

**2º SEMINARIO TÉCNICO
DAS EMPRESAS DE ENERGIA
DE SÃO PAULO**

**CÁLCULO DO DESGASTE DE
UNIDADES TRANSFORMADORAS**

Autores:
JOSÉ MAK
BENEDITO EDMUNDO MOURA FERREIRA
RUI CÉSAR MARQUES

Empresa:
COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ

SÃO PAULO - SP - BRASIL
1987

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo levar ao conhecimento dos participantes deste seminário, a sistemática de controle da perda de vida de transformadores de potência como ferramenta da manutenção e da operação.

O projeto em si já saiu da prancheta e esta sendo utilizado pela manutenção para cálculo do desgaste de transformadores em operação como sistema, e como sub produto não menos importante, resultará para a operação um aproveitamento adequado da capacidade de transformação do sistema, entre inúmeros outros que apresentaremos em época oportuna.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

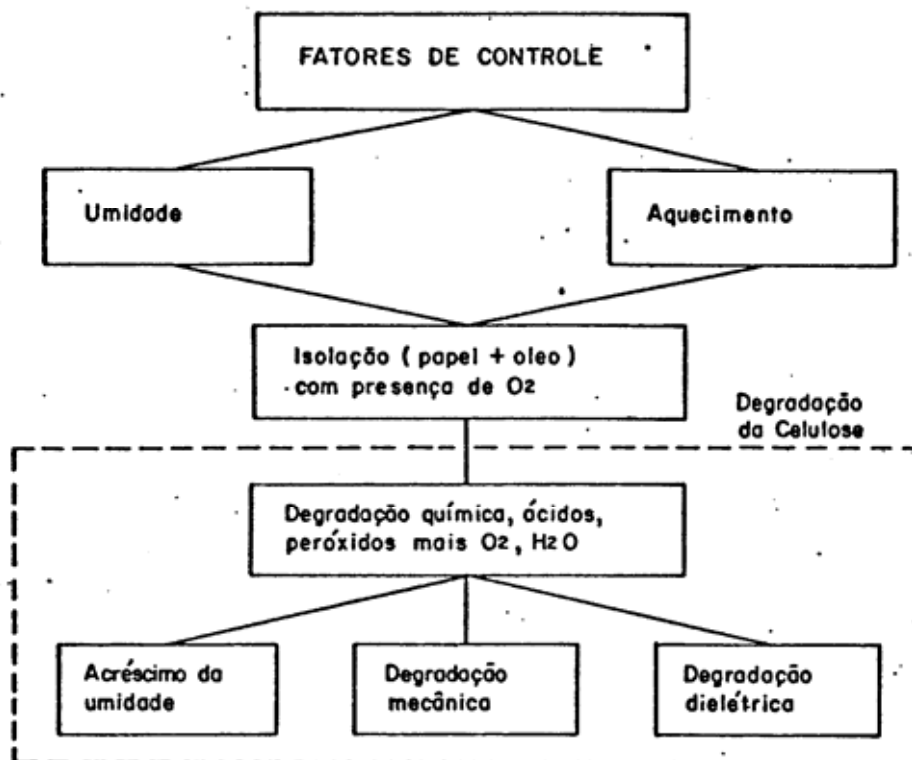
Como sabemos, a vida do transformador é a vida do papel, portanto o ponto básico para a engenharia de manutenção é o sistema de transformador.

O sistema de isolamento de um transformador consiste de um líquido e uma isolamento sólida ou seja, o óleo isolante e o papel Kraft (embora hoje existam substitutos para ambos, o papel-óleo tem provado ser o melhor).

A deterioração das propriedades mecânicas da isolamento é o principal fator que rege a vida útil do transformador.

Basicamente podemos esquematizar a degradação da celulose pela que se segue:

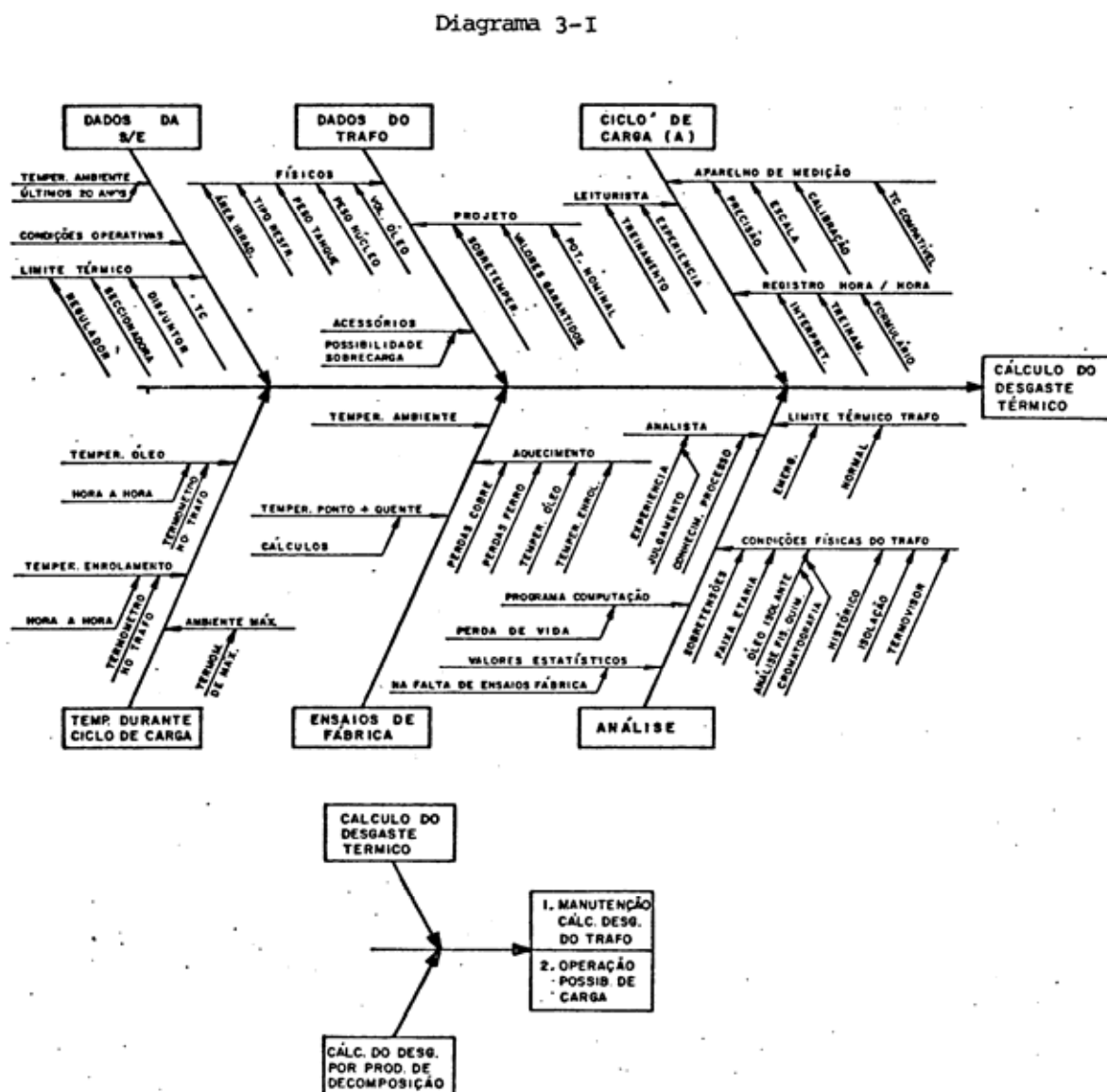
Figura 2-I



O fim de vida de um transformador é o fim de sua confiabilidade, ditada pela resistência à tração mínima (50% de seu valor original) necessária do isolamento para resistir aos esforços mecânicos, resultantes de curto-circuito nas linhas.

A teoria utilizada para os cálculos de desgaste térmico esta baseada na evolução e no aperfeiçoamento dos guias de carregamento existentes e que se consolidou na atual norma brasileira NBR 5416/81 “Aplicação de Carga em Transformadores de Potência”, adaptada para uma expectativa de vida de 30 anos.

O diagrama abaixo, demonstra esquematicamente como determinar o desgaste térmico.



O desgaste total será dado pelo desgaste térmico mais o desgaste pelos produtos de decomposição do óleo.

O diagrama “espinha de peixe” (3-1) situa como os dados da subestação, do transformador, os ciclos de carga diários, as temperaturas durante o ciclo de carga, os ensaios de fábrica e as funções da análise se interagem.

3.1 - Características Técnicas dos Transformadores

Tipo: Auto-transformador selado a nitrogênio

Nº de Cia.	7.568	—	1Ø	—	10/12,5 MVA/ONAF
	7.569	—	1Ø	—	10/12,5 MVA/ONAF
	7.570	—	1Ø	—	10/12,5 MVA/ONAF

Instalação: SE LARANJEIRAS

Tensão: 138/69 kV

Fabricante: Allis Chalmers

Ano de Fabricação: 1956

Correntes Nominais: 251 A em IN
314 A em VF

Peso da Parte Ativa: 39.327 kg

Peso do Tanque e Acessórios: 25.991 kg

Volume do Óleo Isolante: 29.366 l

Perdas do Cobre: 96.490 W

Perdas do Ferro: 40.630 W

Sobretensão do Topo do Óleo: 46,4 °C

Sobretensão do Enrolamento: 43,7 °C

Condições Físico-Químico do Óleo:

Valores:

Trafo	7569	7570	7568
T.Interfacial	22.1	30.7	27.7
Índice Acidez	0,266	0,104	0,138
IQO	83	295	200

4. CÁLCULO DO DESGASTE TÉRMICO

4.1 - Condições operativas

4.1.1 - Histórico

Fabricado nos Estados Unidos em 1.956, entrou em operação na Usina Termoelétrica de Carioba em 1.957 e em 1.958 foi removido para a SE Laranjeiras, não tendo sido solicitado severamente ao longo destes anos.

