

P&D Trafo Verde do Protótipo a Padronização, 10 anos de Pesquisa e Inovação.

Vagner Vasconcellos	José Mak	Luiz Cera Zanetta Jr
CPFL Energia	Grupo Bueno&Mak	EPUSP
vagnervasco@cpfl.com.br	josemak@buenomak.com.br	lzanetta@pea.usp.br

Resumo

Após 10 anos de pesquisa, avaliando e testando novos materiais isolantes para redução dos custos de produção dos transformadores de distribuição mais eficientes e ecologicamente corretos, chegou-se ao Trafo Verde Compacto. Obtivemos esse equipamento através do desenvolvimento de protótipos de transformadores de distribuição, estudados em laboratório de alta tensão para determinação do dimensionamento e para avaliação do desempenho e da biodegradabilidade dos óleos isolantes empregados. Nesses 10 anos de projeto buscou-se primeiramente desenvolver os protótipos de 88 kVA (potência obtida a partir de um 45 kVA que recebeu modificações de geometria e novos materiais), que serviram como base para a segunda etapa do projeto. Na segunda parte do projeto estudou-se a viabilidade da produção do protótipo em escala industrial nas potências normalizadas visando a utilização futura desses equipamentos na rede de distribuição. Finalmente, na terceira etapa foram feitos os ajustes no projeto para a melhoria da eficiência e compactação do equipamento.

1. Introdução

A necessidade de extensão da vida útil de transformadores de distribuição, assim como da redução efetiva de custos de manutenção e do número de falhas, com conseqüente ganho da disponibilidade e qualidade do fornecimento, faz com que se desenvolvam novos materiais, novos critérios de exploração de sistemas elétricos e novos conceitos de gerenciamento de ativos.

O desenvolvimento desse projeto, foi custeado com recursos do Programa de P&D ANEEL das distribuidoras do Grupo CPFL. O Projeto de P&D denominado PD-189 Trafo Verde – Otimização de Perdas, foi realizado pelas empresa B&M Pesquisa e Desenvolvimento, e a partir do terceiro ano, a Itaipu – Fábrica de Transformadores se envolveu na construção dos protótipos, e com a definição do isolante líquido, a Cargill - Fabricante do óleo vegetal, se agregaram à parceria nas demais etapas da cadeia da inovação.

No desenvolvimento do projeto aliou-se o emprego de óleos alternativos com características de maior resistência à oxidação, maior poder de transferência de calor, maior vida útil para o transformador, menores temperaturas de funcionamento, maior estabilidade térmica e menor custo de manutenção, maior biodegradabilidade e menor agressividade ambiental.

Com a finalidade de atender a esses requisitos, buscou-se o desenvolvimento de novo projeto de transformador de distribuição, empregando materiais isolantes fluidos ou sólidos já disponíveis no mercado de maneira incipiente.

Para tanto, também se estudou o desempenho de isolantes alternativos já disponíveis no mercado como, por exemplo, papéis isolantes feitos de poliaramidas, óleos compostos de misturas de poli-alfa-olefinas e hidrocarbonetos aromáticos, ou ainda os óleos isolantes derivados de óleos vegetais.

Foram pesquisados, propostos, definidos, avaliados e testados novos materiais isolantes para redução do custo de produção dos transformadores de distribuição em fábrica e para redução de custos de manutenção.

Foram identificadas as alternativas de maior viabilidade técnico-econômica dentre aquelas estudadas. A alternativa escolhida foi avaliada por meio do desenvolvimento de protótipos de transformadores de distribuição, que foram estudados em laboratório de alta tensão para determinação do dimensionamento e para avaliação do desempenho e da biodegradabilidade dos óleos isolantes de maior potencial empregados.

Foi escolhida uma região típica para avaliação de desempenho em condições reais de campo.

Esta metodologia resultou em um novo transformador de distribuição, empregando materiais isolantes mais eficazes e interessantes que reduzem sensivelmente os custos de fabricação e de manutenção, de maneira técnica e econômica e melhor custo/benefício. Também como resultado, foi viabilizada a construção de uma planta de processamento do óleo vegetal no país.

