

TESE
317

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

CARGA SUPORTÁVEL POR
TRANSFORMADORES DE FORÇA IMERSOS
EM ÓLEO PELO CRITÉRIO DA PERDA DE
VIDA DO ISOLAMENTO

- CLÁUDIO PINTO DE MELO -

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



CARGA SUPORTÁVEL
POR
TRANSFORMADORES DE FORÇA IMERSOS EM OLEO
PELO
CRITÉRIO DA PERDA DE VIDA DO ISOLAMENTO

CLÁUDIO PINTO DE MELO

CLASS. 621.314:537.222.001.24(043.2)

CUTT. M 528 e

TOT. 317

Dissertação apresentada aos Professores:

Márcio Antônio Curi (Orientador)

Renato de Aquino Faria Nunes

José Antônio Feijó de Melo

para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na
Área de Concentração de Sistemas de Potência.

Dedicatória:

A Germana, Célia e Carlos

Pela cooperação e compreensão

Agradecimento:

À CHESF, que possibilitou a realização deste trabalho.



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

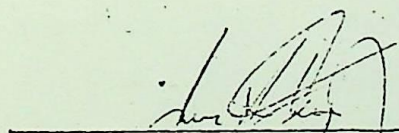
A N E X O I

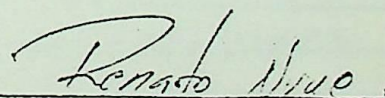
PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

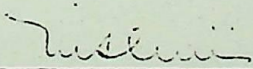
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 135 de 21/07/81, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "CARGA SUPORTÁVEL POR TRANSFORMADORES DE FORÇA IMERSOS EM ÓLEO PELO CRITÉRIO DA PERDA DE VIDA DO ISOLAMENTO"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia ELÉTRICA na Área de Concentração de SISTEMAS DE POTÊNCIA satisfeitas as demais exigências regimentais à CLÁUDIO PINTO DE MELO

Itajubá, 25 de JULHO de 19 81.


1º Examinador
Engº JOSÉ ANTONIO FEIJÓ DE MELO


2º Examinador
Prof. RENATO DE AQUINO FARIA NUNES


3º Examinador
Prof. MÁRCIO ANTONIO CURTI (Orientador)



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "CARGA SUPORTÁVEL POR TRANSFORMADORES DE FORÇA IMERSOS EM ÓLEO PELO CRITÉRIO DA PERDA DE VIDA DO ISOLAMENTO"

Autor: CLÁUDIO PINTO DE MELO

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	<i>[assinatura]</i>
2º	A	<i>[assinatura]</i>
3º	A	<i>[assinatura]</i>

Resultado médio: Conceito A, ou seja aprovado, de acordo com o parágrafo 5º do artigo 22 do regulamento da EPS.

Observações: _____

Itajubá, 25 de JULHO de 19 81.

[assinatura]
1º Examinador

Engº JOSÉ ANTONIO FEIJÓ DE MELO

[assinatura]
2º Examinador

Prof. RENATO DE AQUINO FARIA NUNES

[assinatura]
3º Examinador

Prof. MÁRCIO ANTONIO CURTI (Orientador)

S U M Á R I O

1 - INTRODUÇÃO

2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1- Considerações Gerais .

2.2- Efeito da temperatura no isolamento .

2.3- Resultados da investigação do envelhecimento .

2.4- Efeito da temperatura no óleo .

2.5- Altas temperaturas durante curto período .

2.6- Normalização da temperatura para potência nominal dos transformadores .

2.7- Tipos de Transformadores .

2.7.1- Transformador imerso em óleo, com refrigeração natural .

2.7.2- Transformador imerso em óleo, com refrigeração a água .

2.7.3- Transformador imersos em óleo, com circulação forçada de óleo .

2.7.4- Transformador imerso em óleo, com ventilação forçada .

2.7.5- Transformadores secos, com refrigeração natural ou forçada .

2.8- Modos de Transferência de Calor .

2.8.1- Condução.

2.8.2- Irradiação.

2.8.3- Convecção.

2.8.4- Convecção forçada.

2.8.5- Efeito do vento sobre a elevação de temperatura dos transformadores.

2.8.6- Transferência de calor pela combinação de irradiação e da convecção .

- 2.9- Aumento de temperatura em regime permanente, para transformadores imersos em óleo.
- 2.10-Elevação de temperatura do óleo sobre o ambiente, em transformadores auto ventilados
- 2.11-Elevação de temperatura sobre o ambiente, para transformadores refrigerados a água
- 2.12-Quantidade de óleo ar e água necessários à refrigeração
- 2.13-Elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o óleo.
- 2.14-Elevação de temperatura dos enrolamentos sobre a temperatura ambiente
- 2.15-Variação da potência suportável com a variação da temperatura ambiente
- 2.16-Efeito da altitude sobre a elevação de temperatura dos transformadores
- 2.17-Influência da cor do tanque sobre a elevação de temperatura
 - 2.17.1- Repintura dos transformadores no local de funcionamento
 - 2.17.2- Tanques lisos colocados na sombra
 - 2.17.3- Tanques de superfície ondulada colocados na sombra
 - 2.17.4- Conclusão do efeito da cor do tanque sobre a elevação de temperatura dos transformadores.

3 - MÉTODO

- 3.1- Fórmulas
- 3.2- Expoentes.
- 3.3- Temperatura ambiente
- 3.4- Correção da resistência
- 3.5- Limites de temperatura

- 3.6- Constante de tempo
- 3.7- Perda de vida do isolamento
- 3.8- Perda de vida aceitável.

4 - CONCLUSÕES

Anexo 1

Equações Usadas no Programa

- A.1.1- Elevação de temperatura do topo do óleo para regime permanente
- A.1.2- Elevação de temperatura do ponto mais quente para uma carga constante
- A.1.3- Elevação de temperatura transitória do topo do óleo
- A.1.4- Elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o ambiente
- A.1.5- Determinação da constante de tempo
- A.1.6- Fator de correção da resistência.

Anexo 2

Programa

- A.2.1- Programa
- A.2.2- Descrição
- A.2.3- Uso .

BIBLIOGRAFIA

1- INTRODUÇÃO

O objetivo da presente dissertação é apresentar um método de cálculo da carga suportável por um transformador de força imerso em óleo, através do cálculo da perda de vida de seu isolamento.

O cálculo da carga suportável por um transformador é uma velha questão para os engenheiros eletricitistas e, em geral tem sido avaliada de uma maneira grosseira pelo uso de formulas aproximadas, porém ultimamente, graças ao uso dos computadores, é possível avaliar com grande precisão esta carga suportável.

No Brasil o assunto começa agora a ser discutido no âmbito das empresas de geração e transmissão e já temos em caráter preliminar, a PNB 110.

Em contatos mantidos em diversas empresas sempre encontramos a preocupação com este assunto o que faz com que este trabalho possa ser avaliado e utilizado, com os critérios expostos; ou outros de preferência da empresa, como um guia para avaliação da carga suportável pelos transformadores.

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O cálculo da elevação final de temperatura dos transformadores, foi grandemente simplificado pela descoberta de que, para todos os casos práticos, as relações entre elevação de temperatura e perda podem ser expressas por fórmulas logarítmicas simples. Estas fórmulas dizem que a variação de temperatura é igual a uma constante (posteriormente verificaremos que nos casos dos transformadores esta "constante" varia) vezes as perdas, elevadas a um certo expoente. O principal problema consiste em determinar a "constante" e o valor do expoente, que depende das condições de refrigeração do transformador. Obtidos estes valores o cálculo da elevação de temperatura é simples de efetuar.

As fórmulas mencionadas no parágrafo precedente referem-se ao cálculo da elevação da temperatura final. Embora as fórmulas gerais para o cálculo de aquecimento e resfriamento transitório estejam determinadas por diversos autores, não existe um método disponível para o cálculo da "constante de tempo" dos transformadores. Isto deve-se à dificuldade em calcular-se a constante de tempo térmico de um corpo não homogêneo, como um transformador, constituído de materiais isolantes e de bons condutores. Só após muitas pesquisas e após diversos ciclos de aquecimento e resfriamento, foi possível encontrar expressões que permitam este cálculo.

Após muitos anos de estudo dos problemas térmicos, foi possível encontrar uma solução para os diversos problemas que envolvem a operação de transformadores fora de suas condições nominais

O trabalho "Loading Transformers by Temperature" (01) publicado em 1930, mostra que o transformador imerso em óleo, tanto o refrigerado a ar como o refrigerado a água, suportam aproximadamente 1 por cento de sobrecarga para cada 1 grau Celsius de temperatura ambiente abaixo das condições padrão, sem que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento seja excedida.

Isto permite que, no caso do transformador operar em temperaturas baixas, este possa ser sobrecarregado sem que sua expectativa de vida seja comprometida. Neste trabalho também foi demonstrado que, no caso de transformadores operando em cargas com baixo fator de carga, eles podem operar com uma carga cujo pico de carga exceda a sua potência nominal.

2.2. EFEITO DA TEMPERATURA NO ISOLAMENTO

Existem vários meios de determinar o efeito das temperaturas elevadas sobre o isolamento classe A (1,3,4,6,9,11,12,13,14,15,16,17,18,20,22,23,28). Os pesquisadores têm utilizado principalmente duas características, a rigidez dielétrica e a resistência mecânica.

A rigidez dielétrica do isolamento, quando envelhecido em óleo, mantém-se alta até que alcança um certo ponto, a partir do qual apresenta uma rápida deterioração. Um exame do isolamento que atingiu este ponto mostra que a resistência mecânica é praticamente nula. Ou seja, o isolamento apresenta-se quebradiço e carbonizado. A rigidez dielétrica dos materiais usados em transformadores também são afetados pela temperatura a que são submetidos.

Existem diversos meios de determinar o efeito da temperatura sobre as condições físicas do isolamento; as mais comuns, são: teste de "dobramento", "dilaceramento", estriamento, rompimento e teste de ruptura à tração. Quando julgado pelo teste de dobramento, a vida do isolamento é muito curta; a vida é maior quando se considera a resistência à tração como critério de julgamento.

O teste de resistência à tração tem sido usado pela maioria dos pesquisadores (1,3,4,6,12,14,17), porque é um teste prático, simples e facilmente reproduzível por qualquer pesquisador. Nos Estados Unidos, a maioria dos pesquisadores tem usado este critério para determinar o efeito das temperaturas sobre o isolamento classe A, imerso em óleo.

Para os transformadores com isolamento sólido, classe B, o teste de resistência à tração não pode ser usado, pois o isolamento é constituído basicamente de fibra de vidro, asbesto ou outros materiais, nos quais a temperatura tem pequeno efeito sobre a resistência à tração. Neste caso, alguns autores têm usado a rigidez dielétrica, o fator de potência ou a resistência de isolamento, como critério para determinação do efeito da temperatura sobre o isolamento.

Geralmente, coloca-se a pergunta se é possível prever a vida de um isolamento a uma dada temperatura. Na realidade, não se pode dar uma resposta afirmativa a esta pergunta. Existe caso de transformadores terem operado por mais de 50 anos, e isto deve-se ao fato de que a rigidez dielétrica do isolamento imerso em óleo não se deteriora até que o isolamento esteja frágil e quebradiço. É possível que um transformador continue operando por longo período, após a vida mecânica de seu isolamento estar virtualmente consumida, e até que ele seja submetido a um esforço mecânico excessivo, proveniente de um curto circuito ou a de um transporte do transformador de um local para outro, ou de qualquer outro tipo de esforço mecânico, uma vez que em condições normais de operação, o esforço mecânico é muito baixo. Isto não quer dizer, porém, que o transformador só falhará quando sua resistência mecânica estiver completamente consumida. Um transformador com o isolamento em perfeitas condições mecânicas, pode vir a falhar se for submetido a excessivos esforços.

O fato de transformadores antigos falharem logo após o transporte, mesmo operando em condições normais de tensão, vem mostrar este fato.

2.3. RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO DO ENVELHECIMENTO

A maioria dos pesquisadores aceita como válida a regra de que a taxa de envelhecimento, quando medida pelo teste de resistência à tração, para o isolamento classe A, duplica para cada 5 a 10°C de aumento de temperatura (1,6,9,52,54).

