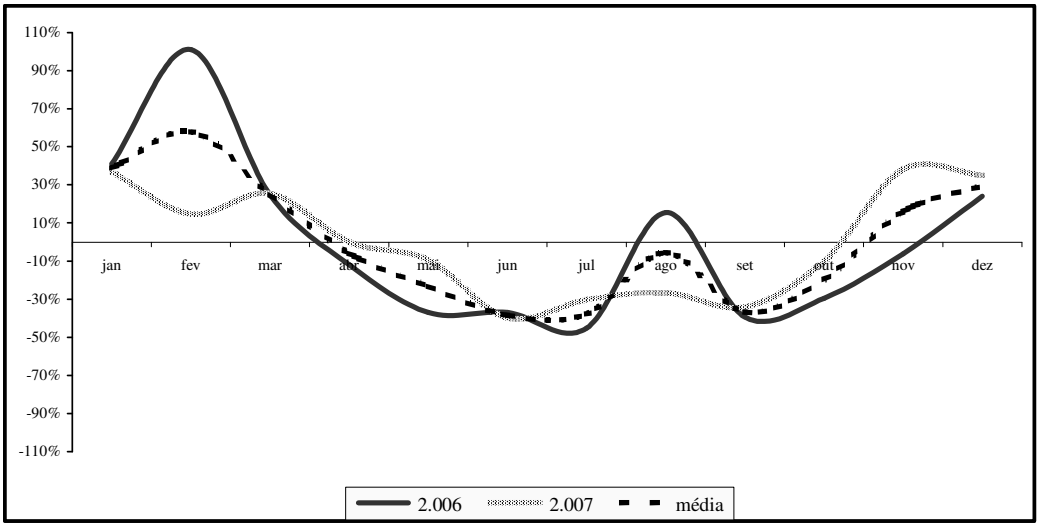
A tabela 1 relaciona as falhas ocorridas mensalmente nos anos de 2.006 e 2.007.

Tabela 1

	2.006	**2.007**
jan	242	216
fev	345	181
mar	214	198
abr	151	158
mai	108	143
jun	108	95
jul	94	110
ago	198	116
set	104	104
out	121	142
nov	161	218
dez	213	213

Analisando-se as informações da tabela 1, observa-se uma média de 172 falhas de transformadores por mês durante o ano de 2.006, enquanto a média de falhas mensais no ano de 2.007 é de 158 transformadores. O gráfico 1 relaciona os desvios percentuais da quantidade de falhas mensais em relação à média anual, bem como a média mensal dos desvios nos dois anos.

Gráfico 1



A observação do gráfico 1 permite verificar a existência dos dois períodos de quantidade de falhas em transformadores. Esta afirmativa é mais evidente quando se observa a curva da média de falhas nos dois anos. São observados também eventos pontuais, como o mês de agosto de 2.006, quando, após consulta aos pólos operacionais, foi verificado um comportamento atípico do pólo Campos.

5. Desempenho dos Pólos Operacionais

As informações sobre a média de transformadores instalados, quantidade de falhas, e as taxas de falha por pólo operacional estão indicadas na tabela 2. Estas informações traduzem o desempenho dos transformadores em cada pólo operacional.

Tabela 2

Ano de 2006						
Pólo	**Instalados**		**Falhados**		**Taxa de Falha**	
	Quantidade	**Participação**	**Quantidade**	**Participação**	**Própria**	**Desvio**
campos	10.296	11%	356	17%	3,46%	52%
centro	6.126	7%	167	8%	2,73%	20%
lagos	11.134	12%	342	17%	3,07%	35%
macaé	6.693	7%	161	8%	2,41%	6%
magé	7.579	8%	200	10%	2,64%	16%
noroeste	21.309	23%	258	13%	1,21%	-47%
são gonçalo	13.212	15%	269	13%	2,04%	-10%
serrana	8.731	10%	182	9%	2,08%	-8%
sul	5.604	6%	124	6%	2,21%	-3%
Ampla	90.683		2.059		2,27%	
Ano de 2007						
Pólo	**Instalados**		**Falhados**		**Taxa de Falha**	
	Quantidade	**Participação**	**Quantidade**	**Participação**	**Própria**	**Desvio**
campos	10.831	11%	261	14%	2,41%	22%
centro	6.305	7%	157	8%	2,49%	26%
lagos	11.802	12%	287	15%	2,43%	23%
macaé	6.878	7%	163	9%	2,37%	20%
magé	8.210	9%	203	11%	2,47%	25%
noroeste	22.705	24%	261	14%	1,15%	-42%
são gonçalo	14.027	15%	208	11%	1,48%	-25%
serrana	9.004	9%	244	13%	2,71%	37%
sul	5.869	6%	110	6%	1,87%	-5%
Ampla	95.631		1.894		1,98	