2. Desenvolvimento da Primeira Etapa do Projeto – Protótipos

2.1. Extensão de vida útil de transformador de distribuição

Atualmente, os transformadores de distribuição possuem uma vida útil em torno de 20 anos dependendo da carga a que estará submetido. Dessa forma, no primeiro ano deste estudo, fez-se o levantamento do estado da arte de soluções de eficiência térmica para transformadores (fator preponderante na vida útil), principalmente, por meio da utilização de novos óleos isolantes.

Foram colhidos dados sobre experiências de fabricantes, dos procedimentos e das metodologias em uso. Foram pesquisadas algumas experiências e tentativas de redução de custos de fabricação por meio do ganho de eficácia. Investigaram-se os problemas associados à utilização de novos materiais por parte dos fabricantes de transformador de distribuição.

Na fase seguinte, avaliou-se comparativamente o desempenho dos materiais isolantes escolhidos, por meio de ensaios investigativos em laboratório químico.

A melhor alternativa foi selecionada para fazer parte do desenvolvimento de protótipos de transformadores de distribuição, que foram estudados em laboratório de alta tensão (ensaios de tipo) para determinação do dimensionamento e para avaliação do desempenho e da biodegradabilidade dos óleos isolantes empregados.

2.2. Desenvolvimento do novo projeto de transformador de distribuição (Trafo Verde)

Trata-se de um transformador trifásico compacto (construído em caixa de transformador de 45 kVA) que apresenta as seguintes características:

- Transformador Híbrido com Núcleo Normal
- Potência: 88 kVA
- Tensões de AT: 13800 V a 11400 V
- Tensões de BT: 220/127 V
- Óleo: 81 litros (óleo biodegradável)
- Peso: 350 kg
- Perdas Totais: 1969 W
- Perdas a vazio: 236 W

Os protótipos que forem aprovados e que serviram de base para a produção em escala industrial foram os isolados com fluido isolante à base de Éster Natural e biodegradável. O papel isolante utilizado foi o kraft convencional.

2.3. Menor Custo por kVA

Como o dimensionamento e capacidade dos novos transformadores não se enquadram nos padrões e normalização existentes, optou-se por comparar o novo transformador com o já existente de 45 kVA, pelo fato dos dois terem as mesmas dimensões e geometria externa, resultado da compactação almejada por este projeto.

Para análise das perdas do novo transformador optou-se pela comparação com o transformador de 75 kVA, já que este se aproxima mais da potência disponível em kVA.

Como primeiro ponto a ser analisado, temos a redução substancial de peso que anteriormente se mostrava como 435 kg diminuindo 85 kg, reduzindo o esforço necessário para a instalação e manutenção do equipamento, além de exigir menos do conjunto de fixação (cruzetas, mão francesa e parafusos) empregadas.

Junto à diminuição de peso temos a redução do volume de óleo utilizado pelo novo transformador se comparado ao transformador de 75 kVA, de 102 litros (óleo mineral) para 81 litros (óleo biodegradável).

As alterações empregadas no novo transformador cooperaram para a redução de preço do equipamento ao comparar o valor do kVA unitário do transformador de 45 kVA já existente com o valor do novo.

Apesar da compactação, o transformador híbrido com núcleo normal, atinge maior desempenho, pois suporta maiores temperaturas do óleo e conseqüentemente maior carregamento.