Os testes de envelhecimento feitos em laboratório, com cambracia envernizada mergulhada em óleo, ver figuras 2.1, 2.2, 2.3 e citados na referência (1), mostram que de 90 a 110°C a taxa de envelhecimento da resistência à tração é duplicada para cada 8°C de aumento de temperatura. Em 1942, F.M. Clark (6) publicou os resultados de uma grande série de testes de envelhecimento feitos com papel manilha, imerso em óleo, material hoje usado no isolamento de espirais de transformadores, a temperaturas entre 75 e 200°C. Ele descobriu que de 115 até aproximadamente 200°C a taxa de envelhecimento da resistência à tração é duplicada para, aproximadamente, cada 8°C de aumento de temperatura; ver figura 2.4. Próximo de 100°C, a taxa de envelhecimento da resistência à tração é duplicada para cada 5 graus de aumento da temperatura. Testes citados por J. A. Scott e B. H. Thompson(46), mostraram que o tempo de falha de um estator de motor, usando isolamento classe A, foi reduzido para a metade para, aproximadamente, cada 10,5°C de aumento da temperatura. Testes feitos por diversos autores mostram que, para o isolamento classe B, esta regra é válida para cada 9°C de aumento de temperatura e para o isolamento classe H, para cada 10°C de aumento de temperatura.

Muitas vezes tem-se levantado a questão de que, se os testes de laboratório, feitos em condições controladas, onde a amostra é fechada em um tubo de vidro selado, representam ou não as condições reais de operação. Para esclarecer esta questão alguns testes foram feitos com pequenas tiras de papel manilha, usado como isolamento dos condutores, e colocadas entre as espiras de pequenas bobinas, as quais, foram imersas em óleo e aquecidas a temperaturas de 157 a 195°C durante vários períodos de tempo. A figura 2.5 mostra que estes testes coincidem com bastante exatidão com os testes feitos por Clark (6,9).

Com base nestes dados de diversos autores, tem-se utilizado o valor típico de 8°C para representar o valor no qual a taxa de envelhecimento é duplicada.

2.4. EFEITO DA TEMPERATURA NO ÓLEO

O efeito da temperatura excessiva no óleo exposto ao ar, induz à formação de borra pela oxidação do óleo. Atualmente, graças ao uso do conservador de gás inerte, selando o tanque, e ao uso de aditivos nos óleos, tem-se conseguido reduzir bastante a formação de borra.

2.5. ALTAS TEMPERATURA DURANTE UM CURTO PERÍODO

A escolha de uma temperatura máxima de operação de um transformador seria possível, se existisse uma temperatura para a qual a deterioração do isolamento fosse excessiva e, abaixo desta temperatura, a deterioração fosse desprezível. Como a deterioração do isolamento é uma função da temperatura e da duração desta temperatura, não é possível definir uma temperatura para a qual o transformador não possa operar. Pode-se concluir, então, que o transformador pode operar a temperaturas elevadas desde que a duração desta temperatura seja pequena. Isto torna possível operar os transformadores a temperaturas altas durante curto intervalo de tempo, ao passo que durante a operação normal o transformador tem de operar continuamente a temperaturas mais baixas. Durante emergências pouco frequentes, é então possível operar os transformadores a altas temperaturas sem que haja sério dano à sua expectativa de vida, podendo mesmo durante intervalos de poucos segundos, operar com correntes de tal ordem que elevem os condutores a temperaturas de 250°C .

É com base nestas considerações que se define dois tipos de sobrecarga para os transformadores. A primeira, são sobrecargas que não comprometem a expectativa de vida e, a segunda, são sobrecargas que acarretam pequena redução da vida provável dos transformadores.

2.6. NORMALIZAÇÃO DA TEMPERATURA PARA POTÊNCIA NOMINAL DOS TRANSFORMADORES

Como não existe uma temperatura crítica que determine as características do isolamento, as normas indicam para temperatura

de operação uma temperatura baseada na experiência de operação de transformadores em serviço, e também na opinião dos elaboradores das normas. Geralmente esta opinião média é conservadora, porque ela procura uma base comum para as comparações de custos e desempenho de diferentes projetos de vários fabricantes.

De acordo com o AIEE, o limite de temperatura para o ponto mais quente do isolamento classe A é de 105°C para operação contínua. É admitido também que a temperatura média da bobina está 10°C abaixo da temperatura do ponto mais quente, para os transformadores imersos em óleo. Desta forma, uma temperatura máxima de 95°C é admitida para a temperatura média da bobina, temperatura esta determinada pelo método da resistência do enrolamento.

Admitindo que o transformador refrigerado a ar esteja colocado em um ambiente com temperatura de 40°C , a elevação de temperatura permissível da bobina é de 55°C , e esta elevação de 55°C tem sido usada como uma base na determinação da potência nominal dos transformadores, isto é, um transformador pode transportar continuamente sua potência nominal sem que sua bobina experimente uma elevação média, pelo método da resistência, maior que 55°C .

Este critério tem sido usado durante muito tempo, e dá uma base uniforme para determinação da potência nominal dos transformadores. Consegue-se assim uma operação com sucesso desses equipamentos por muitos e muitos anos. Este registro de sucesso na operação de transformadores deve-se principalmente a três fatores: 1) A temperatura ambiente geralmente é inferior aos 40°C especificados 2) Os transformadores estão submetidos a cargas que não são contínuas, sendo na maior parte do tempo inferiores à potência nominal do transformador. 3) O critério utilizado para perda de vida do isolamento é conservador.

2.7. TIPOS DE TRANSFORMADORES

Vamos a seguir, fazer uma rápida descrição dos principais tipos de transformadores normalmente utilizados.

2.7.1. Transformador Imerso em Óleo com Refrigeração Natural

A maneira mais fácil de fornecer suficiente superfície de refrigeração, consiste em colocar o transformador em um tanque com a superfície interna lisa, cheio de óleo. Para transformadores com potência superior a 25kVA, o uso de tanque liso torna-se antieconômico, pois será necessário utilizar um tanque de grandes dimensões. A solução que se tem usado tradicionalmente nos transformadores, tem sido o uso de tanques corrugados, pois assim consegue-se aumentar a superfície de troca de calor. Para grandes potências faz-se necessário usar uma superfície ainda maior, o que obriga o uso de radiadores, a fim de garantir uma adequada troca de calor; neste caso, o tanque será liso, com os radiadores instalados em redor de tanque.

2.7.2. Transformador Imerso em Óleo, com Refrigeração a Água

Quando a potência do transformador é muito grande, de tal forma que a refrigeração natural não conduz a uma solução econômica e o custo da água não é elevado, tem-se utilizado a refrigeração à água. Este tipo de refrigeração consiste em serpentinas de cobre, que envolvem o tanque liso do transformador garantindo uma eficiente troca de calor. Graças ao uso de tubos de cobre sem conexão, tem sido possível utilizar eficientemente, e com segurança, este tipo de refrigeração, havendo porém sempre o perigo de que haja infiltração de água no óleo do transformador. Tendo em vista a grande eficiência do método, o seu custo inicial é geralmente inferior ao da refrigeração forçada, porém, devido ao perigo de contaminação do óleo pela água, tem-se muitas vezes dado preferência ao uso de outros tipos de refrigeração. O uso deste tipo de refrigeração tem sido mais usado nos Estados Unidos, ao passo que na Europa tem-se dado preferência ao uso da refrigeração por circulação forçada de óleo.

2.7.3. Transformador Imerso em Óleo, com Circulação Forçada de Óleo:

Este tipo de refrigeração pode ser dividido em duas classes :

1) O óleo é bombeado para um trocador de calor externo óleo - água; 2) o óleo é bombeado para um trocador de calor externo ' óleo-ar. Estes dois tipos podem ser, por sua vez, subdivididos em dois: 1) O óleo é injetado diretamente sobre as bobinas 2) o óleo não é injetado diretamente sobre as bobinas. A principal vantagem da injeção direta de óleo, é que há um aumento da eficiência do resfriamento graças à grande velocidade do fluxo do mesmo e, em consequência, há uma redução nas dimensões do transformador, o que pode ser importante nos seguintes aspectos:

- 1) Torna possível embarcar unidades completamente montadas, o que reduz o tempo de instalação do transformador
- 2) 'Uso de subestações transportáveis
- 3) Uso em vagões e locomotivas ferroviárias
- 4) Redução no custo do investimento.

2.7.4. Transformador Imerso em Óleo, com Ventilação Forçada:

Quando a ventilação forçada é utilizada, o transformador possui uma dupla potência, a primeira referida à operação sem ventilação forçada e a segunda, referente ao uso dos ventiladores. A relação destas potências pode ser de até 1,67 pelo uso de ventiladores de grande velocidade. Pode-se ainda ter três potências nominais, sendo a potência intermediária obtida pelo uso da metade dos ventiladores instalados.

2.7.5. Transformadores Secos, com Refrigeração Natural ou Forçada:

Os transformadores secos são fabricados geralmente para pequenas potências e baixas tensões, porém, no caso de locais onde haja perigo de incêndio, tem-se fabricado transformadores de até 18,5MVA e 15kV. No caso de potências mais elevadas geralmente utiliza-se isolamento classe B, com ventilação forçada.

Como a superfície de refrigeração cresce com o quadrado da dimensão do transformador e as perdas crescem com o volume do mesmo, e portanto com o cubo das dimensões há um ponto no qual a refrigeração natural não pode atender, sendo necessário utilizar um dos tipos de refrigeração já descritos.

2.8. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O problema de manter a temperatura interna do transformador dentro de limites permissíveis não é apenas referente à superfície externa do transformador, mas refere-se, também, às partes internas.

O calor é transferido por condução, irradiação ou convecção e, nos transformadores, ele pode ser transferido por um ou mesmo pelos três métodos ao mesmo tempo. Quando estudamos a transferência de calor das bobinas do transformador para o ambiente de refrigeração, cada método deve ser tratado separadamente. A condução não é muito importante nesta transferência mas a convecção o é.

Apesar dos três métodos poderem ser expressos por fórmulas simples, deve ficar claro que não é possível fazer uma dedução matemática rigorosa destas fórmulas. Considera-se que 90% destas fórmulas são empíricas. Se bem que existam tratamentos matemáticos exato como a lei de Stefan-Boltzmann para a irradiação de calor, que estabelece que a transferência de calor varia com a diferença das temperaturas absoluta elevada à quarta potência, é necessário utilizar duas constantes empíricas. Porém, para todos efeitos práticos, estas equações empíricas atendem completamente às necessidades.

2.8.1. Condução

A transferência de calor por condução em uma substância, é proporcional à diferença de temperatura e inversamente proporcional à sua resistividade térmica. A resistividade é o inverso da condutividade.

A fórmula para calcular a condução pode ser expressa, como:

$$W = \frac{A\theta}{LR} (1) \text{ ou } \theta = \frac{WRL}{A} (2)$$

onde W = transferência de calor em watts através do material

A = área da superfície em centímetros quadrados

L = comprimento em centímetros

θ = diferença de temperatura em graus Celsius

R = resistividade térmica do material, isto é, a diferença de temperatura que deve existir entre as duas faces opostas de um cubo de um centímetro de lado, de forma que haja a condução de 1 watt através dele.

A resistividade térmica da água, do ar e dos materiais comumente utilizados nos transformadores está indicada na tabela 2.I.

Os dados da tabela 2.I são aplicados para a condição de não haver calor gerado no material, através do qual o calor está passando. Esta hipótese simplificadora não existe nos transformadores. Por exemplo, no núcleo de um transformador, devido às perdas no núcleo, o calor é gerado uniformemente através do caminho de condução do calor. Isto complica o problema de calcular a temperatura interna máxima ou a perda térmica através do caminho de condução de calor e, conseqüentemente, a equação (2) não pode ser aplicada para este caso.

Para a condição de calor sendo gerado uniformemente no núcleo, deve ser usada a equação (3) que permite o cálculo da perda térmica ao longo das lâminas, admitindo que não há fuga de calor através das mesmas.

$$\theta = WRS \left(\frac{1X}{2} - \frac{X^2}{2} \right) (3)$$

Onde θ = aumento de temperatura em qualquer ponto, a uma distância X centímetros da aresta das lâminas.

H = watts por centímetro cúbico de material sólido (isto é, o material tendo um fator de espaço unitário)

R = resistividade térmica

S = fator de espaço

l = largura das lâminas em centímetros.