A coluna *Instalados-Quantidade* indica a média de transformadores instalados no ano, enquanto a coluna *Instalados-Participação* indica a relação entre a média de transformadores instalados por pólo e a média da Ampla. A coluna *Falhados-Quantidade* indica o total de falhas de transformadores no ano, enquanto a coluna *Falhados-Participação* indica a relação entre a quantidade de falhas por pólo e a da Ampla. A coluna *Taxa de Falha-Própria* indica a taxa de falha de cada pólo, enquanto a coluna *Taxa de Falha-Desvio* indica a relação entre a quantidade de falhas por pólo e a da Ampla.

A distribuição das falhas por pólo ao longo dos anos permite efetuar a correlação do comportamento de cada pólo com a distribuição das falhas da Ampla. Na tabela 3 são mostradas as correlações das falhas de transformadores por pólo operacional em relação à taxa de falha da Ampla.

Tabela 3

Pólo	2006	2007
campos	66%	64%
centro	91%	70%
lagos	96%	66%
macaé	41%	61%
magé	76%	73%
noroeste	91%	85%
são gonçalo	93%	56%
serrana	78%	42%
sul	77%	-5%

Para os pólos operacionais, uma maior taxa de falha não indica, necessariamente, uma maior participação na formação do indicador da taxa de falha da Ampla, uma vez que a taxa de falha está relacionada à quantidade de transformadores falhados. Ao se analisar as informações da tabela 2, observa-se que o pólo Noroeste possui a maior quantidade de transformadores instalados e uma quantidade significativa de falhas. Entretanto o pólo apresentou nos dois anos, as menores taxas de falha da Ampla, estando seus valores, em média, cerca de 44% menores que a taxa de falha da Ampla. Os municípios atendidos pelo pólo Noroeste possuem características rurais, com baixas densidades populacional e de carga.

A observação das informações das tabelas 2 e 3 permite concluir que existem diferenças significativas no comportamento da distribuição das falhas de transformadores de distribuição entre os diversos pólos operacionais.

6. Desempenho Conforme o Número de Fases

A Ampla possui transformadores de distribuição monofásicos e trifásicos, que são utilizados em sistemas com tensão fase-fase variando de 10,8 a 13,8kV. Dependendo da tensão primária a que estão submetidos, os transformadores monofásicos são subdivididos em dois grupos. Quando utilizados com tensão primária entre 6,23 e 7,97kV são denominados monofásicos. Quando utilizados com tensão primária entre 10,8 e 13,8kV são denominados bifásicos. Desta forma, existem três tipos transformadores: monofásicos, bifásicos e trifásicos.

Nas colunas *Falhados* da tabela 4 estão relacionadas as quantidades de falhas de transformadores de distribuição separadas por número de fases. As colunas *Instalados* indicam as médias de transformadores instalados, enquanto as colunas *Taxa de Falha* indicam as taxas de falha por tipo de transformador.

Tabela 4

Número de fases	2006			2007		
	Falhados	Instalados	Taxa de falha	Falhados	Instalados	Taxa de falha
monofásicos	90	6.492	1,39%	91	6857	1,33%
bifásicos	458	27.416	1,67%	386	29025	1,33%
trifásicos	1.414	56.775	2,49%	1.410	59749	2,36%
sem inf.	97			7		

A observação da tabela 4 permite concluir que a taxa de falha dos transformadores de distribuição trifásicos possuem taxa de falha superior aos demais equipamentos. Estes transformadores são utilizados em áreas que possuem uma quantidade elevada de clientes a serem atendidos, ou em áreas que possuem clientes que necessitam de fornecimento de energia elétrica em mais de uma tensão.

7. Desempenho Conforme a Potência

Os transformadores de distribuição utilizados pela Ampla possuem as seguintes padronizações por potência em kVA:

- monofásicos e bifásicos: 5, 10, 15 e 25kVA;
- trifásicos: 15, 30, 45, 75, 112,5, 150, 225, 300 e 500kVA.

Apesar da padronização, ainda existem transformadores diferentes no sistema Ampla, destacando-se os transformadores monofásicos e bifásicos de 3kVA. A tabela 5 relaciona para os diferentes tipos e potências de transformadores de distribuição, as quantidades médias instaladas nos dois anos, além das respectivas taxas de falha.