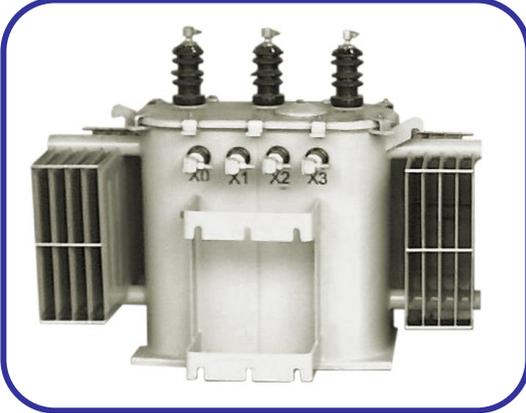
	
<u>Transformador Trifásico Convencional</u> Potência: 45 KVA Tensões de AT: 11400 V a 13800 V Tensões de BT: 127/ 220V Peso 435kg Litros 90 litros Preço/kVA: R\$ 84,40	<u>Transformador Trifásico Verde</u> Potência: 88 KVA Tensões de AT: 11400 V a 13800 V Tensões de BT: 127/220 V Peso 350Kg Litros 81 litros (óleo biodegradável) Preço/kVA (estimado): R\$ 53,40

Figura 1. Comparativo Trafo Verde x Trafo Convencional

3. Desenvolvimentos dos “Cabeça de Série” – Produção em escala industrial.

Como resultado do projeto original, e em virtude dos testes de campo apresentar inexistência de não conformidades e de ocorrências de mau funcionamento ou anormalidades, foi consenso dos integrantes da equipe científica de que o número de protótipos estava aquém do necessário para que se possa validar o bom desempenho dos protótipos (originalmente em numero de cinco).

Estatisticamente cinco transformadores, em um espaço de mais de 180.000 unidades em operação na CPFL, é insignificante para validá-los, considerando-se a quantidade amostral

não suficiente para validação em massa, por não apresentar segurança do ponto de vista estatístico.

Para se proceder com a construção dos transformadores previstos em projeto, constatou-se a necessidade de desenvolvimento da documentação para especificação de compra dos equipamentos baseado no projeto e na necessidade da CPFL, para garantias de recebimento conforme normas existentes na concessionária.

No desenvolver do projeto, foram surgindo imprevistos durante o desenvolvimento das atividades, que foram tabulados e desmembrados por grupos de causas, com soluções informadas nos relatórios quadrimestrais do projeto.

Assim, fez a necessidade de inserir uma quantidade maior de transformadores verdes para avaliação em operação nos pontos críticos e de maior solicitação na rede. As 250 unidades complementares foram fabricadas no início em março de 2007, colocando-se em operação ao longo do ano de continuidade do projeto.

Já nesta altura da cadeia da inovação os transformadores verdes começaram a ser utilizados no uso corriqueiro pelas equipes de projeto e ou manutenção da CPFL Paulista e da Piratininga.

4. Projeto de Otimização de Perdas – 3ª Etapa do Projeto

Uma vez vencida a etapa de produção em série dos Trafos Verdes, aumentando a quantidade de transformadores sobre supervisão em campo, deu-se início a etapa de otimização das perdas elétricas a fim de atender uma das prioridades e foco da 3ª Etapa.

Assim sendo foram elaborados projetos com elevação de temperatura 75°C explorando a capacidade térmica maior do óleo vegetal isolante em comparação ao óleo mineral. Em conjunto com a exploração da capacidade térmica também houve a otimização do projeto visando a redução das perdas a vazio com manutenção das perdas totais do equipamento. Os equipamentos desenvolvidos nessa 3ª etapa do projeto bem como os valores de perdas obtidos encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 1: Perdas Elétricas - Trafo Verde Compacto x Trafo Convencional.

Potência (kVA)	Classe Tensão (kV)	NBR 5440/2014		Trafo Verde Compacto	
		Vazio (W)	Totais (W)	Vazio (W)	Totais (W)
30	15	150	695	128	695
30	25	160	790	114	790
45	15	195	945	140	945
45	25	215	1055	155	1055
75	15	295	1395	194	1395
75	25	315	1550	198	1550
112,5	15	390	1890	246	1890

A redução das perdas a vazio dos transformadores tem impacto significativo no índice de perdas técnicas da distribuidora em função do valor ser constante e não ter relação alguma com a carga do transformador.

Essa redução permite a concessionária adquirir um montante menor de energia dos agentes de geração a fim de suprir a energia referente às perdas desses equipamentos.