Se ambos os lados estão sob idênticas condições de resfriamento, a temperatura máxima ocorre no centro, onde $X=l/2$, então

$$\theta_{\text{mac}} = WRS \frac{l^2}{8} \quad (4)$$

Estas expressões são válidas para o caso do fluxo de calor ser conduzido através de uma área de secção uniforme, no sentido da condução de calor.

2.8.2. Irradiação

A transferência de calor por irradiação tem lugar, porque todos os corpos que têm sua temperatura superior ao do meio ambiente irradiam energia calorífica sob a forma de onda. A máxima energia irradiada para uma dada temperatura ocorre a um dado comprimento de onda, e à medida que a temperatura aumenta diminui o comprimento da onda emitida. Em geral, a área de máxima energia irradiada encontra-se no espectro infravermelho.

Já foi provado matematicamente por Rud Kuchler(46), que a área efetiva de irradiação é o envelope que contém a área de irradiação independentemente, portanto, de sua forma. Ou seja, para um tanque corrugado ou um tanque liso com radiadores, a superfície de irradiação é o produto da altura pelo perímetro do envelope que contém o transformador. Isto é verdadeiro apenas quando a cor da superfície é tal que o fator de emissividade é unitário, como ocorre num corpo negro perfeito ou numa superfície fosca. Se o fator de emissividade é bem menor do que 1, a superfície de irradiação efetiva é menor que a área do envelope multiplicada pelo fator de emissividade, devido às reflexões e reirradiações que têm lugar com o meio ambiente. Todavia, a emissivi

dade da maioria das tintas usadas na prática é próxima de 1, geralmente estão em torno de 0,9 a 0,95, como é mostrado na tabela 2.II. Para todos fins práticos pode-se assumir que a superfície de irradiação é o envelope externo.

A transferência de calor por irradiação é expressa pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$W_r = KE (T_2^4 - T_1^4) \quad (5)$$

onde W_r = watts por centímetro quadrada

$K = 0,57 \times 10^{-11}$

E = fator de emissividade

T_2 = Temperatura do corpo quente em graus absolutos

T_1 = Temperatura do ambiente em graus absolutos.

O fator de emissividade para vários metais e cor de tintas normalmente utilizadas nos transformadores, é dado na tabela 2.II

A figura 2.6 mostra a transferência de calor versus elevação de temperatura, em várias temperaturas ambiente para um fator de emissividade de 0,95.

Para uma temperatura de até 75°C em um ambiente a zero graus, a equação (5) pode ser substituída pela fórmula logarítmica abaixo, com grande aproximação:

$$W_r = KE \theta^{1,17} \quad (6)$$

onde W_r = watts por centímetros quadrados

$K = 0,285 \times 10^{-3}$

θ = Elevação de temperatura em graus centígrados

E = fator de emissividade.

A figura 2.6 mostra que a transferência de calor pela radiação, W_r , aumenta aproximadamente 1,1 por cento para cada grau de aumento na temperatura do ambiente, entre 0 e 5°C . Considerando-se uma temperatura média de 25°C onde o expoente é 1,19, a equação (6) passa a ser:

$$W_r = 0,285 \times 10^{-3} \cdot \theta^{1,19} E \left(1 + \frac{1,1\theta_a}{100}\right) \quad (7)$$

onde θ_a = temperatura ambiente em graus Celsius.

A figura 2.5 mostra a comparação da transferência de calor em watts por centímetro quadrado, calculada pela fórmula exata (5) e pela fórmula empírica (7) para uma elevação de temperatura de até 100°C e para um ambiente de 0° , 25° e 50°C e um fator de emissividade de 0,95.

A comparação dos resultados obtidos com as equações (6) e (7) na tabela 2.III, mostra que para um aumento de temperatura abaixo de 80°C , os resultados são equivalentes em ambas as fórmulas, podendo-se utilizar a equação (6) por sua simplicidade. Para elevação de temperatura superiores a 80 graus, deve-se utilizar a equação (5).

O fator de emissividade é sempre menor do que 1, sendo 1 apenas para o corpo negro perfeito, e zero para um corpo que não irradie calor. O negro de fumo aproxima-se do corpo negro, e a prata polida do corpo não irradiador de calor.

Embora o fator de emissividade varie muito com a temperatura, no caso da gama de temperatura que ocorre nos transformadores, ele pode ser considerado constante uma vez que os transformadores operam numa temperatura 0 a 100°C . É satisfatório considerar E como tendo um valor constante para uma dada cor. Este valor do fator de emissividade é chamado emissividade de baixa temperatura, e está dado na tabela 2.II. A densidade do ar não tem efeito sobre a transferência de calor por irradiação.

2.8.3. Convecção

Quando uma superfície quente é imersa em um fluido, o calor é conduzido da superfície ao meio refrigerante. Um aumento na temperatura do fluido acarreta uma diminuição de sua densidade, e isto produz uma corrente de circulação no fluido que trans -

porta o fluido mais leve, o qual, por sua vez, é substituído pelo fluido mais pesado. Então é criado um processo contínuo de circulação no fluido.

Tem-se procurado analisar matematicamente o mecanismo da convecção, para tentar explicar o que ocorre durante esse processo mas até hoje não se obteve sucesso.

Langmuir(46) foi o primeiro a abordar o problema propondo a teoria do filme, a qual consiste em considerar que o calor é conduzido do corpo quente através de um filme de ar inativo, de aproximadamente 0,45 cm de espessura ao nível do mar, que adere à superfície e dali é carregada pela corrente de convecção.

Posteriormente, esta hipótese foi retomada por C.W. Rice(46) que abordou o problema de determinar a espessura do filme, utilizando o método da análise dimensional. Seu trabalho foi completado posteriormente por W.J. King(46) que estabeleceu uma equação, parte empírica, parte teórica, que explica o que ocorre durante o processo de convecção.

Esta equação é complicada para uso prático porque exige o uso da densidade do fluido, do seu coeficiente de expansão térmica, da sua viscosidade e da sua densidade.

A longa experiência que se tem com este processo de condução de calor tornou possível estabelecer uma equação exponencial simples que, para todos fins práticos, pode ser usada. Esta equação é:

$$W_c = K \theta_c^n \quad (8)$$

onde W_c = transferência de calor em watts por centímetro quadrado

K = constante

θ_c = aumento de temperatura em graus centígrados

n = expoente que varia de 1,0 a 1,25, dependendo da forma e da posição da superfície que está sendo refrigerada.

Para uma superfície plana vertical no ar, com dimensão maior que 61cm e para aumentos de temperaturas até 75°C e ao nível do mar:

$$K = 0,217 \times 10^{-3}$$

$$n = 1,25$$

Foi também determinado que a transferência de calor por convecção, para uma dada temperatura, variam com a raiz quadrada da densidade do ar.

Para superfícies verticais que não sejam planas, como as superfícies corrugadas, é necessário aplicar um fator de correção pois estas superfícies oferecem uma apreciável resistência ao fluxo de ar. Este fator é chamado fator de fricção do ar, e varia dependendo da profundidade e da largura da corrugação. Este fator deve ser determinado experimentalmente.

A equação(8) pode, assim, ser escrita como:

$$W_c = 0.217 \times 10^{-3} F \theta^{1.25} \sqrt{p} \quad (9)$$

onde F = fator de fricção do ar (unitário para uma superfície plana)

p = pressão barométrica (unitária para o nível do mar).

A figura 2.7 dá às curvas de transferência de calor por convecção versus elevação de temperatura, para diferentes altitudes. A variação da densidade do ar com a altitude é dada na tabela 2.IV.

A equação (9) aplica-se apenas para superfícies verticais planas. Para a parte superior de uma superfície horizontal, a transferência de calor por convecção será 15 a 20 por cento maior. No lado inferior as transferências serão bem menores dependendo da área da superfície. A razão disto é que o ar aquecido tem de fluir ao longo de toda superfície antes de poder escapar e subir. Quanto maior for a área, maior será a dificuldade do ar escapar, conseqüentemente, nenhum valor pode ser estabelecido a priori

devendo os principais casos serem estudados experimentalmente.

A cor da superfície não tem efeito nas perdas de calor por convecção, e o efeito da temperatura ambiente pode ser desprezado na prática.

2.8.4. Convecção Forçada

O calor dissipado por uma superfície no ar parado, pode ser grandemente aumentado por uma brisa suave porque o filme de ar é removido, eliminando assim a grande perda térmica existente através do filme. Similarmente, a quantidade de calor transferida por convecção forçada de ar é grandemente aumentada em relação à transferência por circulação natural.

A convecção de calor de um sólido para o ar, por convecção forçada, é proporcional ao aumento de temperatura; na transferência de calor do óleo para um sólido ou vice versa, a convecção forçada varia aproximadamente com o aumento de temperatura elevado a um expoente 1,25. Estas relações mantêm-se para a elevação de temperatura do óleo nos transformadores com refrigeração forçada à ar, e nos de refrigeração forçada de óleo, tanto para refrigeração externa em óleo-ar como em óleo-água. Elas também são verdadeiras para a elevação de temperatura das bobinas sobre o óleo com fluxo de óleo forçado sobre as bobinas. A existência da não linearidade entre perdas e elevação de temperatura na refrigeração forçada em óleo, deve-se à viscosidade do óleo que decresce com a elevação de temperatura, causando um aumento na taxa de transferência de calor.

2.8.5. Efeito do Vento Sobre a Elevação de Temperatura nos Transformadores

A tabela 2.V mostra o efeito do vento na redução da temperatura no topo do óleo de grandes transformadores auto ventilados. Estes dados são baseados parcialmente em testes feitos por fabricantes usando diferentes tamanhos de ventiladores, assumindo que o aumento de temperatura varia inversamente com a velo-

cidade do vento, levada a uma potência de 0,8, e parcialmente em observações feitas em um transformador de 30MVA, no qual o aumento de temperatura no topo do óleo, a uma velocidade média do vento de 3 m/s, foi de 64 por cento do aumento de temperatura' estimado para o ar parado(53).

O efeito de refrigeração do vento não é o mesmo para todos transformadores, pois depende da forma e do arranjo das superfícies de refrigeração do transformador. Quanto mais eficiente for a refrigeração para o ar parado, menor será a influência da velocidade do vento. A baixa porcentagem de diminuição mostrada na tabela 2.V entre 9 e 13 m/s, deve-se a que, provavelmente já estava o transformador com toda sua superfície de ventilação exposta ao vento.

2.8.6. Transferência de Calor pela Combinação da Irradiação e da Convecção

A dissipação total por uma superfície vertical plana é expressa pela soma das equações (7) e (9), ou seja:

$$W = 0,285 \times 10^{-3} E \times \theta^{1,19} \left(1 + \frac{1,10a}{100}\right) + 0,217 \times 10^{-3} \sqrt{p} \cdot \theta^{1,25} \quad (10)$$

A tabela 2.VI dá a transferência de calor em watts por centímetro quadrado, ao nível do mar, em uma superfície plana cuja cor tenha um fator de emissividade de 0,95.

A figura 2.8 dá a transferência total (irradiação mais convecção) versus aumento de temperatura de uma superfície vertical num ambiente 0° , 25° e 50°C , e com um fator de emissividade de 0,55 e 0,95.

A tabela 2.VI dá o calor transferido de uma superfície plana vertical num ambiente a 25°C ; nas temperaturas de operação do tanque de um transformador, verifica-se que 45 por cento do calor é transferido por convecção e 55 por cento por irradiação. Num ambiente a 0°C , as perdas estão igualmente divididas como mostram as figuras 2.6 e 2.7.

2.9. AUMENTO DE TEMPERATURA EM REGIME PERMANENTE PARA TRANSFORMADORES IMERSOS EM ÓLEO

O aumento de temperatura em regime permanente, das bobinas dos transformadores, acima do ambiente, pode ser calculado como a soma de duas componentes: 1) elevação de temperatura das bobinas sobre o óleo e, 2) elevação de temperatura do óleo sobre o ambiente. Estas componentes podem ser calculadas separadamente.