Tabela 5

Tipo	Potência (kVA)	2006			2007		
		Instalados	Falhados	Taxa da Falha	Instalados	Falhados	Taxa da Falha
mono	3	374	3	0,80%	367	2	0,55%
mono	5	1.538	28	1,82%	1.677	30	1,79%
mono	10	2.749	33	1,20%	2.920	31	1,06%
mono	15	1.368	21	1,54%	1.418	18	1,27%
mono	25	461	5	1,09%	474	10	2,11%
mono	37,5	2	0	0,00%	2	0	0,00%
bi	3	960	4	0,42%	939	11	1,17%
bi	5	5.656	131	2,32%	5.978	98	1,64%
bi	10	12.065	190	1,57%	13.012	145	1,11%
bi	15	6.072	92	1,52%	6.327	87	1,38%
bi	25	2.654	41	1,55%	2.757	45	1,63%
bi	37,5	11	0	0,00%	12	0	0,00%
tri	15	11.512	382	3,32%	12.266	344	2,80%
tri	25	13	0	0,00%	14	0	0,00%
tri	30	14.786	352	2,38%	15.689	339	2,16%
tri	37,5	15	0	0,00%	14	0	0,00%
tri	45	12.175	310	2,55%	12.785	323	2,53%
tri	50	18	0	0,00%	16	0	0,00%
tri	75	12.421	245	1,97%	12.969	244	1,88%
tri	112,5	5.459	121	2,22%	5.554	146	2,63%
tri	150	195	4	2,05%	229	3	1,31%
tri	225	138	0	0,00%	159	2	1,26%
tri	300	41	0	0,00%	54	0	0,00%
tri	1000	1	0	0,00%	0	0	0,00%

Os transformadores trifásicos de menor potência – 15, 30 e 45kVA, são os que apresentam as maiores quantidades de falhas acumuladas ao longo dos dois anos. Estes transformadores também figuram entre os que apresentam as maiores taxas de falhas.

8. Análise das Causas

A análise das causas das falhas dos transformadores de distribuição é imprescindível para o estabelecimento de critérios e rotinas visando a diminuição da quantidade de falhas e, conseqüentemente, da taxa de falha. A tabela 6 relaciona as principais causas de falhas informadas pelos pólos operacionais.

Tabela 6

Causa	2006	2007	Total	Recuperação
Deterioração	22,6%	30,0%	26,2%	-
Descarga atmosférica	26,0%	23,6%	24,9%	12%
Desconhecida	26,8%	16,3%	21,7%	-
Sobrecarga	8,1%	8,5%	8,3%	50%
Outras	5,8%	8,7%	7,2%	20%
Curto na BT	3,2%	5,4%	4,2%	18%
Vazamento de óleo	3,2%	2,5%	2,9%	-
Furto	1,7%	2,2%	1,9%	-
Terceiros	0,8%	1,7%	1,2%	-
Variação de tensão na BT	1,6%	0,6%	1,1%	-
Animais	0,4%	0,5%	0,5%	-

É observada uma grande quantidade de falhas causadas por descargas atmosféricas. A causa deterioração também aparece com grande participação na formação da taxa de falha, embora, neste caso, esta informação seja referente ao sistema secundário de distribuição e não ao transformador, e poderia ser tratada com curto circuito na baixa tensão. A causa sobrecarga aparece como responsável apenas em 8,3% da quantidade de falhas

Entretanto, a análise das causas de falhas apuradas nas recuperações realizadas nos transformadores de distribuição indica que metade dos transformadores recuperados havia sido submetida a sobrecargas. A identificação da causa de falha de um transformador de distribuição durante o processo de recuperação é realizada através de inspeção visual, uma vez que as principais causas – descarga atmosférica, sobrecarga, e curto circuito, produzem efeitos nítidos no transformador. A coluna *Recuperação* da tabela 6 relaciona a distribuição das causas de falhas de transformadores apuradas na recuperação.