A economia gerada pela redução de perdas a vazio compensou o custo inicial maior do Trafo Verde Compacto em relação ao convencional em poucos anos, viabilizando a aquisição dos equipamentos e justificando o maior valor inicial de aquisição. A tabela a seguir mostra a variação dos valores de aquisição dos equipamentos.

Tabela 2: Variação de preços Trafo Verde Compacto x Trafo Convencional.

Potência (kVA)	Classe Tensão (kV)	Variação
30	15	7%
	25	4,7%
45	15	6,9%
	25	5,1%
75	15	7,4%
	25	11,3%
112,5	15	11,8%

Como podem ser observado na tabela 2, os valores de aquisição em relação ao transformador convencional isolado com óleo mineral, são de 5 a 12% superiores em função da utilização do óleo vegetal que é aproximadamente 30% mais caro que o óleo mineral. O valor do óleo vegetal no início do projeto era aproximadamente 4 vezes superior ao óleo mineral.

Foi feita uma simulação variando o carregamento percentual do transformador e calculadas as perdas para cada patamar de carregamento cujos resultados são mostrados na figura a seguir. Foi tomado como base o transformador de 75 kVA classe 15 kV cuja quantidade é relevante nas distribuidoras do Grupo CPFL.

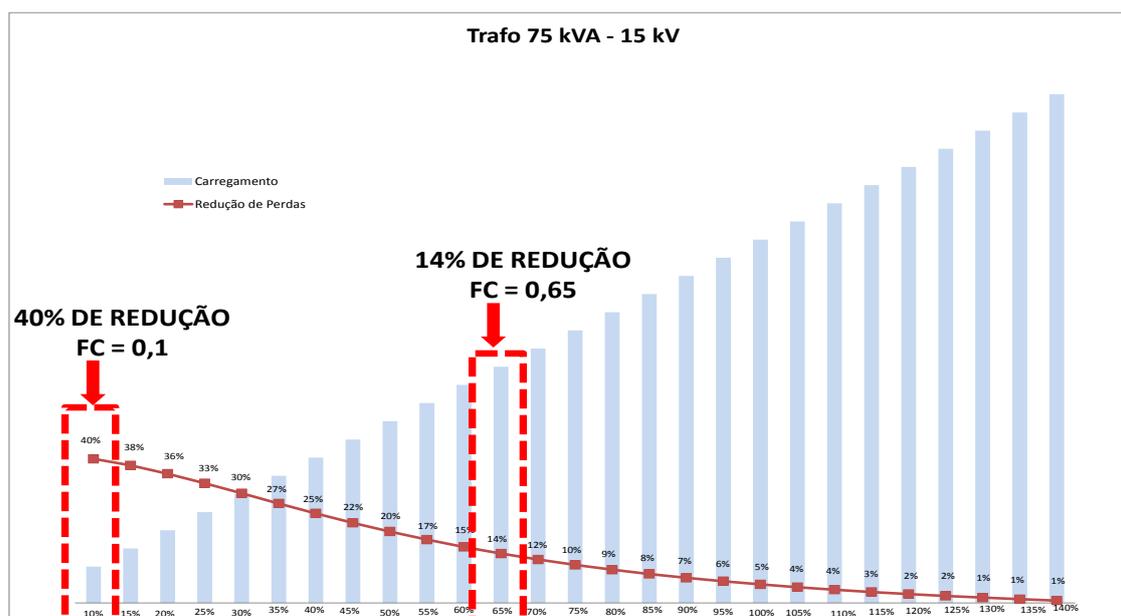


Figura 2 – Redução de Perdas x Carregamento – Transformador 75 kVA classe 15 kV.

No gráfico da figura anterior, as barras representam o carregamento dos transformadores no intervalo de 10 a 140% enquanto a linha representa a redução percentual de perdas a vazio acrescidas da perda em carga no respectivo patamar de carregamento.

Analisando a figura percebemos que para transformadores com baixo fator de carga a redução de perdas é maior chegando a 40% em alguns casos. Esses transformadores são muito comuns nas áreas rurais e nesses casos o valor de perda a vazio é mais significativo e sua redução gera grandes ganhos de otimização.