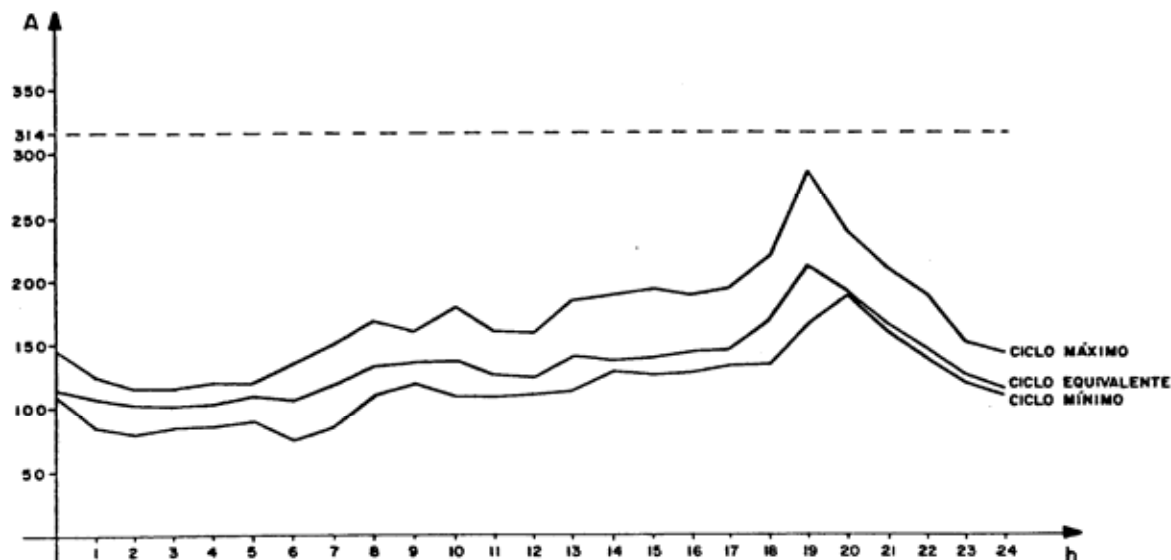
Para que um transformador tenha a duração de 30 anos, considerada ideal em termos de capitalização, amortização e lucro, o desgaste anual deve ser de 3,33% sendo que em seu histórico operativo a pior condição encontrada, foi um desgaste anual de 0,13%, seguido em segundo lugar por um baixíssimo 0,08%.

4.1.2 - Ciclos de Carga Diários

No gráfico abaixo, verificamos dados levantados de um recente acompanhamento dia a dia durante 6 meses, o perfil dos ciclos de carga em amperes, o mais baixo correspondente ao

carregamento mínimo no período, o mais alto correspondente ao carregamento máximo imposto no período, e o intermediário é o ciclo equivalente.

GRÁFICO 4-I



Este ciclo equivalente foi determinado de modo que repeti do durante 180 dias a uma temperatura ambiente média de 27°C apresentaria idêntico desgaste ao isolamento, apresentado pela somatória dos desgastes baseados na temperatura máxima do dia, do seu respectivo ciclo de carga horário e das temperaturas reais apresentadas pelo óleo e enrolamento.

A Tabela 4-II mostra os valores do ciclo de carga mínimo, a Tabela 4-III do ciclo de carga máxima e a Tabela 4-IV do ciclo de carga equivalente.

S/F LARANJEIRAS – BANCO AUTO-TRAFO 37.5 MVA – 138/69 KV ALLIS CHALMERS
ESTUDO DA PERDA DE VIDA REAL. CICLO DE CARGA MÍNIMO.

TABELA 4-II ANÁLISE DA PERDA DE VIDA DO TRANSFORMADOR

HORÁRIO	TENDO O CICLO DE CARGA DIÁRIO				TENDO AS TEMPERATURAS MEDIDAS			
	CARGA (A)	TEMPERATURAS		PERDA DE VIDA PERCENTUAL	TEMPERATURAS			PERDA DE VIDA CONCEITUAL
		ÓLEO	EROLA MENTO		ÓLEO	ENROLA MENTO	PONTO+ QUENTE	
			(TEOR)					
1.00	85	47.4	43.3	0.000002722	45	46	47.2	0.000002297
2.00	80	47.0	47.3	0.000002517	44	46	47.1	0.000002257
3.00	85	46.7	47.6	0.000002427	44	45	46.2	0.000001963
4.00	85	46.4	47.3	0.000002328	44	45	46.2	0.000001963
5.00	80	46.2	47.2	0.000002293	44	45	46.4	0.000002000
6.00	75	46.0	46.7	0.000002111	44	44	45.0	0.000001618
7.00	85	45.8	47.3	0.000002113	44	44	45.2	0.000001676
8.00	110	45.9	47.7	0.000002312	44	44	45.9	0.000001852
9.00	120	46.1	47.5	0.000002466	44	44	46.1	0.000001935
10.00	110	46.2	47.5	0.000002413	44	45	46.9	0.000002168
11.00	110	46.2	47.6	0.000002434	44	46	47.9	0.000002535
12.00	110	46.3	47.6	0.000002451	45	46	47.9	0.000002535
13.00	115	46.4	47.8	0.000002527	46	48	50.0	0.000003530

14.00	140	46.8	48.8	0.000002923	46	48	50.7	0.000003955
15.00	127	46.9	48.7	0.000002867	46	49	51.3	0.000004338
16.00	128	47.1	48.8	0.000002946	46	49	51.4	0.000004357
17.00	134	47.3	49.2	0.000003104	45	50	52.6	0.000005214
18.00	135	47.5	49.4	0.000003207	45	50	52.6	0.000005238
19.00	165	43.1	50.7	0.000003927	48	51	54.6	0.000007057
20.00	180	49.0	52.3	0.000005012	48	51	55.5	0.000008076
21.00	160	49.3	51.8	0.000004647	47	51	54.4	0.000006878
22.00	140	49.3	51.3	0.000004287	45	46	48.7	0.000002906
23.00	120	49.0	50.5	0.000003829	45	44	46.1	0.000001935
24.00	110	48.6	50.0	0.000003506	45	44	45.9	0.000001825

PERDA DE VIDA TOTAL (EM 24 HORAS)

$$0.00071370 \times (365/0.0260505) \times (28/0.76207255)$$

0.000080138

S/E LARANJEIRAS – BANCO AUTO-TRAFO 37.5 MVA – 138/69 kV ALLIS CHALMERS
ESTUDO DA PERDA DE VIDA REAL. CICLO DE CARGA MÁXIMO.