2.10. ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO ÓLEO SOBRE O AMBIENTE EM TRANSFORMADORES AUTO-VENTILADOS

A elevação de temperatura do óleo sobre o ambiente possui uma pequena perda na chapa do tanque. A figura 2.9 mostra que esta perda na chapa do tanque é pequena, e cerca de 90 por cento do total da perda óleo-ar está na superfície externa do tanque para o ar ou para o meio refrigerante. Isto supondo que a temperatura do topo do óleo, e todo óleo acima do núcleo e das bobinas, estão aproximadamente à mesma temperatura. Desde que o gradiente de temperatura no óleo adjacente às paredes do tanque, varia na proporção das perdas, para diferentes cargas, é de se esperar que tanto a temperatura média do óleo como a temperatura no topo do óleo seguirão as mesmas leis das perdas versus elevação de temperatura sobre o ambiente, como perdas versus aumento de temperatura da superfície do tanque sobre o ambiente. Numerosos testes têm demonstrado que isto é verdadeiro.

A figura 2.10 mostra a variação do aumento de temperatura no topo do óleo versus transferência de calor, determinadas em três diferentes configurações de superfície do tanque:

- 1) Superfície lisa
- 2) Superfície corrugada nº 1, tendo um passo de 6,7cm e uma profundidade de 9cm.
- 3) Superfície corrugada nº 2, tendo um passo de 6,1 cm e uma profundidade de 23cm.

Estes testes demonstraram que o calor dissipado do óleo para a superfície do tanque versus elevação de temperatura sobre o ambiente, pode ser expressa por:

$$Wt = K\theta^n \quad (11)$$

onde n tem os seguintes valores

Forma da superfície

Plana	1,19
Corrugada nº 1	1,27
Corrugada nº 2	1,245

Para efeitos práticos pode-se dizer que o aumento de temperatura no topo do óleo sobre o ambiente, segue a mesma lei do aumento de temperatura da superfície externa sobre o ambiente. Então, para todas as superfícies fechadas onde a perda de calor por convecção predomina, a transferência de calor varia com o aumento de temperatura elevado a 1,25. Ou, que o aumento de temperatura varia com as perdas elevadas a 0,8, uma vez que na temperatura de equilíbrio há igualdade entre o calor gerado e o dissipado.

Para as superfícies lisas, o valor de n está compreendido entre 1,19 e 1,25 desde que aproximadamente metade das perdas são dissipadas por irradiação e metade por convecção. Muitos testes indicam todavia que, em grandes tanques com radiadores, as perdas variam com a elevação de temperatura elevada a 1,19, ou seja o aumento de temperatura varia com as perdas elevadas a 0,84.

Estas leis têm certas limitações. Por exemplo, se a temperatura do ambiente está abaixo de zero e um óleo de uma alta viscosidade a estas temperaturas é usado, esta lei pode não se manter, pois com o aumento de temperatura a grande variação de viscosidade pode, sem dúvida, afetar apreciavelmente o gradiente vertical de temperatura no tanque.

2.11. ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA SOBRE O AMBIENTE PARA OS TRANSFORMADORES REFRIGERADOS À ÁGUA

Nos transformadores refrigerados à água a elevação de tempera-

tura da água de entrada pode ser expressa por:

$$\theta = KW^n \quad (12)$$

onde θ = elevação de temperatura do óleo sobre a água na entrada

K = constante

W = perdas

n = expoente que varia dependendo da elevação de temperatura da água de refrigeração. Para um aumento de temperatura constante na água de refrigeração, e uma elevação de temperatura do óleo entre 25 e 60°C, utilizando-se o óleo 10C, n tem os seguintes valores:

Aumento de temperatura
da água de refrigeração
em °C

n

0.	0,77
5	0,72
10	0,68
20	0,61

O valor de 0,70 para n é normalmente utilizado para o caso geral, em que a água de refrigeração sofre um aumento de temperatura entre 5 e 10°C.

Os valores referidos anteriormente são válidos, tanto para a elevação de temperatura média do óleo como para a elevação de temperatura do topo do óleo. Geralmente assume-se que a elevação de temperatura média do óleo está aproximadamente 2 °C abaixo do aumento de temperatura do topo do óleo para carga normal, ou para sobrecargas. As perdas no tanque não estão incluídas na equação (12).

Muitas vezes é importante conhecer como a variação na vazão da água afeta o aumento de temperatura do óleo dos transformadores.

O aumento de temperatura da água varia inversamente com a vazão da água, uma vez que as perdas a serem retiradas pela água permanecem praticamente as mesmas, as pequenas diferenças sendo devido: 1) a pequenas mudanças nas perdas RI^2 e, 2) a mudança nas perdas dissipadas pelo tanque como resultado do aumento ou decrescimento da temperatura.

Se a vazão de água é reduzida à metade, a elevação de temperatura da água aumenta de 10 a 20°C, mas a elevação de temperatura no topo do óleo não será aumentada a mesma quantidade de graus. Estudos mostraram que com os tipos de óleo hoje utilizados, quando a água tem sua temperatura elevada o aumento da temperatura do óleo é de aproximadamente 40 por cento daquele valor. (46).

2.12. QUANTIDADE DE ÓLEO AR E ÁGUA NECESSÁRIOS A REFRIGERAÇÃO

A quantidade de água, óleo ou líquido sintético necessários para refrigeração forçada dos transformadores, é:

$$G = \frac{W}{\theta K} \quad (13)$$

onde G = litros por minuto

K = 70 watts por grau Celsius por litro de água

29,2 watts por grau Celsius por litro de óleo ou líquido sintético a 60°C

27,6 watts por grau Celsius por litro de óleo ou líquido sintético a 25°C

W = perdas em watts

θ = elevação de temperatura em graus C do líquido de refrigeração.

A quantidade de ar necessária a refrigeração é

$$Q = \frac{K_a W}{\theta} \quad (14)$$

$$Q = m^3/\text{min}$$

$$K_a = 0,0468 \text{ m}^3 \cdot \text{min} \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$0,051 \text{ m}^3 \cdot \text{min} \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{min} \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$0,0595 \text{ m}^3 \cdot \text{min} \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

L = perdas em W.

2.13. ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS SOB ÓLEO

A elevação de temperatura de uma bobina, ou de uma coluna de bobinas, sob óleo, não é uniforme, e sim, varia de um ponto para o outro, dependendo do gradiente de temperatura ao longo do caminho térmico. Por questão de normalização, e porque é difícil de se determinar por meio de ensaios, admite-se que a temperatura do ponto mais quente está 10° acima da temperatura média do enrolamento, para condições normais de carga (2). Na realidade, o ponto mais quente devido ao gradiente natural de temperatura do óleo, na maioria dos transformadores bem refrigerados, não excede 5 ou 6°C sobre a temperatura média, se bem que em casos especiais, a dita temperatura possa chegar realmente quase aos 10°C acima da temperatura média do enrolamento. Sob condições de sobrecargas de curta duração, o ponto mais quente pode superar consideravelmente os 10°C .

Dentro dos limites de temperaturas usuais dos transformadores, a elevação de temperatura dos enrolamentos sob óleo, pode-se calcular por meio de uma expressão, da forma:

$$\theta = K W_c^n \mu^{n'} \quad (15)$$

onde θ = elevação de temperatura em graus Celsius

K = constante

W_c = Watts por centímetro quadrado

μ = viscosidade absoluta em centipoise

n = constante empírica, que varia de 0,70 a 0,85 segundo as condições de refrigeração, como será indicado adiante

n' = constante empírica igual a 0,25

Para a determinação do valor de n' , ou seja, o efeito da viscosidade sobre a elevação de temperatura dos enrolamentos sobre a temperatura do óleo, foram feitos diversos testes com o óleo 10C, variando as temperaturas entre 24 e 100°C, bem como as perdas numa gama de 15 para 1(46).

A temperatura do ponto mais quente foi medida com um termopar colocado entre as espiras, e embaixo de um separador na bobina horizontal, imediatamente abaixo da bobina superior do enrolamento. A elevação de temperatura do ponto mais quente foi medida, com relação à temperatura do óleo, a uma distância de 4cm do lado da bobina. A temperatura média do óleo que se considerou para a determinação da viscosidade do óleo, foi a temperatura do óleo adjacente, mais a metade da elevação de temperatura da superfície exterior do isolamento das espiras não encoberto pelos espaçadores.

Os resultados destes ensaios estão indicados na tabela 2.VII. Quando o aumento de temperatura para uma perda constante é plotada um papel log-log, como está mostrado na linha B da figura 2.11, contra a viscosidade do óleo usado no teste, obtido da figura 2.11.A, a inclinação da linha é 0,27. Isto é n' na equação (15) é igual a 0,27. Isto aproxima-se do valor 0,24, linha A da figura 2.11, valor encontrado em testes feitos com uma chapa de metal imersa em dois tipos de óleo, 21 e 10°C.

Nos ensaios sobre bobinas se obtém, para a elevação de temperatura, a coincidência máxima entre os valores calculados e medidos quando utiliza-se $n = 0,75$ e $n' = 0,25$.

Quando o efeito da viscosidade não pode ser desprezado, isto é, com pequenas variações de temperatura e o óleo frio, e tomando-se $n'=0,25$, pode-se escrever a seguinte equação para o cálculo da elevação de temperatura sob o óleo:

$$\theta = KW_C^n \mu^{0,25} \quad (16)$$

onde θ , K , W_c e μ já foram definidos anteriormente, e n é uma constante empírica pouco maior que o valor que se toma se não se considera o efeito da viscosidade do óleo a temperaturas entre 60 e 70°C. Como se verá adiante, para bobinas verticais n tem um valor pouco diferente daquele para bobinas horizontais. Para o cálculo da elevação de temperatura dos enrolamentos de transformadores sob óleo, a equação (16) pode ser simplificada desprezando-se o efeito da viscosidade $\mu^{n'}$. Consequentemente, tanto a elevação de temperatura média dos enrolamentos sobre a temperatura média do óleo, como a temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo, pode ser expresso com bastante exatidão, para todos efeitos práticos, pela fórmula seguinte:

$$\theta = KW^n \quad (17)$$

onde θ = elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o óleo

K = constante

W = perdas

n = expoente que varia entre 0,7 e 0,85 aproximadamente como será visto em 2.15.

A equação (17), é válida para enrolamento de transformadores com refrigeração natural e forçada, de ar ou óleo.

2.14. ELEVACÃO DE TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS SOBRE A TEMPERATURA AMBIENTE

Já tendo sido estabelecidas as leis que regem a elevação de temperatura dos enrolamentos sobre a temperatura do óleo e elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente, pode-se agora fornecer uma equação geral, através da qual calcula-

se a elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o ambiente, para qualquer carga que não seja a nominal.

$$\theta_{hou} = T_o \left[\frac{Ck^2 R+1}{R+1} \right]^{n_o} + T_g (Ck^2)^{n_c} \quad (18)$$

onde:

n_o = expoente das perdas em função da elevação de temperatura do óleo sobre o ambiente conforme 2.10.

n_c = expoente das perdas em função da temperatura dos enrolamentos sobre o óleo conforme 2.13.

Os demais símbolos estão explicados no Anexo I.

A primeira parte do segundo membro representa a elevação de temperatura do topo do óleo sobre o ambiente, para uma carga k em p.u. da carga nominal.

A segunda parte representa a elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo, para uma carga k em p.u. da carga nominal.

Não é possível obter uma solução analítica para equação (18).

Fazendo-se algumas simplificações como desprezando a correção de temperatura, ou seja, admitindo $C=1$ e fazendo-se $N_o=N_c=1$, podemos deduzir de (18) que:

$$k = \sqrt{\frac{\theta_{hou} (R+1) - T_o}{T_o R + T_g (R+1)}} \quad (19)$$

Estas aproximações todavia não são satisfatórias e uma aproximação mais adequada é obtida considerando-se que:

$$\left[\frac{k^2_{R+1}}{R+1} \right]^{n_o} \approx 1 + n_o \frac{(k^2_{R+1} - 1)}{R+1} \quad (20)$$

$$\text{e } (k^2)^{n_c} \approx 1 + n_c (k^2 - 1) \quad (21)$$

Fazendo $C=1$ e $n_o=n_c=\frac{1}{m}$ podemos escrever (18) como:

$$\theta_{hou} = T_o \left(1 + \frac{1}{m} \frac{(k^2_{R+1} - 1)}{R+1} \right) + T_g \left(1 + \frac{1}{m} (k^2 - 1) \right)$$

donde podemos tirar que:

$$k = \sqrt{\frac{m \theta_{hou} (R+1) + (1-m) (R+1) (T_o + T_g) - T_o}{T_o R + T_g (R+1)}} \quad (22)$$

As diferenças obtidas pelas equações (18), (19) e (22) podem ser melhor verificadas por um exemplo numérico:

Fazendo $C = 1.0$

$$n_o = n_c = 0.8$$

$$T_o = 40^\circ\text{C}$$

$$T_g = 15^\circ\text{C}$$

$$R = 2$$

$$\theta_{hou} = 95^\circ\text{C} \text{ (para um ambiente a } 0^\circ\text{C)}$$

A equação 18 da $k = 1,52$

A equação 19 da $k = 1,40$

A equação 22 da $k = 1,48$

2.15. VARIAÇÃO DA POTÊNCIA SUPORTÁVEL COM A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE

A carga máxima que um transformador pode transportar é, geralmente, determinada pela temperatura máxima dos enrolamentos. Isto é válido tanto para o regime permanente como para o período transitório de operação do transformador. Vamos considerar aqui apenas o regime permanente.