Porém, a maioria dos transformadores opera com fator de carga da ordem de 70% e analisando o gráfico da figura notamos que para valores de carregamento de 65% a redução de perdas é da ordem de 14% por equipamento de 75 kVA.

Quanto menor o carregamento do transformador, mais rápido será o retorno do investimento inicial maior se comparado ao transformador convencional isolado com óleo mineral. A figura a seguir mostra o tempo de retorno do investimento inicial em função do carregamento do transformador.

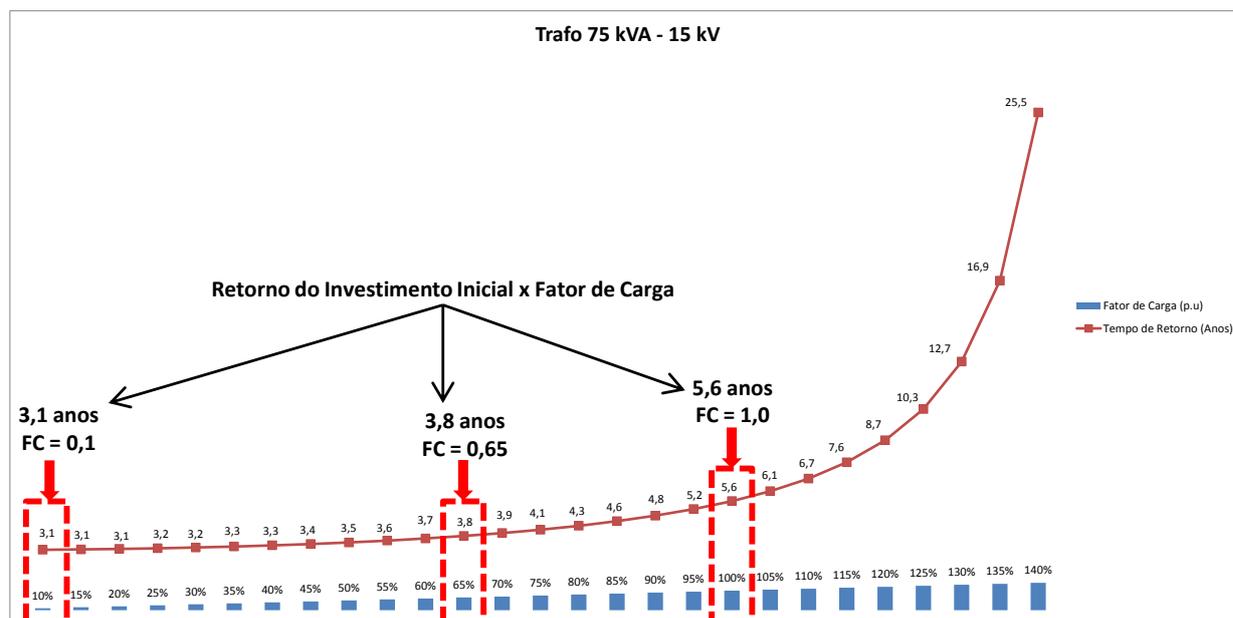


Figura 3 – Redução de Perdas x Carregamento – Transformador 75 kVA classe 15 kV.

A figura mostra que o tempo de retorno do investimento varia entre 3 e 6 anos aproximadamente de acordo com o carregamento dos transformadores. Considerando que a maioria dos transformadores de distribuição opera com fator de carga de 65%, o tempo médio de retorno do investimento inicial maior será de aproximadamente 4 anos.

Para a valoração dos ganhos provenientes da redução de perdas elétricas, foi considerado o valor de R\$ 102,00 / MWh, valor de referência da EPE para estudos de definição de alternativas de menor custo global.

Visando realizar uma análise mais abrangente quanto a quantidade de equipamentos, foi feita uma simulação considerando o carregamento em 65% para os transformadores de distribuição nas potências constantes na NBR 5440/2014 nas classes 15 e 25 kV.