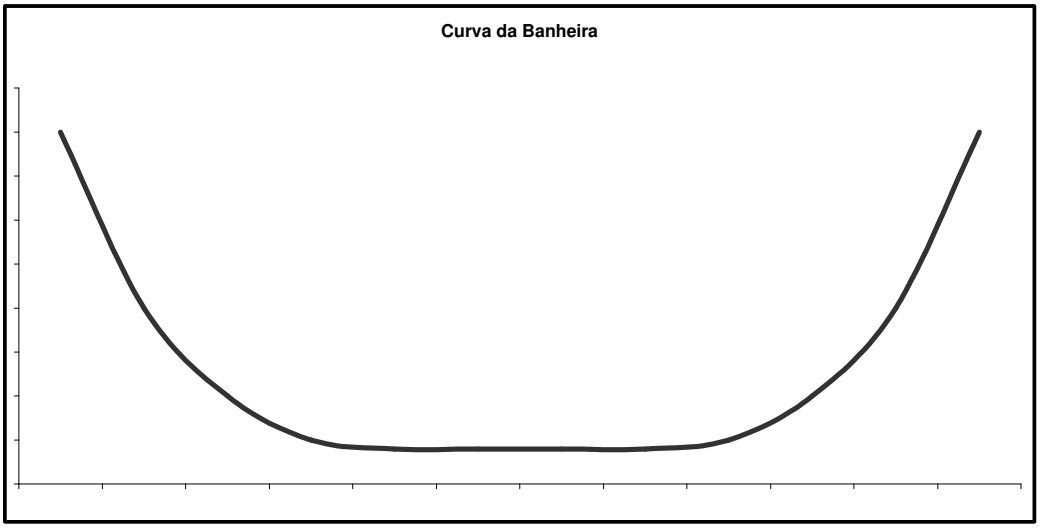
Interessante salientar que a causa furto do transformador foi responsável por 76 falhas ao longo dos dois anos.

9. Vida dos Transformadores

As distribuições, em relação ao tempo, das falhas de uma série de materiais ou equipamentos podem ser classificadas de três formas diferentes. Quando as falhas se concentram no período imediatamente posterior à instalação, a distribuição é classificada como decrescente, indicando que as falhas ocorrem por erros de fabricação ou instalação. Neste caso, o intervalo entre as falhas tende a aumentar ao longo do tempo de instalação. Quando as falhas se distribuem de forma uniforme ao longo do tempo, a distribuição é classificada como constante, indicando que são causadas por eventos aleatórios. Uma distribuição é classificada como crescente quando as falhas tendem a aumentar com o decorrer do tempo, indicando fadigas ou desgastes.

Dadas as características de construção ou recuperação, aliadas às condições de instalação dos transformadores de distribuição, a distribuição das falhas deve, então, conter parcelas dos três tipos de distribuição, proporcionando uma distribuição teórica gráfica conhecida como "curva da banheira", mostrada no gráfico 2.

Gráfico 2



Dos 3.953 transformadores falhados em 2006 e 2007, foi possível determinar o tempo de permanência em operação de 2.287 unidades. Destes, 494 unidades eram transformadores novos, que haviam sido instalados pela primeira vez após a aquisição. Os transformadores recuperados, que já haviam passado por ao menos um processo de recuperação, correspondiam a 1.793 unidades. De forma a distribuir os valores encontrados em intervalos, foram determinados:

- Maior vida registrada: 165 meses;
- Menor vida registrada: 1 mês;
- Diferença entre a maior e menor vida: 164 meses;
- Quantidade de falhas com vida determinada: 2.287;
- Média de vida: 65 meses;
- Quantidade de intervalos de classe: 14;
- Amplitude do intervalo de classe: 12 meses (1 ano).

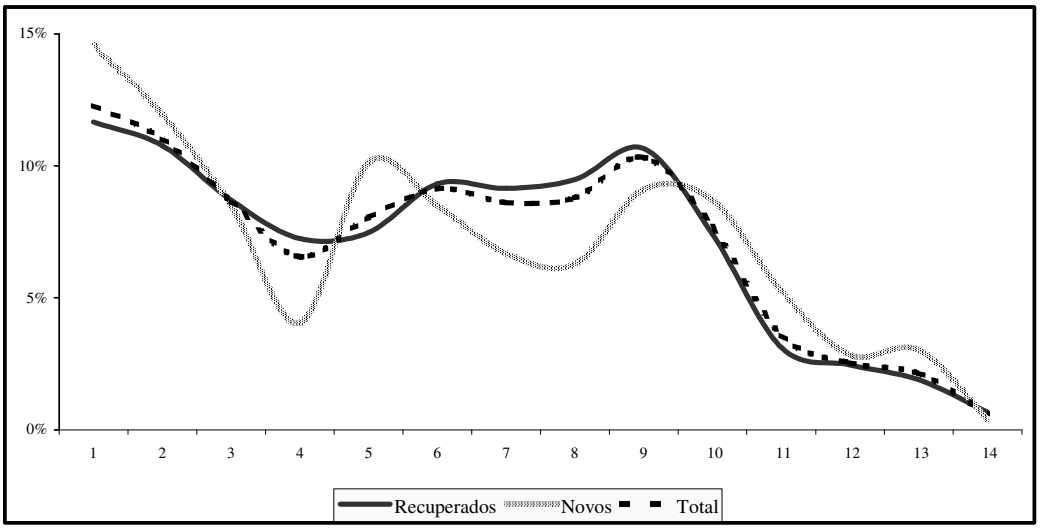
Com estas informações foram determinadas as respectivas quantidades de falhas por tempo de instalação, conforme pode ser observado na tabela 7.