Estamos agora em condições de verificar em quanto pode ser aumentada a carga de um transformador refrigerado a óleo, com a variação da temperatura ambiente, mantendo constante a temperatura dos enrolamentos e utilizando os seguintes valores para os expoentes da equação (18).

1) Elevação máxima de temperatura dos enrolamentos sobre a temperatura do óleo:

$$n_c = 0,8$$

2) Elevação média de temperatura dos enrolamentos, medida pelo método da variação da resistência, sobre a temperatura média do óleo. Em todos os transformadores exceto os refrigerados à água, considera-se que a temperatura média do óleo é a temperatura do mesmo na parte superior, menos, aproximadamente, a metade da diferença de temperatura no óleo entre a parte superior e a inferior dos meios de refrigeração externos. Para medir a diferença de temperatura, podem ser colocados termômetros ou termopares nas superfícies externas, na parte superior e inferior dos meios refrigerantes, nos tubos coletores e radiadores.

a) Fluxo de óleo dirigido diretamente sobre os enrolamentos

$$n_c = 0,8$$

b) Com circulação natural do óleo através de bobinas horizontais

$$n_c = 0,7$$

c) Com circulação natural de óleo através de bobinas verticais

$$n_c = 0,85$$

3) Elevação de temperatura do óleo na parte superior e elevação de temperatura média do óleo sobre o ambiente:

a) Com refrigeração à água, considerando uma elevação constante de temperatura na água

$$n_o = 0,7$$

b) Com jato de água sobre a superfície do tanque

$$n_o = 0,8$$

c) Com refrigeração forçada de óleo

$$n_o = 0,8$$

d) Com refrigeração natural

$$n_o = 0,8$$

e) Com refrigeração forçada de ar

$$n_o = 0,8$$

Na tabela 2.VIII indica-se as potências relativas em função da temperatura ambiente, desde -10 a $+50^{\circ}\text{C}$, necessárias para produzir uma determinada elevação de temperatura do ponto mais quente em transformadores com refrigeração natural. Deve-se notar que a maioria dos transformadores com refrigeração natural pode suportar 1 por cento de sobrecarga por grau Celsius, desde que a temperatura ambiente seja inferior a 30°C , e que no referente à temperatura máxima, deve-se diminuir a carga do transformador em 1 a 1,5 por cento em cada grau de temperatura ambiente superior a 30°C . Porém, para manter-se constante a temperatura no óleo e no núcleo, a carga deve ser reduzida em aproximadamente, 2 por cento por grau de temperatura ambiente, e partindo de 30°C .

As cargas admissíveis nos transformadores refrigerados à água, para diferentes temperaturas da água de entrada, e mantendo-se uma temperatura máxima e a do núcleo constante, determinam-se pelas seguintes relações:

Baixando de 25° para 15°C a temperatura da água de entrada, o transformador pode suportar uma sobrecarga de 10 por cento, e para temperaturas de água de entrada inferiores a 15°C , pode-se aproximadamente aumentar em 0,75 por cento a carga do transformador por grau Celsius, desde que a temperatura da água seja inferior a 25°C . Isto significa que, com uma água de entrada com 10°C , o transformador pode suportar aproximadamente 13 por cento de sobrecarga; para uma água de entrada de 0°C , pode admitir-se 19 por cento de sobrecarga. Como regra geral pode-se calcular em 1 por cento a sobrecarga, por grau Celsius, e para temperaturas da água de refrigeração de entrada entre 25 e 15°C e de 0,8 por cento; para temperaturas da água de entrada entre 15 e 0°C .

Para se poder manter uma temperatura máxima constante, a carga deve ser reduzida em 1,5 por cento por grau Celsius de temperatura da água de entrada, superior a 25°C e para manter-se constante a temperatura do núcleo, a carga deve ser reduzida de dois graus para cada grau Celsius acima de 25°C .

2.16. EFEITO DA ALTITUDE SOBRE A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DOS TRANSFORMADORES

Desde que a transmissão de calor por convecção depende da densidade do ar, todos os transformadores com refrigeração natural são afetados, em maior ou menor grau, pela altitude, isto dependendo da proporção das perdas dissipadas por convecção e por irradiação. É evidente, por exemplo, o efeito mínimo que a altitude tem sobre o aquecimento de transformadores com tanques lisos, nos quais, aproximadamente, 55 por cento das perdas são dissipadas por irradiação, pois ela não é afetada pela altitude, enquanto o efeito é ponderável em um grande transformador com grandes radiadores nos quais as perdas dissipadas por irradiação são muito pequenas.

Considerando o explicado no parágrafo anterior, está claro que não é possível estabelecer uma regra simples para exprimir o efeito da altitude sobre o aumento da temperatura dos transformadores com refrigeração natural.

Da equação (9), podemos tirar que:

$$\theta = \frac{850 W_c^{0,8}}{F^{0,8} p^{0,4}} \quad (24)$$

com W_c em watts por centímetro quadrado.

Vemos portanto que, para uma perda constante por convecção, a elevação de temperatura varia inversamente com a pressão do ar elevada à potência 0,4.

Se parte das perdas dissipa-se por irradiação, o efeito da pressão do ar deve se reduzir na mesma proporção que a relação das perdas por convecção e as perdas totais.

A equação (24) pode ser escrita assim:

$$\theta = \frac{850 W_c^{0,8} R_L}{F^{0,8} p^{0,4}} \quad (25)$$

com W_c em watts por centímetro quadrado, onde R_L é a relação entre as perdas por convecção e as perdas totais (convecção mais irradiação).

Quando o aumento de temperatura é calculado em por cento da elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o ambiente, nos transformadores refrigerados a óleo, a equação (25) deve ser modificada na proporção inversa da relação do aumento de temperatura dos enrolamentos sobre o ambiente com relação a elevação máxima de temperatura do óleo sobre o ambiente:

$$\theta = \frac{850 W_c^{0,8} R_L}{F^{0,8} P^{0,4} R_t} \quad (26)$$

onde R_t é a relação entre a elevação de temperatura dos enrolamentos e a elevação máxima de temperatura do óleo.

A figura 2.12 indica o efeito da altitude sobre a elevação de temperatura dos transformadores com refrigeração natural, para diversos valores de R_L . Para transformadores refrigerados por circulação natural de ar, pode-se admitir que R_L e R_t são iguais a 1.

Quando se aplica ventilação forçada sobre as superfícies do tanque e dos radiadores, pode-se admitir, aproximadamente, que o calor cedido por convecção, para uma determinada temperatura do óleo, duplica-se na refrigeração forçada enquanto que o calor cedido por irradiação será o mesmo do que no caso de ventilação normal.

A elevação de temperatura dos transformadores refrigerados por água não varia com a altitude, a não ser que uma parte apreciável das perdas se dissipe por convecção pela superfície do tanque.

2.17. INFLUÊNCIA DA COR DO TANQUE SOBRE A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

Todas as pinturas metálicas, independentemente de cor, têm a propriedade de contribuir para a elevação de temperatura dos

transformadores que dependem do tanque como meio de dissipação de suas perdas no ar. A influência é maior nos tanques lisos, tendo em vista que a irradiação (que é afetada pela cor, enquanto a convecção não o é) desempenha um papel mais importante na dissipação das perdas para o meio ambiente nas superfícies planas do que nas superfícies onduladas pois, nestas, a convecção é mais importante na transferência de calor.

As cores que reduzem a irradiação de calor têm também a propriedade de reduzir a absorção de calor proveniente dos raios solares, se bem que isto nem sempre se dê na mesma proporção. Por exemplo, o coeficiente de emissão total da pintura cinzenta é 0,95 em temperaturas baixas, enquanto que o coeficiente de absorção de calor solar é de 0,75 para esta mesma cor. Para a tinta a base de alumínio, estes coeficientes são iguais em ambos os casos a 0,55.

Devido aos diversos fatores que intervêm, a questão da influência da resultante dos ditos fatores sobre a temperatura dos transformadores com refrigeração natural, em condição de carga, é muito complexa, especialmente quando o transformador está submetido a ação dos raios solares apenas durante uma parte do tempo de seu ciclo de trabalho.

As razões pelas quais o problema é tão complexo, são:

- 1) A relação entre as quantidades de calor dissipadas por condução, varia, dependendo da forma da superfície de refrigeração do tanque.
- 2) Tanto o fator de emissão como o coeficiente de absorção do calor solar devem ser levados em conta, uma vez que afetam as perdas por irradiação.
- 3) Geralmente apenas uma parte do tanque está exposta aos raios solares.
- 4) A parte exposta aos raios solares está sujeito às variações da intensidade, hora a hora.

- 5) Um tanque pintado de cor escura é beneficiado na parte não exposta, e prejudicado na parte exposta aos raios solares.

Do até agora exposto, podemos ser levados a concluir que, se o tanque de um transformador está pintado de cor clara, tem uma menor elevação de temperatura quando exposto ao sol, do que se sua cor fosse escura. Tal raciocínio está baseado apenas nos coeficientes de absorção das duas cores, porém, não se deve esquecer que um transformador também gera calor internamente e que este calor deve ser dissipado para o meio ambiente.

Testes realizados nos Estados Unidos em várias partes do país⁽⁵³⁾ testes estes realizados em transformadores refrigerados à óleo tanto em transformadores de tanque lisos como de tanques ondulados, pode-se concluir que, se o transformador está exposto aos raios solares, o ganho obtido em pintar o tanque de uma cor clara ou com uma pintura de alumínio é muito pequena, podendo ser desprezado.

É lógico que a elevação de temperatura de qualquer transformador em relação ao ar de refrigeração será maior, quando o transformador está trabalhando no sol do que quando está na sombra. A maior ou menor elevação de temperatura depende do número de horas de sol por dia, da intensidade solar, de quanto por cento do tanque está submetido às irradiações solares e da relação da capacidade térmica do óleo e dos demais materiais para a área de irradiação efetiva. Por estas razões, não é possível dar um valor exato, ainda que, em geral, a elevação de temperatura varie entre 5 e 10°C.

2.17.1. Repintura dos Transformadores no Local de Funcionamento

Ao repintar um transformador no local em que ele se acha instalado, é importante lembrar que: 1) Caso o tanque tenha várias camadas de pintura, será a última que determinará a sua irradiação; 2) A queda de temperatura através das camadas de tinta é desprezível.

2.17.2. Tanques Lisos colocados na sombra

Se um transformador trabalha constantemente na sombra, a influência da cor do tanque pode ser apreciável, sendo ela mais importante nos tanques lisos, mas vai diminuindo de importância à medida que aumenta a ondulação do tanque.

A tabela 2.IX mostra os resultados de testes efetuados em um transformador de 25kVA, colocado na sombra, e cujo tanque liso foi pintado com tinta escura comum, e com tinta de alumínio.

A elevação de temperatura na superfície do tanque e da camada superior do óleo do transformador, pintado de cor escura, foi 78,5% da temperatura do transformador pintado com tinta de alumínio. Este valor coincide com o valor calculado de 75,2% obtido pela multiplicação de 55%, valor da componente de irradiação, por 0,55, coeficiente de irradiação do alumínio, mais 45% valor da componente de convecção.