TABELA 4-III

ANÁLISE DA PERDA DE VIDA DO TRANSFORMADOR

HORÁRIO	TENDO O CICLO DE CARGA DIÁRIO				TENDO AS TEMPERATURAS MEDIDAS			
	CARGA (A)	TEMPERATURAS		PERDA DE VIDA PERCENTUAL	TEMPERATURAS			
		ÓLEO	EROLA MENTO		ÓLEO	ENROLA MENTO	PONTO+ QUENTE	PERDA DE VIDA CONCEITUAL
			(TEOR)					
1.00	125	52.7	54.3	0.000006812	43	44	46.3	0.000001980
2.00	115	51.3	53.2	0.000005786	43	44	46.0	0.000001893
3.00	115	51.0	52.5	0.000005170	43	43	45.0	0.000001616
4.00	120	50.5	52.0	0.000004815	43	42	44.1	0.000001409
5.00	120	50.0	51.5	0.000004473	43	42	44.1	0.000001409
6.00	135	49.8	51.7	0.000004544	43	42	44.6	0.000001513
7.00	150	49.8	52.0	0.000004808	43	41	44.1	0.000001391
8.00	170	50.1	52.9	0.000005451	43	42	45.7	0.000001817
9.00	160	50.2	52.7	0.000005344	43	42	45.4	0.000001720
10.00	120	50.7	53.7	0.000006166	43	44	48.1	0.000002630
11.00	160	50.7	53.2	0.000005738	43	44	47.4	0.000002356
12.00	160	50.7	53.2	0.000005764	43	46	49.4	0.000003215
13.00	185	51.2	54.3	0.000006795	43	48	52.3	0.000005003
14.00	190	51.7	54.9	0.000007437	43	48	52.5	0.000005147
15.00	195	52.1	55.5	0.000008166	43	50	54.7	0.000007156
16.00	190	52.5	55.7	0.000008892	43	50	54.5	0.000006956
17.00	195	52.3	56.2	0.000009043	43	51	55.7	0.000003307
18.00	220	53.6	57.3	0.000011331	43	52	57.7	0.000011150
19.00	285	55.9	62.1	0.000021226	43	55	63.6	0.000026120
20.00	240	56.6	61.4	0.000019139	43	54	60.5	0.000016870
21.00	210	56.7	61.5	0.000016833	43	52	57.2	0.000010504
22.00	180	56.3	59.6	0.000014706	43	49	53.5	0.000005986
23.00	155	55.4	57.7	0.000011301	43	45	48.2	0.000002683
24.00	145	54.5	56.69	0.000009546	43	45	47.9	0.000002550

PERDA DE VIDA TOTAL (EM 24 HORAS)

$$0.000208787 \times (365/0.076207255) \times (28/2.13380314)$$

0.000131380

TABELA 4-III

ANÁLISE DA PERDA DE VIDA DO TRANSFORMADOR

HORÁRIO	TENDO O CICLO DE CARGA DIÁRIO				TENDO AS TEMPERATURAS MEDIDAS			
	CARGA (A)	TEMPERATURAS		PERDA DE VIDA PERCENTUAL	TEMPERATURAS			
		ÓLEO	EROLA MENTO		ÓLEO	ENROLA MENTO	PONTO+ QUENTE	PERDA DE VIDA CONCEITUAL
			(TEOR)					
1.00	107	48.6	49.9	0.000003497				
2.00	104	48.3	49.5	0.000003266				
3.00	102	47.0	49.1	0.000003078				
4.00	104	47.6	48.9	0.000002968				
5.00	110	47.5	48.8	0.000002945				
6.00	107	47.3	48.6	0.000002841				
7.00	118	47.3	48.8	0.000002929				
8.00	133	47.4	49.3	0.000003159				
9.00	136	47.6	49.5	0.000003282				
10.00	137	47.8	49.7	0.000003379				
11.00	126	47.8	49.5	0.000003255				
12.00	125	47.8	49.4	0.000003237				
13.00	140	48.0	50.0	0.000003505				
14.00	138	48.1	50.0	0.000003551				
15.00	140	48.2	50.2	0.000003652				
16.00	145	48.4	50.5	0.000003825				
17.00	147	48.6	50.8	0.000003965				
18.00	168	49.1	51.8	0.000004617				
19.00	211	50.3	54.1	0.000006609				
20.00	183	50.9	54.3	0.000006759				
21.00	167	51.0	53.7	0.000006193				
22.00	146	50.8	53.0	0.000005563				
23.00	127	50.4	52.1	0.000004846				
24.00	114	49.8	51.3	0.000004283				