Tabela 7

Tempo de instalação (anos)	Falhas (quantidade)			Falhas (%)		
	Recuperados	Novos	Total	Recuperados	Novos	Total
1	209	72	281	12%	15%	12%
2	193	59	252	11%	12%	11%
3	156	42	198	9%	9%	9%
4	130	20	150	7%	4%	7%
5	134	50	184	7%	10%	8%
6	167	42	209	9%	9%	9%
7	164	33	197	9%	7%	9%
8	170	31	201	9%	6%	9%
9	191	45	236	11%	9%	10%
10	133	43	176	7%	9%	8%
11	56	26	82	3%	5%	4%
12	44	14	58	2%	3%	3%
13	34	15	49	2%	3%	2%
14	12	2	14	1%	0%	1%

E com as freqüências de falhas da tabela 7, foi possível montar o gráfico 3, que mostra a distribuição das falhas nos intervalos.

Gráfico 3



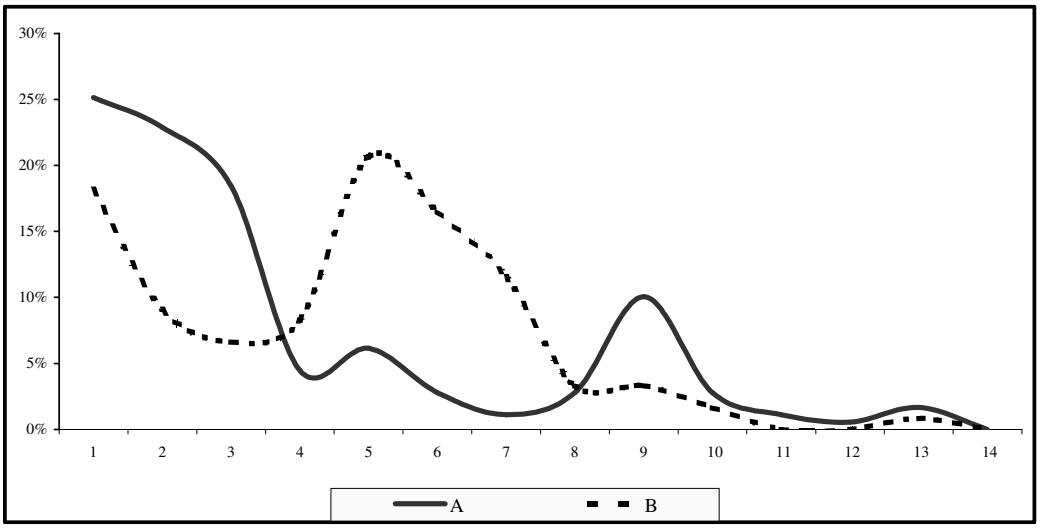
No gráfico 3 é possível identificar nos 4 primeiros anos de instalação, uma distribuição decrescente das falhas, comprovando o período em que as falhas tendem a ocorrer por falhas de construção, recuperação ou instalação. Mas, a partir do 5º intervalo, de forma diferente da observada na curva da banheira, é constatada uma grande quantidade de falhas que tem seu pico no nono período.

Também chama a atenção de não terem sido registradas falhas após o 14º ano, o que é explicado, fundamentalmente, por não terem sido encontrados registros confiáveis sobre a data de instalação dos demais transformadores.

As correlações das distribuições das vidas dos transformadores novos e recuperados em relação ao total indicam valores de 91 e 99%, respectivamente. A distribuição das falhas dos transformadores novos apresenta uma diferença significativa em relação à distribuição dos transformadores recuperados: existe uma grande quantidade de transformadores novos falhados no quinto ano de instalação.

Nos últimos anos, a Ampla tem adquiridos transformadores de distribuição de apenas dois fabricantes. A comparação entre o desempenho entre os mesmos é mostrada no gráfico 4.