2.17.3. Tanques de Superfície Ondulada colocados na sombra

A influência da pintura de alumínio sobre a elevação de temperatura dos transformadores colocados na sombra, é menor nos tanques não lisos, ou seja, ondulados, com tubos ou radiadores exteriores, devido à menor participação percentual das perdas por irradiação, porém que pode ainda ter um valor apreciável. O cálculo demonstra que, por exemplo, um tanque com quatro fileiras de tubos fixados exteriormente aquecer-se-á aproximadamente 12% mais estando pintado com alumínio e colocado a sombra. Ainda em transformadores maiores, com radiadores dispostos o mais próximo possível uns dos outros, o cálculo demonstra que a elevação de temperatura será aproximadamente 7% maior.

2.17.4. Conclusão do Efeito da Cor do Tanque Sobre a Elevação de Temperatura dos Transformadores

Em resumo pode-se dizer que:

- 1) Na sombra
- 1.1) A elevação de temperatura de um transformador cujo tanque está pintado com material não metálico, é praticamente independente da cor.
 - 1.2) As pinturas metálicas irradiam menos calor que as não metálicas, e, por conseguinte, podem produzir uma elevação excessiva de temperatura.
 - 1.3) Um tanque liso pintado com tinta de alumínio, aquecer-se-á aproximadamente 30% mais do que um pintado com tinta não metálica. A elevação de temperatura dos enrolamentos em relação a temperatura ambiente, aumentará a mesma quantidade de graus que a temperatura do óleo.
 - 1.4) O valor de 30% representa aproximadamente a maior elevação de temperatura produzida ao pintar-se o tanque com uma tinta de alumínio, em lugar de se empregar uma pintura metálica. Se a superfície de um tanque liso, é pintado com uma cor de coeficiente de emissividade menor que o do alumínio, a elevação de temperatura será naturalmente, maior que 30% chegando até a 75%, quando a irradiação é muito baixa como é o caso de prata brilhante, níquel etc...
 - 1.5) A medida que o tanque se faz mais ondulado, com a colocação de radiadores, diminui a influência das pinturas metálicas sobre a elevação de temperatura, baixando em casos extremos até 5 a 7%.

2) Sob a ação do sol:

- 2.1) O melhoramento obtido com o uso de pinturas especiais, em transformadores autorefrigerados providos de tanque liso ou não, é tão pequeno que raramente isto se leva em consideração na prática. Mesmo nas condições mais fa

voráveis, a pintura clara de chumbo, tanque liso e dia de sol forte, a melhora durante o dia não será maior que 2 ou 3°C, sendo na média das 24 horas, inferior a 2°C.

- 2.2) Ao pintar-se transformadores no local de funcionamento, deve-se considerar muito mais a durabilidade da pintura e a estética do que o aquecimento.

3 - MÉTODO

É perfeitamente compreensível que, para um transformador de potência dada, e sob as condições conhecidas, exista uma capacidade de sobrecarga própria para este transformador, ou seja, existe uma sobrecarga que o transformador pode suportar sem que haja comprometimento de sua expectativa de vida. Por muitos anos tem-se procurado estabelecer um critério e um método de cálculo que permita determinar com relativa segurança, qual a sobrecarga suportável por um transformador dado sob condições específicas.

As normas geralmente dão condições gerais e por isto são a favor da segurança podendo-se muito bem, quando se trata de um caso específico de um transformador para o qual se conhecesse todas as características que podem influir na sua capacidade de sobrecarga, fazer um estudo específico deixando-se de lado um conservadorismo que conduziria a uma subutilização do equipamento. O procedimento determinado pelas normas, como guias de carregamento, são baseados na temperatura do ponto mais quente, em curvas da vida do isolamento e na determinação da perda de vida para os vários tipos de curvas de cargas e temperatura ambiente.

A comissão formada pelas empresas da PENNSYLVANIA, NEW JERSEY e MARYLAND, (PJM) nos Estados Unidos, estudou durante muitos anos um método, baseado na sua experiência operacional, para determinar a capacidade de sobrecarga de seus transformadores. Este trabalho foi feito baseado nessa experiência, e o programa desenvolvido está baseado nas premissas adotadas pela interconexão acima referida.

O método utilizado, cujas fórmulas são apresentadas no Anexo 1, está baseado no cálculo da temperatura do ponto mais quente do enrolamento do transformador em função da carga horária, e na correspondente determinação da perda de vida do isolamento para aquela temperatura durante aquela hora.

Baseado neste método, foi desenvolvido um programa de computador descrito no Anexo 2.

As equações principais e os parâmetros que limitam o emprego deste método estão descritos a seguir.

3.1. FORMULAS

As fórmulas são as mesmas contidas nos guias de sobrecarga de transformadores da ANSI e NEMA para o carregamento de transformadores, com pequenas exceções que estão indicadas no Anexo 1. As equações para o aumento de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre o topo do óleo, são consideradas como sendo muito conservadoras em muitos casos, porque os guias de sobrecarga consideram apenas uma diferença de 10 a 15°C, 10°C no caso de transformadores com elevação média do enrolamento de 55°C, e 15°C para os transformadores com elevação de 65°C, entre a temperatura média da bobina e a temperatura do ponto mais quente para todos os tipos de refrigeração. Os fabricantes informam que podem fornecer o valor calculado da diferença entre o ponto mais quente do enrolamento e a temperatura do topo do óleo para a carga nominal, baseando-se no projeto e nos testes, exceto para transformadores com muito tempo de fabricação. A temperatura dos enrolamentos baseada neste valor calculado e na elevação de temperatura de topo do óleo obtida nos testes, fornecem valores bem exatos. Quando estes dados não estão disponíveis, no caso de transformadores antigos, os fabricantes devem ser solicitados a fornecer valores estimados e baseados em sua experiência.

3.2. EXPOENTES

Os expoentes para serem usados nas equações que fornecem a elevação da temperatura do óleo e do ponto mais quente sobre o óleo, foram escolhidos após considerações das companhias que compõem a interconexão PJM e foram revistas pelos fabricantes.

O expoente n para os diversos tipos de refrigeração é dado abaixo:

LN	0,8
LN/LVF	0,8
LN/LVF/LVF	1,0
todos tipos LCF	1,0

3.3. TEMPERATURA AMBIENTE

Desde que a temperatura total do isolamento é um dos fatores mais importantes na determinação da vida do isolamento de um transformador, a temperatura ambiente é um fator importante na determinação da carga suportável pelo transformador. Por isto, deve-se tomar bastante cuidado na escolha da temperatura ambiente, sendo recomendável que ela seja feita baseada em observação da temperatura média do local de instalação. Deve-se também prever uma certa margem de segurança, porque haverá dias em que a temperatura será superior à temperatura média. É recomendável que se use a temperatura média mais dois desvios padrões. No caso de locais com ampla variação de temperatura será convenientemente verificar a sazonalidade da temperatura e se ela oferece condições para cargas de inverno e de verão, por exemplo.

Este método é bastante utilizados nos Estados Unidos onde há uma substancial diferença entre as temperatura de inverno e de verão.

No caso do Nordeste brasileiro isto não é aplicável tendo em vista a pequena amplitude térmica da região, situada em alguns pontos, em torno de 6°C .

3.4. CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA

O fator de correção da resistência é incluído no programa, de forma a corrigir a perda nas variações de temperatura da bobina. Acredita-se que a omissão deste fator pode resultar na obtenção de sobrecargas otimistas especialmente para sobrecargas de curta duração, quando altas temperaturas dos enrolamento podem ser registradas. As fórmulas para dar a correção de resistência estão indicadas no Anexo 1.

3.5. LIMITES DE TEMPERATURA

O limite de temperatura do ponto mais quente de 150°C e 180°C , e o limite de temperatura do topo do óleo de 100°C e 110°C , foram

escolhidos para os transformadores com elevação média da temperatura da bobina de 55°C e 65°C, respectivamente. Adicionalmente, foi adotado um limite de sobrecarga de 200% da potência nominal de placa. Recomenda-se que estes limites não sejam excedidos durante a operação do transformador.

3.6. CONSTANTE DE TEMPO

As equações da constante de tempo são as mesmas utilizadas no guia de sobrecarga, sem nenhuma alteração.

A constante de tempo é o intervalo de tempo necessário para que a temperatura do óleo se eleve do valor inicial ao final, caso a taxa de elevação de temperatura inicial fosse mantida até ser atingida a temperatura final. Para a carga nominal em kVA, partindo-se com uma elevação de temperatura nula, sobre o ambiente, a constante de tempo será:

$$\zeta_r = \frac{HT}{P_f} \quad (27)$$

Onde,

ζ_r Constante de tempo do topo do óleo, em horas.

P_{fl} São as perdas totais, na potência nominal.

H Capacidade térmica do transformador em watthoras, por grau Celsius.

Para as outras variáveis ver Anexo 1.

A capacidade térmica para os transformadores autoventilados ($n=0,8$) é obtida da seguinte expressão, em função do peso em Kg do material do transformador:

$$H = 0,132 \text{ Kg (bóbinas+núcleo)} + 0,088 \text{ Kg (tanque e radiadores)} + 0,353 \text{ (litros de óleo)}.$$

Para $n > 0,8$, o fator para o peso do tanque passa a ser 0,132 e o fator para litros de óleo passa a ser 0,512.

Quando o expoente n é menor do que um, a "constante" de tempo varia do valor previamente calculado, quando a elevação de tempera

tura inicial é diferente de zero e a temperatura final é diferente da atingida a plena carga. A correção da variação da constante de tempo térmica é dada por:

$$\zeta = \zeta_r \left[\frac{\frac{\theta_{ou}}{T_o} - \frac{\theta_{oi}}{T_o}}{\left(\frac{\theta_{ou}}{T_o}\right)^{1/n} - \left(\frac{\theta_{oi}}{T_o}\right)^{1/n}} \right] \quad (28)$$

3.7. PERDA DE VIDA DO ISOLAMENTO:

A curva da perda de vida do isolamento usada para o isolamento com elevação de temperatura média da bobina de 65°C, está baseada no guia de carregamento "Guide for Loading Oil Immersed Power Transformers with 65°C Average Winding Rise, National Electrical Manufacturers' Association Standards Publication nº TR 98 - 1964"

Esta curva está baseada na teoria da velocidade de reação química de Arrhenius (9,21,24,50).

A lei de Arrhenius pode ser expressa pela relação

$$c = c_{\infty} \exp(-W_o/RT) \quad (29)$$

Onde:

c_{∞} é a constante de reação correspondente à temperatura $T = \infty$
 W_o é a energia de ativação
 R é a constante dos gases.

Esta relação foi obtida por Arrhenius empiricamente, como resultado de uma pesquisa da velocidade da reação em função da temperatura. Ewing, baseado em estudos teóricos, propôs uma relação um pouco diferente para a velocidade das reações. Para a maioria dos problemas de engenharia, a lei de Arrhenius dá uma precisão suficiente, uma vez que, em condições normais, a elevação de temperatura é inferior a temperatura absoluta.

A Lei de Arrhenius pode ser escrita sob a forma:

$$c = c_{\infty} \exp(-B/(T_o + \Delta\theta)) = c_{\infty} \exp(-B/(T_o(1 + \Delta\theta/T_o))) \quad (30)$$

como $\Delta\theta \ll T_o$ podemos considerar que

$$c \approx c_{\infty} \exp((-B/T_0)(1 - \Delta\theta/T_0)) = c_{\infty} \exp(-B/T_0 + (B/T_0^2)\Delta\theta) \quad (31)$$

ou ainda,

$$c = c_0 \exp(\alpha\Delta\theta) \quad (32)$$

Onde,

T_0 é o valor absoluto da temperatura correspondente às condições normais.

$\Delta\theta$ é o aumento de temperatura

$$B = W_0/R \quad (33)$$

$$c_0 = c_{\infty} \exp(-B/T_0) \quad (34)$$

$$\alpha = B/T_0^2$$

Sob a influência das interações ocorridas com o meio ambiente, varia a espessura da camada isolante que possuía as propriedades elétricas e mecânicas.

Se o valor médio da espessura crítica da camada isolante correspondente a sua ruptura por influência de esforços mecânicos, é igual $\bar{h}_{cr}$, o tempo médio necessário para esta espessura ser atingida é dado por

$$\bar{t} = \frac{\bar{h}_0 - \bar{h}_{cr}}{\bar{c}} = \frac{\bar{h}_0 - \bar{h}_{cr}}{\bar{c}_0} \exp(-\alpha\Delta\theta) \quad (35)$$

$\bar{h}_0$ é a espessura média inicial.