PERDA DE VIDA TOTAL (EM 24 HORAS)

$$0.000095176 \times (365/0.03473924) \times (28/0.97269872)$$

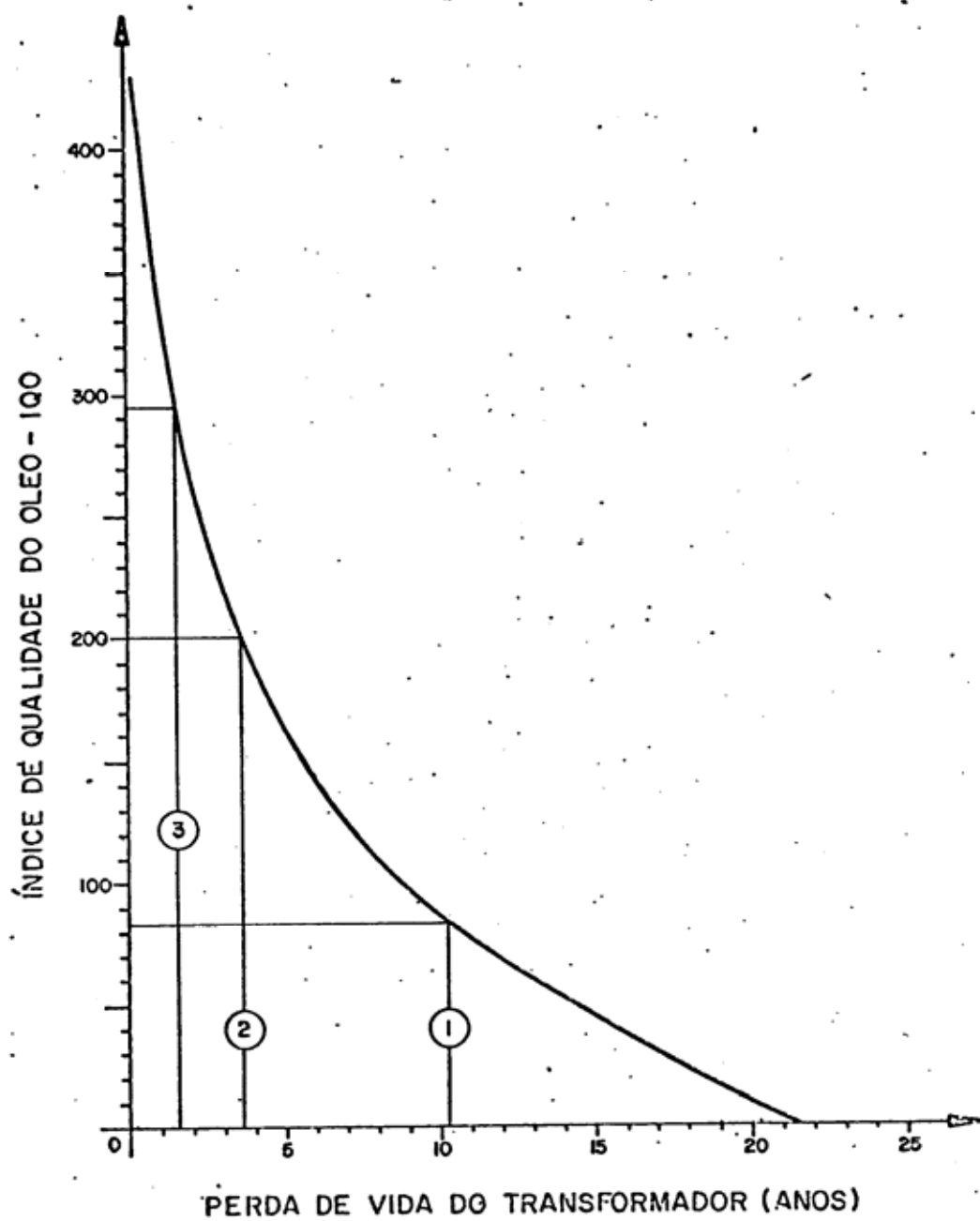
4.1.3 - Cálculo de Vida Anual e Total

Através do processo exposto no item 4.1.2, foi possível chegar aos desgastes anuais pelo ajuste do ciclo de carga equivalente à média das máximas mensais de cada ano em estudo, bastava calcular o valor do desgaste diário que este novo ciclo de carga impunha ao transformador e extrapolar para os 365 dias do ano.

A tabela 4-V apresenta estes resultados e em anexo estão os levantamentos dos últimos 14 anos.

TABELA 4-V

ANO	DESGASTE PERCENTUAL	ACUMULATIVO
1957	0.137219925	0.137219925
1958	0.052461085	0.189681010
1959	0.044938800	0.234619810
1960	0.058963195	0.293583005
1961	0.074672795	0.368255800
1962	0.062547130	0.430802930
1963	0.044938800	0.475741730
1964	0.058963195	0.534704925
1965	0.052461085	0.587166010
1966	0.049191780	0.636357790
1967	0.062547130	0.698904920
1968	0.074672795	0.773577715
1969	0.044938800	0.818516515
1970	0.058963195	0.877479710
1971	0.017344070	0.894823780
1972	0.019601230	0.914425010
1973	0.022143455	0.936568465
1974	0.017656510	0.954224975
1975	0.024550630	0.978775605
1976	0.023108515	1.001884120
1977	0.023580825	1.025464945
1978	0.024091460	1.049556405
1979	0.025100320	1.074656725
1980	0.062547130	1.137203855
1981	0.074672795	1.211876650
1982	0.052461085	1.264337735
1983	0.044938800	1.309276535
1984	0.058963195	1.368239730



5. CÂLCULO DE DESGASTE DEVIDO AOS PRODUTOS DE DECOMPOSIÇÃO DO ÓLEO

O desgaste devido aos produtos da oxidação do óleo, é baseado no índice de qualidade do óleo levando em consideração a decomposição química do óleo isolante em função do tempo.

A curva identificada pela figura que se segue, é uma representação da perda de vida do transformador, devida apenas aos produtos da decomposição do óleo.

A abscissa representa o índice de qualidade do óleo (IQO) que é a razão entre a tensão interfacial e o índice de acidez e a ordenada representa a perda de vida relativa aos produtos da decomposição do óleo, sendo esta perda acumulativa ao longo do tempo.