Foi analisada a redução de perdas elétricas para o carregamento de 65% e calculado o tempo de retorno do investimento inicial maior na aquisição do Trafo Verde compacto. As tabelas a seguir mostram de forma resumida os valores obtidos nas simulações.

Tabela 3: Resumo dos valores obtidos para transformadores de distribuição classe 15 kV

Carregamento	Potência (kVA)	Variação Perdas (W)	Energia Anual (MWh)	Ganho Anual	Retorno Invest. (Anos)	Redução Perdas (%)
65%	30	43,27	0,38	R\$ 39,04	6,2	11%
	45	69,44	0,61	R\$ 62,65	4,6	13%
	75	110,23	0,97	R\$ 99,46	3,8	14%
	112,5	154,29	1,35	R\$ 139,21	5,2	14%

Tabela 4: Resumo dos valores obtidos para transformadores de distribuição classe 25 kV

Carregamento	Potência (kVA)	Variação Perdas (W)	Energia Anual (MWh)	Ganho Anual	Retorno Invest. (Anos)	Redução Perdas (%)
65%	30	52,90	0,46	R\$ 47,73	3,5	12%

	45	82,33	0,72	R\$ 74,28	2,8	13%
	75	129,47	1,13	R\$ 116,82	5,0	14%

Analisando as tabelas 3 e 4 mostradas anteriormente, notamos que os menores tempos de retorno de investimento são para os transformadores de 75 kVA na classe 15 kV e 45 kVA na classe 25 kV, ambos para o carregamento de 65%.

Os resultados foram muito animadores haja vista que as potências que apresentaram os melhores resultados quanto ao tempo de retorno de investimento, também são as de maiores quantidades em suas respectivas classes de tensão.

Essa análise ajuda a direcionar as escolhas dos transformadores a serem substituídos em caso de avaria ou depreciação contábil do ativo.

3. Conclusões e Considerações Finais

Após 10 anos de pesquisa desde a confecção dos primeiros protótipos até o aperfeiçoamento do projeto inicial chegamos a um novo transformador de distribuição mais compacto, mais eficiente e ecologicamente correto.

Os novos transformadores têm as mesmas dimensões e geometria externa, com perdas a vazio significativamente menores com manutenção das perdas totais.

Os resultados dos ensaios de compatibilidade demonstraram a adequação dos materiais escolhidos, resultando em um equipamento mais robusto haja vista que o óleo vegetal é higroscópico mantendo o papel com menores teores de água tornando o equipamento menos sensível às ações de curto circuito.

Os resultados dos ensaios elétricos demonstraram que apesar da compactação, os transformadores híbridos com núcleo invertido, atingem maior desempenho, pois suportam maiores temperaturas do óleo e conseqüentemente maior carregamento, resultando em transformadores com potência nominal de 88 kVA.

O desenvolvimento do Trafo Verde Compacto através de um Projeto de P&D mostra a importância do investimento em pesquisa que contribuiu para a criação de um novo transformador de distribuição utilizando materiais convencionais adicionados a um fluido isolante vegetal de maior capacidade térmica se comparado ao óleo mineral convencional.

No momento contamos com aproximadamente 5000 equipamentos instalados em nossa rede e a partir de 2014 o Grupo CPFL tornou o Trafo Verde Compacto padrão de transformadores de distribuição em suas oito distribuidoras.

4. Referências bibliográficas

McSHANE, C. P., RAPP, K.J., CORKRAN, J. L., GAUGER, G. A., LUKSICH, J. "Aging of Paper Insulation in natural EsterDielectric Fluid". Transmission & Distribution Conference & Exposition, IEEE/PES, Atlanta - GA, Nov, 2001.

SCHELLHASE, H. & DOMINELLI, N "Environmentally acceptable transformer oils" EPRI Report WO 4338-01, Palo Alto -CA, EPRI, Out. 2000, 90 p.

McSHANE, C. P. "New Safety Dielectric Coolants for Distribution and Power Transformers". IEEE Industry Applications Magazine, vol. 6, nº 3, pp.24-32, Maio/Junho 2000.