Conhecendo-se a período médio de vida do isolamento $t = \zeta_0$, pode-se achar a temperatura de aquecimento admissível $\Delta\theta = \Delta\theta_{adm}$:

$$\zeta_0 = \frac{h_0 - h_{cr}}{\bar{c}_0} \exp(-\alpha\Delta\theta_{adm}) \quad (36)$$

No caso de isolamento trabalhar à temperaturas diferentes da admissível, o seu período médio de serviço será dado por:

$$\zeta_{ox} = \zeta_0 \exp(-\alpha(\Delta\theta_x - \Delta\theta_{adm})) = \zeta_0 \exp(-\alpha(\theta_x - \theta_{adm})) \quad (37)$$

Onde

$$\Delta\theta_x = \theta_x - \theta_o$$

$$\Delta\theta_{adm} = \theta_{adm} - \theta_o$$

Um outro critério é admitir que o isolamento sofra uma ruptura puramente elétrica, e conhecendo-se o valor médio da rigidez dielétrica do isolamento $E(V/cm)$, obtem-se o valor médio da espessura crítica do isolamento.

$$h'_{cr} = \frac{\bar{U}}{E} \quad (38)$$

Conhecendo-se o valor médio da espessura inicial do isolamento $\bar{h}_o$, pode-se achar um valor médio para o período de vida:

$$\frac{1}{\bar{\zeta}_o} = \frac{\bar{h}_o - \bar{h}'_{cr}}{\bar{c}_o} \exp(-\alpha\Delta\theta) \quad (39)$$

Comparando-se os valores de ζ_o e ζ'_o , determina-se qual o critério mais severo na determinação do período médio de vida do isolamento.

A curva para os transformadores com elevação de temperatura média do isolamento de $55^\circ C$, é mais difícil de escolher, uma vez que para a maioria dos autores a curva apresentada na ANSI C57. 92 é considerada conservadora. A PJM utiliza para estes transformadores uma curva mais realista, baseada em sua experiência, para a qual o transformador tem a mesma expectativa de vida a $95^\circ C$ que um transformador com a curva NEMA a $110^\circ C$, e é paralela à curva NEMA conforme ilustra a figura 3.1. A perda de vida em por cento por hora para o isolamento com elevação média de temperatura de $55^\circ C$ é dada por:

$$PV\%/hora = 100 \exp(32,543 - 16054/(\theta_{hs} + T_a + 273)) \quad (40)$$

Para os transformadores de elevação média de temperatura de $65^\circ C$, esta perda de vida é dada por:

$$PV\%/h = 100 \exp\left(30,834 - \frac{16054}{\theta_{hs} + T_a + 273}\right) \quad (41)$$

3.8. PERDA DE VIDA ACEITÁVEL

A perda de vida aceitável para emergência de transformadores, está indicada na tabela abaixo:

<u>Duração da emergência</u>	<u>Tipo de emergência</u>	<u>Perda de vida</u>
6 meses(130 dias de pico de carga)	Conserto em transformadores	15,0%
1 mês(22 dias de pico de carga)	Troca de transformador pelo reserva.	10,0%
1 semana(5 dias de pico de carga)	Queda de torre de transmissão, ou troca de transformador pequeno pelo reserva.	3,5%
1 dia	Contingência dupla de geração, linha de transmissão, transformador ou barramento	1,5%
10 horas	Contingência simples ou dupla de gerador, linha, transformador ou barra.	1,5%
2 horas	Contingência simples ou dupla de gerador, linha, transformador ou barra.	1,5%

Esta tabela foi elaborada com base na experiência operacional das companhias que compõem a interligação PJM. A utilização desta tabela não deve resultar numa exposição excessiva dos transformado

res à sobrecarga. Na escolha dos vários tipos de duração de emergência, outros critérios podem ser escolhidos, porém, os valores indicados resultam de um consenso de que eles são representativos de valores típicos de cada emergência indicada.

A curva de carga usada para avaliação dos efeitos da sobrecarga, deve ser uma curva de carga típica da subestação em que o transformador está instalado. Deve-se observar que o modelo estabelecido baseia-se numa curva de carga horária.

Caso se deseje estudar o valor máximo de uma sobrecarga, pode-se aplicar um multiplicador que deslocará a curva de carga paralelamente, ou seja, mantendo-se a mesma forma da curva de carga. No caso de se desejar estudar uma emergência com duração de poucas horas, deve-se fornecer uma nova curva de carga. No caso de estudos a longo prazo, deve-se verificar se durante a evolução da carga não haverá modificação na forma da curva de carga ocasionada pela instalação de novas carga com valores elevados, em relação à carga existente, e com fator de carga diferente do das demais cargas ou mesmo com regime de trabalho diferente do das outras cargas.

4 - CONCLUSÕES

Utilizando-se uma curva de carga de uma subestação e as condições ambientais da mesma, foram rodados diversos casos a fim de se determinar os valores de sobrecarga que o transformador poderia suportar primeiramente, sem que houvesse comprometimento de sua expectativa de vida, ou seja a carga que o transformador poderia suportar tendo uma perda de vida diária de 0,0369%. Foram feitos também estudos para uma sobrecarga para seis meses, para um mês, uma semana e um dia. O resultado destes casos encontra-se na tabela 4.I.

Pode-se verificar que o transformador pode trabalhar com uma carga superior à nominal, sem que haja comprometimento de sua expectativa de vida. Isto deve-se ao fato de o mesmo trabalhar algumas horas com perda horária inferior a 0,001538% ($0,001538 = 0,0369/24$); isto possibilita que o transformador, durante algumas horas, tenha uma perda de vida superior a 0,001538% desde que não sejam ultrapassados os limites citados no item 3.5.

Com a finalidade de se verificar a sensibilidade dos resultados comparados com os parâmetros do transformador, foram rodados casos em que estes parâmetros foram variados em 10% acima e abaixo de seus valores reais; por exemplo, foi rodado um caso em que o transformador tinha apenas 90% do volume de óleo e outro em que o transformador tinha 110% do volume de óleo, e o mesmo foi feito com todos os dados de entrada e comparados com o caso padrão. O resultado encontra-se resumido na tabela 4.II. Pode-se verificar que os resultados são poucos sensíveis aos dados de entrada, e isto possibilita usar valores padrão para alguns dados faltantes. O resultado mostra ainda uma sensibilidade acentuada às variações de temperatura, razão pela qual a C57.92 recomenda utilizar a temperatura média mais cinco graus. Caso se possua um valor confiável da temperatura média obtida de dados estatísticos, deve-se então utilizar a temperatura média mais dois ou três desvios padrão, dependendo da probabilidade que se deseja desta temperatura ser excedida.

É baseado nesta sensibilidade à temperatura ambiente que se recomenda, em regiões onde há uma grande variação de temperatura, que se estabeleçam cargas e sobrecargas sazonais. No caso de Recife isto não se faz necessário pois, embora ela seja relativamente elevada, mantem-se dentro de uma estreita faixa de variação, e o desvio padrão da temperatura é inferior a dois graus.

Os casos rodados mostram também uma grande sensibilidade do transformador à forma do ciclo de carga, e isto se deve ao fato da temperatura do ponto mais quente ser bastante sensível à forma do ciclo de carga, devido à constante de tempo térmica do transformador.

Na figura 4.1 temos um gráfico de um ciclo a que foi submetido um transformador típico, e o gráfico da temperatura do ponto mais quente.

Nas horas 8 e 9, o transformador é submetido a uma carga de 43 MVA, e verificamos que mesmo tendo permanecido constante a carga, a temperatura continuou se elevando e atingindo 98 e 103°C para as respectivas horas. Isto se deve à constante de tempo térmica do transformador; na mesma figura, verificamos que nas horas 23, 24, 1 até 7, e das 10 às 17 o transformador foi submetido a uma carga constante de 32 MVA. Neste caso, a temperatura não se manteve constante mas, decresceu, atingindo os valores de 90, 86, 82, 80, 79, 78, 78, 78, 85, 83, 81, 80, 79, 78, 78 e 78, para as mesmas horas.

Na figura 4.2 mostramos o mesmo ciclo de carga, em valores absolutos, tendo-se apenas mudado a forma do mesmo, e juntando-se as horas em que o transformador esteve submetido a carga máxima. Verificamos então que das 16 às 22 horas, o transformador esteve submetido a uma carga de 43 MVA e a temperatura do ponto mais quente foi de 102, 106, 108, 110, 111 e 112, atingindo portanto valores superiores ao caso anterior.

Isto vem mostrar que o transformador, por causa de sua constan

te de tempo térmica, tem uma memória que faz com que a temperatura atingida no ciclo horário seja fixada à temperatura ambiente, função da carga anterior.

Em consequência disto, verificamos que no segundo caso a perda de vida é superior à do primeiro, ou seja, se usarmos a perda como critério limitador da carga suportável, esta carga será influenciada também pela forma do ciclo de carga.

Vale lembrar que na determinação da sobrecarga admissível pelo transformador, deve-se levar em conta os outros equipamentos associados como disjuntores, chaves, barramentos, transformadores de corrente, conectores, etc, pois estes podem ser elementos que limitam a capacidade de sobrecarga da subestação como um todo, e principalmente deve-se levar em consideração a capacidade de sobrecarga dos geradores, quando o transformador for um transformador elevador de uma usina. A calibração dos relés é outro ponto que deve ser observado.

Deve-se levar em consideração que a capacidade de sobrecarga não é a mesma para todos transformadores pois, um transformador com 20 ou 30 anos de operação, tem uma capacidade de sobrecarga menor do que um transformador com pouco tempo de uso, principalmente se o transformador antigo foi submetido a esforços excessivos de curto-circuito durante sua operação.

Finalmente, observamos que na determinação da capacidade de sobrecarga devem ser considerados fatores econômicos como as perdas que crescem com a sobrecarga, a regulação de tensão que é aumentada, ou então considerar-se o custo do suporte de reativos para manter a tensão em níveis aceitáveis durante a operação em sobrecarga, e só com a consideração destes fatores poderemos encontrar um ponto econômico de operação para o transformador.

ANEXO 1

EQUAÇÕES USADAS NO PROGRAMA

As equações utilizadas no programa estão baseadas no guia de carga de transformadores ANSI C57.92-1962. Estas formulas estão aqui reproduzidas por questão de conveniência, e também para mostrar algumas pequenas modificação introduzidas. Todas as temperaturas a que nos referimos são em graus Celsius.

A 1.1 Elevação de temperatura do topo do óleo para regime permanente:

$$\theta_{ou} = T_o \left[\frac{CK^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \quad (A.1.1.)$$

Onde, θ_{ou} Elevação de temperatura final do topo do óleo sobre o ambiente, para uma carga unitária K

T_o Elevação de temperatura do topo do óleo para carga nominal, determinado pelo teste de aquecimento.

K carga em pu da potência nominal

R Relação entre as perdas em carga para as perdas em vazio, para a carga nominal.

C Fator de Correção da resistência (este fator não consta no guia)

n Coeficiente que assume um valor conforme indicado no item 3.2

A. 1.2. Elevação de temperatura do ponto mais quente para uma carga constante:

$$\theta_{hou} = \theta_{ou} + \theta_g \quad (A.1.2)$$

$$\theta_{hou} = T_o \left[\frac{CK^2 R + 1}{R + 1} \right]^n + T_g (CK^2)^n$$

Onde,

θ_{hou} Elevação de temperatura final do ponto mais quente sobre a temperatura ambiente para a carga unitária K.

θ_g Elevação de temperatura ao ponto mais quente acima do tipo do óleo para uma carga unitária K.

T_g Elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo para carga nominal, obtido no teste de aquecimento.

A.1.3. Elevação de temperatura transitória do topo do óleo

$$\theta_o = (\theta_{ou} - \theta_{oi}) (1 + \exp(t/\zeta)) + \theta_{oi} \quad (A.1.3)$$

Onde,

θ_o Elevação de temperatura do topo do óleo sobre o ambiente no fim de um tempo t.

θ_{oi} Elevação de temperatura inicial do topo do óleo sobre a temperatura ambiente.

ζ Constante de tempo térmica do transformador em horas, para o intervalo de aumento de temperatura de θ_{oi} até θ_{ou} .

A.1.4. Elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o ambiente:

$$\theta_{hs} = \theta_o + \theta_g \quad (A.1.4)$$

Onde,

θ_{hs} Elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o ambiente ao fim de período de tempo t.