6. CONCLUSÕES

6.1 - Manutenção

6.1.1 - Valores do Desgaste

O desgaste resultante do aquecimento considerado para os três transformadores foi igual a 1,37% ao longo dos 28 anos de operação, ou seja, 0,5 ano.

O desgaste resultante da decomposição do óleo foram os seguintes:

Transformador nº 7569 = 10,2 anos

Transformador nº 7568 = 3,6 anos

Transformador nº 7570 = 1,6 ano

Portanto o desgaste total foi o seguinte:

Transformador nº 7569 = 10,7 anos

Transformador nº 7568 = 4,1 anos

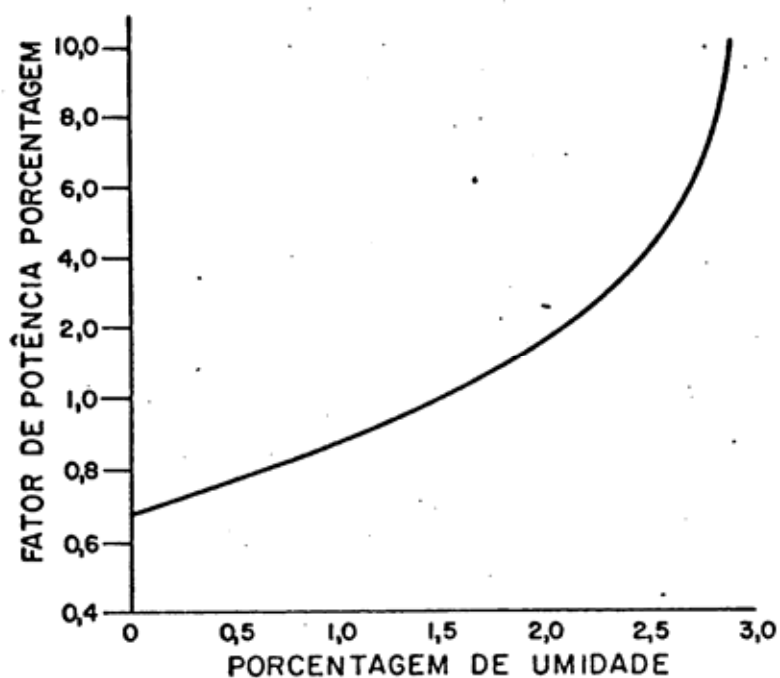
Transformador nº 7570 = 2,1 anos

Concluimos que a vida útil esperada destes transformadores será de 19,3 , 25,9 e 27,9 anos respectivamente.

Os fatores aceleradores do envelhecimento que são a presença de umidade e em altos níveis, podem diminuir estas expectativas de vida e portanto devem ser consideradas.

O fator acelerador “Água” (contida na isolação sólida) pode ser quantificado através do valor do “Fator de Potência” do enrolamento, usando-se a curva da tabela que se segue:

Figura 6-I



Obtendo a porcentagem de umidade em relação ao peso de papel, o fator do envelhecimento é dado pela abaixo:

0,3%	-	1,0
2,0%	-	6 - 16x
4,0%	-	12 - 45x

No nosso caso, teremos:

Fator de Potência Transformador nº 7568 = 0,31%

Fator de Potência Transformador nº 7569 = 0,55%

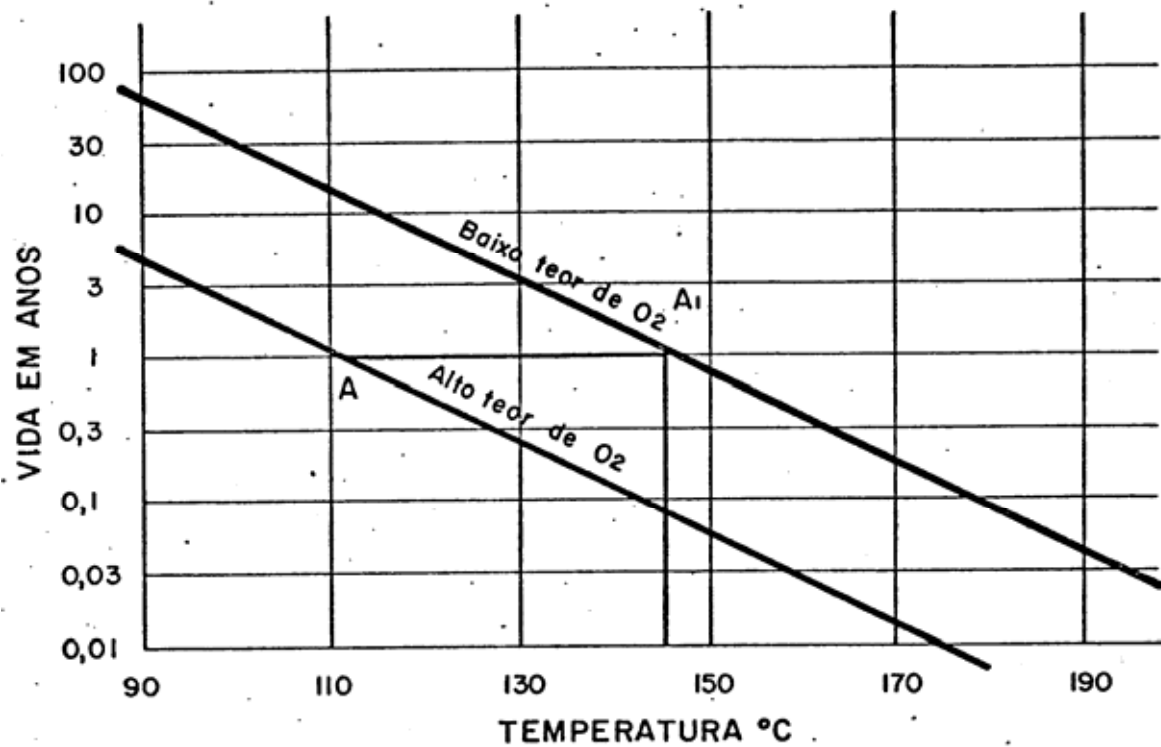
Fator de Potência Transformador nº 7570 = 0,47%