OOMMEN, T.V., CLAIBORNE, C.C." Biodegradable Insulating Fluid from High Oleie Vegetable Oils". CIGRE 15-302, 1998.

XIE, J. HSICH, Y.L. "Enzyme-Catalysed Transesterification on Cellulose". Conf. Proc. ACS Polymeric Matls., vol. 82, pp.406-407, 2000.

ILUANG, M.R., LI, X.G." Thermal Degradetion of Cellulose and Cellulose Esters". J. of Applied Polymer Science, vol. 68, pp.293-304, 1998.

JAIN, R.K., LAL, K., BHATNAGAR, H.L." A Kinetic Study of the Thermal Degradation of Cellulose and Its Derivatives".Makromol. Chem. 183, pp. 3003-3017, 1982.

NAKAGAWA, F. & MAK, J. "Análise da Queima de Transformadores de Distribuição", Estudo DEOP-072, Divisão de Engenharia de Operação e Manutenção da Distribuição, CPFL, 1994, 283 p.

SAMESIMA, M. I., OLIVEIRA, J. C."Avaliação e Estimativa da Perda de Vida Em Transformadores Submetidos à Distorções Harmônicas". Revista Ciência e Engenharia da UFU. Uberlândia - MG, v.1, p. 165/78, 1994

PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., BASSI, W., BIAGIONI, P. H." Proteção de transformadores de distribuição face a surtos". (IEE-USP/CED 211/STRA002/RL 001/Nov, 1995)

MURATA, S. T., PIANTINI, A., BASSI, W. "Modelo de transformadores de distribuição para estudo de tensões transferidas ao secundário, na condição sob carga", (IEE-USP/CED 283/STRA002/NT 005/Fev, 1998)

LOPES, M.P.M. "Desenvolvimento de um modelo para a representação de transformadores de distribuição em estudos a respeito de tensões transferidas ao secundário quando da ocorrência de descargas atmosféricas próximas à linha". Curso(Engenharia Elétrica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 1996

PIANTINI, A., MALAGODI, C. V. S. "Sobretensões transferidas ao secundário - características e frequência de ocorrência".III Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão (III ENEAT), Campina Grande, 2000.

RAVAGLIO, M. A., SCHAEFER, J. C., TEIXEIRA JÚNIOR, J.A. "Estudo da Redução de Perdas em Transformadores de Distribuição". Eletricidade Moderna. São Paulo: v.27, n.306, p.182 - 205, 1999.

RAVAGLIO, M. A., SCHAEFER, J. C., TEIXEIRA JÚNIOR, J. A. "Redução de Perdas em Transformadores de Distribuição" In: III ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE ALTA TENSÃO, 2000, Campina Grande. Anais do III ENEAT, 2000.

SANS, M. A., TEIXEIRA JÚNIOR, J. A. "Avaliação da Qualidade do Isolamento" In: Curso de Técnicas de Alta Tensão, 1988,Curitiba. Anais do Curso, 1988. v.1. p.1 – 29

SAMESIMA, M. I., ARAÚJO, S. C. N. "Avaliação estimativa de perda de vida de transformadores". Ciência & Engenharia.Uberlândia:, v.1, p.65 - 78, 1994.

SAMESIMA, M. I., ARAÚJO, S. C. N. "Finite elements method applied to analysis of transformer loss of life driving nonlinear industrial loads" In: JIASC'95 - Japan Industry Applications Society Conference, 1995, Hitachi. Anais do JIASC'95.Hitachi: IEE/JIASC, 1995. v.1. p.34 – 40

SAMESIMA, M. I., OLIVEIRA, J. E. C. "Uma proposta alternativa na verificação experimental das respostas detransformadores para instrumentos submetidos às distorções harmônicas" In: 5o. .ERLAC - Encontro Regional LatinoAmericano da Cigre, 1993, Ciudad Del Este.

SIMONE CRISTINA NUNES ARAÚJO. "Uma contribuição à avaliação e estimativa de perda de vida em transformadores".1994. Dissertação (Engenharia Elétrica) -Universidade Federal de Uberlândia