Gráfico 4



A análise do gráfico 4 indica que, embora seja característica a grande incidência de falhas nos primeiros períodos para ambos os fabricantes, os transformadores de fabricação B apresentam um desempenho significativamente melhor que o fabricante A. Por outro lado, o fabricante A não apresenta um bom desempenho entre o quinto e sétimo anos de instalação.

10. Considerações Finais

A Ampla realiza a manutenção dos transformadores retirados de seu sistema através de uma empresa especializada, sendo adotados critérios técnicos e financeiros para a tomada de decisão sobre a sua realização ou não. A recuperação de um transformador representava, em 2007, cerca de 33% do custo de aquisição de uma nova unidade. Mesmo sendo uma relação baixa, a manutenção de cada unidade representou para um custo médio de R$1.200,00, logo, os custos de recuperação dos 3.953 transformadores de distribuição falhados em 2006 e 2007 representaram cerca de MR$4.743,00. Não estão considerados os custos de substituição das unidades falhadas, seu transporte, bem como o valor da energia não faturada no período em que os clientes atendidos por cada transformador falhado tiveram seu fornecimento interrompido. Percebe-se, então, que reduzir a quantidade de falhas de transformadores representa uma economia significativa de recursos, além de ser uma oportunidade para a melhoria da qualidade do fornecimento de energia elétrica ao cliente.

Embora o objetivo deste trabalho seja a apresentação das informações coletadas ao longo do ano de 2006, é possível a observação de tendências de comportamento nas falhas dos transformadores de distribuição. Estas observações são relacionadas a seguir.

- Existe uma tendência de queda da taxa de falha de transformadores de distribuição ao longo dos últimos anos, o que significa melhores procedimentos de fabricação e recuperação de transformadores; de manutenção dos sistemas de distribuição e das condições de trabalho dos mesmos.
- Foi verificada relação entre a taxa de falha dos transformadores de distribuição e a temperatura média, embora tenham sido registrados problemas pontuais que provocaram impactos no comportamento da distribuição da taxa de falha da Ampla.
- A distribuição da taxa de falha em alguns pólos operacionais não apresenta alto fator de correlação em relação à distribuição da taxa de falha da Ampla, indicando a existência de condições de trabalho particulares para algumas regiões.
- Os transformadores trifásicos apresentam taxa de falha cerca de 80% maior que os transformadores monofásicos e bifásicos.
- Quando agrupados conforme sua potência nominal de trabalho, os transformadores trifásicos de menor capacidade – 15, 30 e 45kVA, apresentam grande quantidade de unidades falhadas.
- As causas das falhas dos transformadores apontadas pelos pólos diferem das informações das análises históricas realizadas na manutenção.
- A distribuição da duração da vida dos transformadores indica uma grande incidência de falhas entre o quinto e nono anos de instalação do transformador no sistema. Esta informação conduz à idéia de uma grande incidência de falhas externas aos transformadores de distribuição neste período.

11. Conclusão

A relação entre o aumento da temperatura e as falhas dos transformadores de distribuição, além da maior incidência das falhas em equipamentos de menor capacidade, conduzem à idéia de que o carregamento seria o agente causador de maior parte dos eventos registrados. Ratifica esta idéia o fato de ser a sobrecarga a maior causa de falhas registrada no momento da realização da manutenção.

Considerando um carregamento inicial variando entre 80 e 90% de sua potência nominal e um crescimento do sistema também variando entre 2,0 e 3,0% ao ano, os transformadores entrariam em regime de sobrecarga entre o quarto e décimo primeiro anos de instalação, o que justificaria a grande quantidade de falhas a partir do quinto período.

O fato da predominância de transformadores trifásicos em regiões que apresentam maiores concentração e crescimento de carga, associada a uma incidência de falhas por sobrecarga, é a razão pela qual os transformadores trifásicos apresentam maior taxa de falha quando comparados aos outros equipamentos.

Finalizando, observa-se a necessidade de realização de estudos de viabilidade para adoção de novos critérios de instalação e carregamento dos transformadores de distribuição, uma vez que os dados analisados indicam uma alta incidência de falhas por sobrecargas.

12. Bibliografia

BERNADELLI, Walter Henrique. Transformadores de Distribuição – Técnicas para Redução de Queimas. Belo Horizonte, SENDI, 2006. 13p.

LAPPONI, Juan Carlos. Estatística usando Excel. Brasil, 2005, 249p

SILVA, Miguel Ângelo Henley. Manutenção Preventiva em Transformadores de Distribuição. Argentina, CIDEL, 2006. 17p.