Concluimos então que os níveis de umidade no papel -baixos (menores que 0,3%) e o fator de envelhecimento este caso é considerado normal, não afetando portanto expectativa de vida definida pelos cálculos anteriores.

O fator acelerador “Oxigênio” quando presente em altos níveis no óleo, pode reduzir a expectativa de vida em até 10x dependendo da temperatura do ponto mais quente.

Isto pode ser entendido observando-se a figura abaixo:

Figura 6-II



No nosso caso:

Transformador n° 7568	3500 ppm O ₂
Transformador n° 7569	3000 ppm O ₂
Transformador n° 7570	2000 ppm O ₂

Temos portanto transformadores com baixo teor de O₂ associados com temperaturas de até 75°C no ponto mais quente, operando desta forma sem qualquer sacrifício adicional à vida da Iso1ação.

TABELA 6.I

S/E LARANJEIRAS – BANCO AUTO-TRAFO 37.5 MVA – 138/69 kV ALLIS CHALMERS
ESTUDO VÁLIDO P/ AGOSTO DE 54 A MAIO DE 25. CICLO DE CARGA MÉDIO DE DEZEMBRO.

HORÁRIO	TENDO O CICLO DE CARGA DIÁRIO				TENDO AS TEMPERATURAS MEDIDAS			
	TEMPERATURAS				TEMPERATURAS			
	CARGA (A)	ÓLEO	EROLA MENTO	PERDA DE VIDA PERCENTUAL	CARGA MÁXIMA	ÓLEO	PONTO+ QUENTE	PERDA DE VIDA CONCEITUAL
			(TEOR)					
1.00	107	48.6	49.9	0.000003497	225.4	65.4	72.7	0.000061749
2.00	104	48.3	49.5	0.000003266	196.4	64.8	70.2	0.000066126
3.00	102	47.0	49.1	0.000003078	194.4	65.4	68.8	0.000054368
4.00	104	47.6	48.9	0.000002968	196.4	64.3	67.7	0.000046903
5.00	110	47.5	48.8	0.000002945	204.7	63.5	67.2	0.000043347
6.00	107	47.3	48.6	0.000002841	171.6	62.2	65.0	0.000032316
7.00	118	47.3	48.8	0.000002929	196.4	61.6	65.0	0.000032151
8.00	133	47.4	49.3	0.000003159	227.4	61.7	66.0	0.000036967
9.00	136	47.6	49.5	0.000003282	237.8	62.0	66.6	0.000040295
10.00	137	47.8	49.7	0.000003379	237.8	62.2	66.9	0.000041745
11.00	126	47.8	49.5	0.000003255	217.1	62.0	66.0	0.000037944
12.00	125	47.8	49.4	0.000003237	204.8	61.5	65.4	0.000034964
13.00	140	48.0	50.0	0.000003505	235.7	61.9	65.5	0.000034492
14.00	138	48.1	50.0	0.000003551	237.8	62.2	66.8	0.000041552
15.00	140	48.2	50.2	0.000003652	241.9	62.5	67.3	0.000044013
16.00	145	48.4	50.5	0.000003825	254.3	63.0	68.2	0.000050249
17.00	147	48.6	50.8	0.000003965	264.7	63.8	69.3	0.000054175
18.00	168	49.1	51.8	0.000004617	281.2	64.8	70.9	0.000072318
19.00	211	50.3	54.1	0.000006609	328.8	67.0	74.8	0.000022545
20.00	183	50.9	54.3	0.000006759	384.6	70.6	80.7	0.000223962
21.00	167	51.0	53.7	0.000006193	345.3	70.6	81.9	0.000201066
22.00	146	50.8	53.0	0.000005563	287.4	72.3	78.6	0.000231727
23.00	127	50.4	52.1	0.000004846	252.3	71.3	78.4	0.000235147
24.00	114	49.8	51.3	0.000004283	225.4	69.9	74.2	0.000132557

PERDA DA VIDA TOTAL
(EM 24 HORAS)

0.000112297

0.001785334

PERDA DE VIDA EM EXCESSO
(984-5416/P1)

-0.036787703
(99.7 P/C DISPONÍVEL)

-0.034914656
(94.6 P/C DISPONÍVEL)

PERDA DE VIDA EM EXCESSO
(CPFL/FCML)

-0.009007630
(98.8 P/C DISPONÍVEL)

-0.007134593
(78.2 P/C DISPONÍVEL)

GRÁFICO 6.II

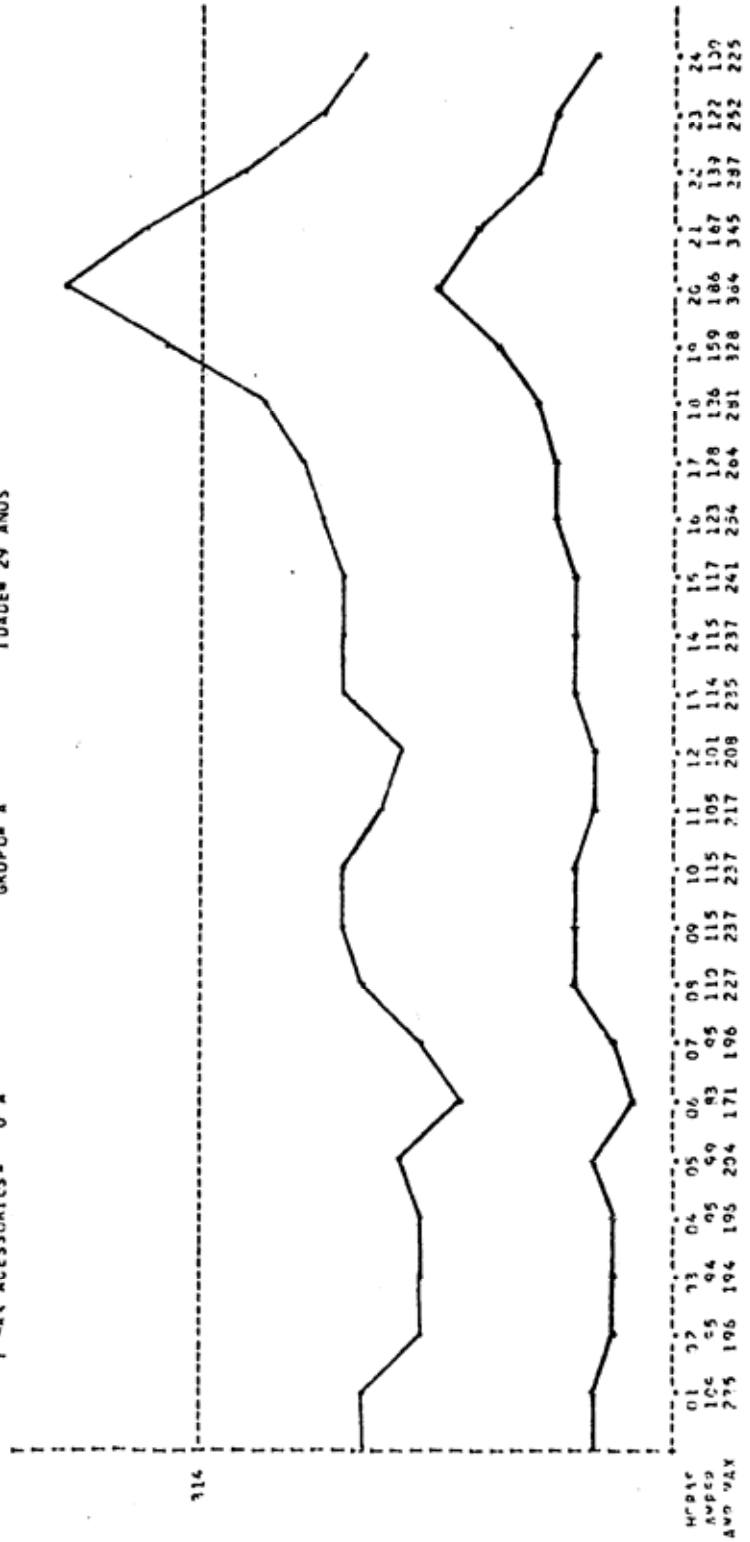
COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ
 FOFOM/SECTOR DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES - ÁREA DE ESTUDOS, ANÁLISES E NORMAS

PÁGINA- 1/1

DATA- 21/01/85

S/E LARANJEIRAS - BANCO AUTO-TRAFO 37.5 MVA- 138/69 KV ALLIS CHALMERS
 ESTUDO VALTOO P/ AGOSTO DE 84 A MAIO DE 85 CICLO DE CARGA MEDIO DE DEZEMBRO.

T MAX ACESSORIOS= 0 A GRUPO= A IDADE= 29 ANOS



Concluimos então, que o teor de O₂ neste caso, não está comprometendo a expectativa de vida útil destes transformadores.

Concluimos também que a opção de expectativa de vida entre 30 anos e 50 anos, estará dependente de um controle de qualidade do óleo, mantendo os níveis de IQO nas melhores condições possíveis, assim como baixos valores de umidade e O₂ em função da temperatura média de 85°C no ponto mais quente.

6.2 - Operação

Este banco de autotransformadores, conforme tabela (6.I) e gráfico (6.II) que se seguem fica liberado para cargas de ordem de 22% acima da potência nominal, mantendo ainda uma expectativa de sobrevida de 20 anos no pior dos casos (sem interferência da manutenção) e de 40 anos (controlando os fatores umidade, O₂ e produtos de decomposição do óleo):

- utilizados para remanejamento de cargas programadas e em contingências do sistema.

- utilizados por longos períodos acima da carga nominal em operação normal.

7. BIBLIOGRAFIA

7.1. S.D. MYERS - "A Guide to Transformer Maintenance".

7.2. S.D. MYERS - "Extending the Life of Overheated Transformers". Minutes of the Forty - Ninth Annual International Conference of Doble Clients Sec 6.601-1982

7.3. ABNT - Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência. NBR 5416 - Dezembro 1981.

7.4. ANSI - "Guide for Loading Oil - Immersed Distribution and Power Transformers" C 57-92 - Junho 1962.

7.5. Blake, J.H.; Kelly, E.J. - "Oil-Immersed Power Transformers Overload Calculations By Computer".
IEEE - Pas - Vol. 88 - AG 1969.