A.1.5. Fator de Correção da Resistência

Um fator de correção deve ser aplicado para compensar a variação das perdas com a temperatura das bobinas. Os testes de aquecimento em fábricas são feitos aplicando-se uma temperatura média nas bobinas de 75° , para os transformadores projetados para elevação de 55° e, de 85° para os transformadores projetados para 65° .

A correção de resistência para qualquer outra temperatura média das bobinas é:

$$C = \frac{234,5 + \theta_{av} + T_a}{234,5 + 75(\text{ou } 85)} \quad (A.1.5)$$

ANEXO 2

A.2.1. Programa

A finalidade deste anexo é descrever e explicar o programa de forma que possibilite o uso do mesmo.

A.2.2. Descrição

O programa é constituído de um programa principal e quatro subrotinas.

O programa principal faz a leitura dos dados, chama as subrotinas utilizadas e imprime o resultado, bem como as mensagens de erro.

As subrotinas são:

HT Calcula a constante térmica do transformador
TETAHS Calcula a elevação de temperatura do ponto mais quente
PVIDA Calcula a perda de vida para uma dada temperatura
CPM1 Traça o gráfico da carga do transformador e da temperatura do ponto mais quente.

A.2.3. Uso

O programa exige os seguintes dados de entrada

- a) Título, variável A(1,10) formato 10A4, colunas 1 a 40 do cartão 1
- b) Potência Nominal do Transformador em MVA, variável PNOM, formato F10.0, colunas 1 a 10 cartão 2
- c) Peso da Parte Ativa em kg, variável WCC, formato F10.0, colunas 11 a 20 cartão 2.
- d) Peso do Tanque em kg, variável WT, formato F10.0, colunas 21 a 30 cartão 2.
- e) Volume do Óleo, em litros, variável XL0, formato F10.0, colunas 31 a 40 cartão 2.

- f) Coeficiente determinado pelo tipo de transformador, ver item 3.2, variável E formato F10.0, colunas 41 a 50 cartão 2.
- g) Elevação de Temperatura do Óleo, valor obtido no ensaio do transformador, variável T0, formato F10.0, colunas 1 a 10 do cartão 3.
- h) Relação entre as Perdas no Cobre e as Perdas no Ferro, perdas obtidas no ensaio do transformador, variável R, formato F10.0 colunas 11 a 20 do cartão 3.
- i) Perdas a Plena Carga em kW, valor obtido no ensaio do transformador, variável PFL, formato F10.0, colunas 21 a 30 do cartão 3.
- j) Elevação Média de Temperatura do Enrolamento, em graus Celsius, variável TAV, formato F10.0, colunas 31 a 40 do cartão 3.
- l) Tipo de Transformador, se possui enrolamento projetado para elevação média de temperatura de 55°, usar 55, ou 65°C, usar 65, variável ITIP, formato I10, colunas 41 a 50, cartão 3.
- m) Temperatura Ambiente, em graus Celsius, variável TA, formato F10.0, colunas 1 a 10 do cartão 4.
- n) Carga Horária e que está submetido o transformador, para cada hora usar um cartão, variável CAR(I), formato F10.0 colunas 1 a 10 dos cartões 5 a 28
- o) Multiplicador, valor pelo qual se deseja multiplicar o ciclo de carga e utilizado como "Flag" para parar o processamento' (XMULT=0), variável XMULT, formato F10.2, colunas 1 a 10.
Usar tantos cartões quanto sejam os casos que se deseja rodar.

Saída

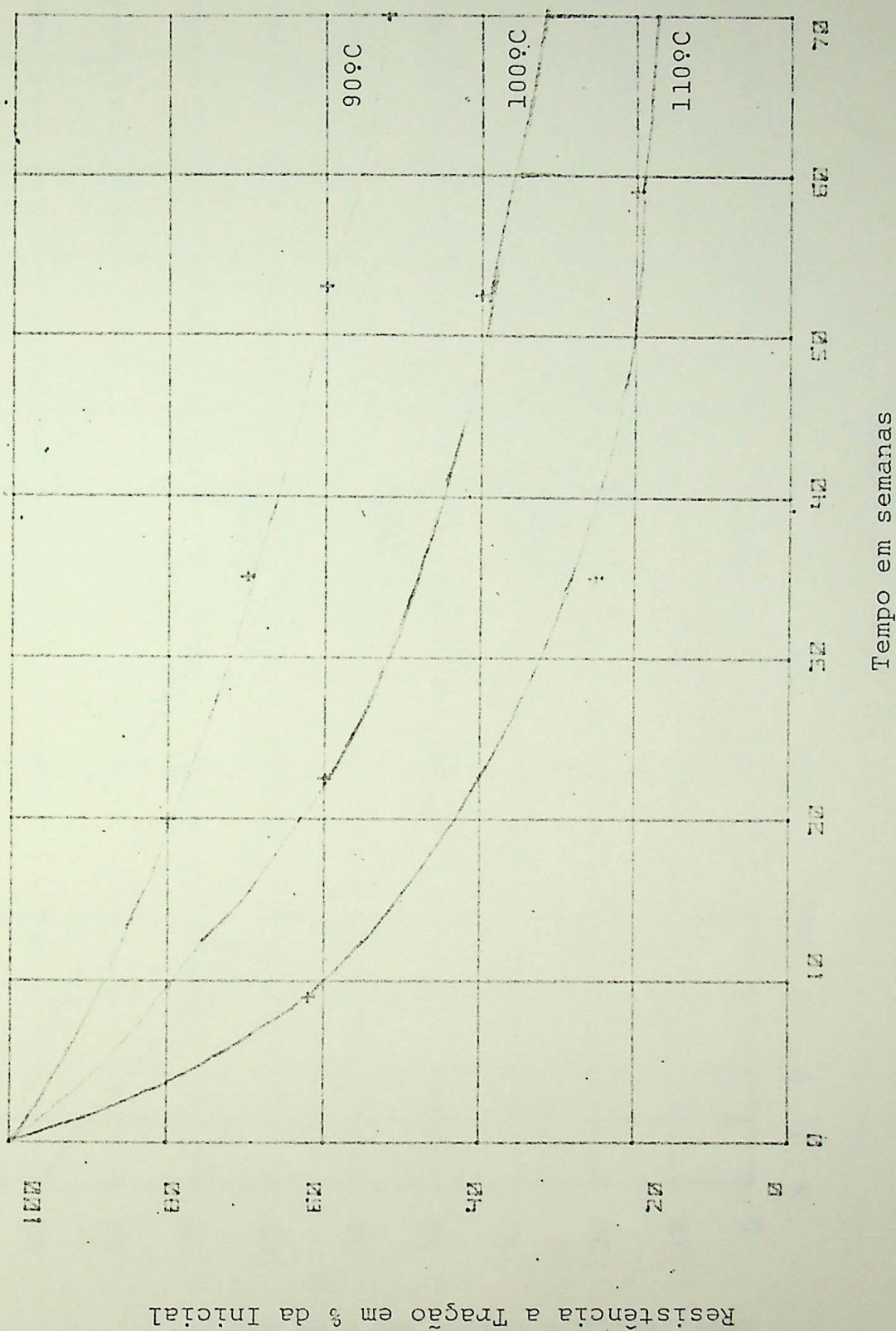
A saída do programa é constituída de:

- a) Título do estudo
- b) Dados de entrada
 - b.1) Dados de Placa

- b.1.1) Potencia Nominal
- b.1.2) Peso da parte ativa
- b.1.3) Peso do tanque
- b.1.4) Volume de óleo
- b.2) Dados obtidos no teste
 - b.2.1) Elevação de temperatura do óleo sobre o ambiente
 - b.2.2) Relação de perdas no cobre para perdas no ferro
 - b.2.3) Elevação média de temperatura do enrolamento
- c) Dados da Subestação em que o transformador está instalado
 - c.1) Temperatura Ambiente
 - c.2) Ciclo de carga fornecido multiplicado pelo multiplicador dado para o caso
- d) Valores calculados
 - d.1) Temperatura do ponto mais quente em cada hora em °C
 - d.2) Perda de vida para cada hora
 - d.3) Perda de vida diária
 - d.4) Fator de carga
 - d.5) Fator de sobre carga.

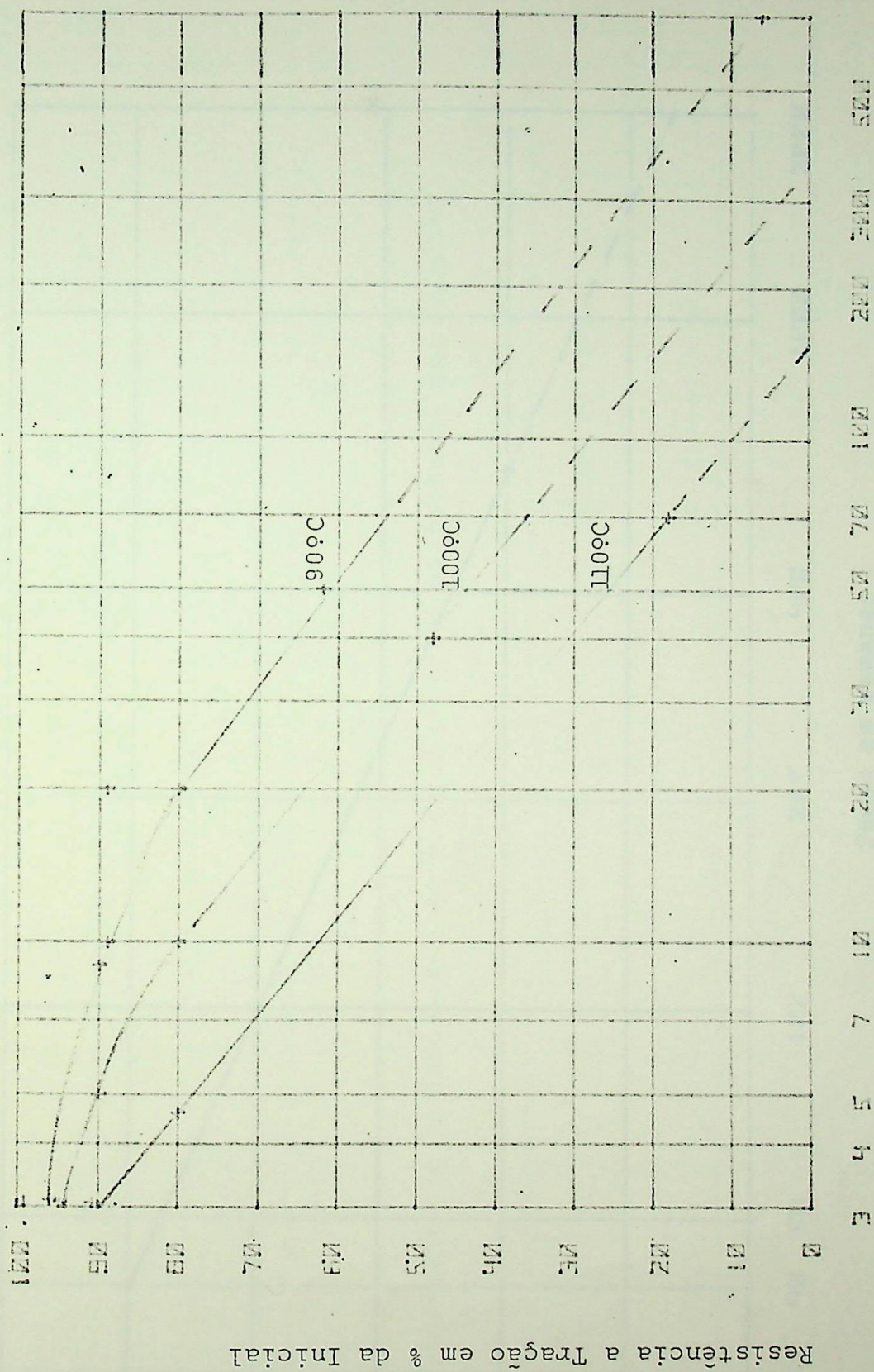
O programa permite que sejam rodados diversos casos para um mesmo ciclo de carga, através do multiplicador XMULT, que desloca, em cada caso, o ciclo de carga paralelamente ao ciclo original.

Nas páginas 89 a 108 apresentamos uma listagem do programa, bem como um caso rodado onde pode-se verificar a utilização do mesmo.



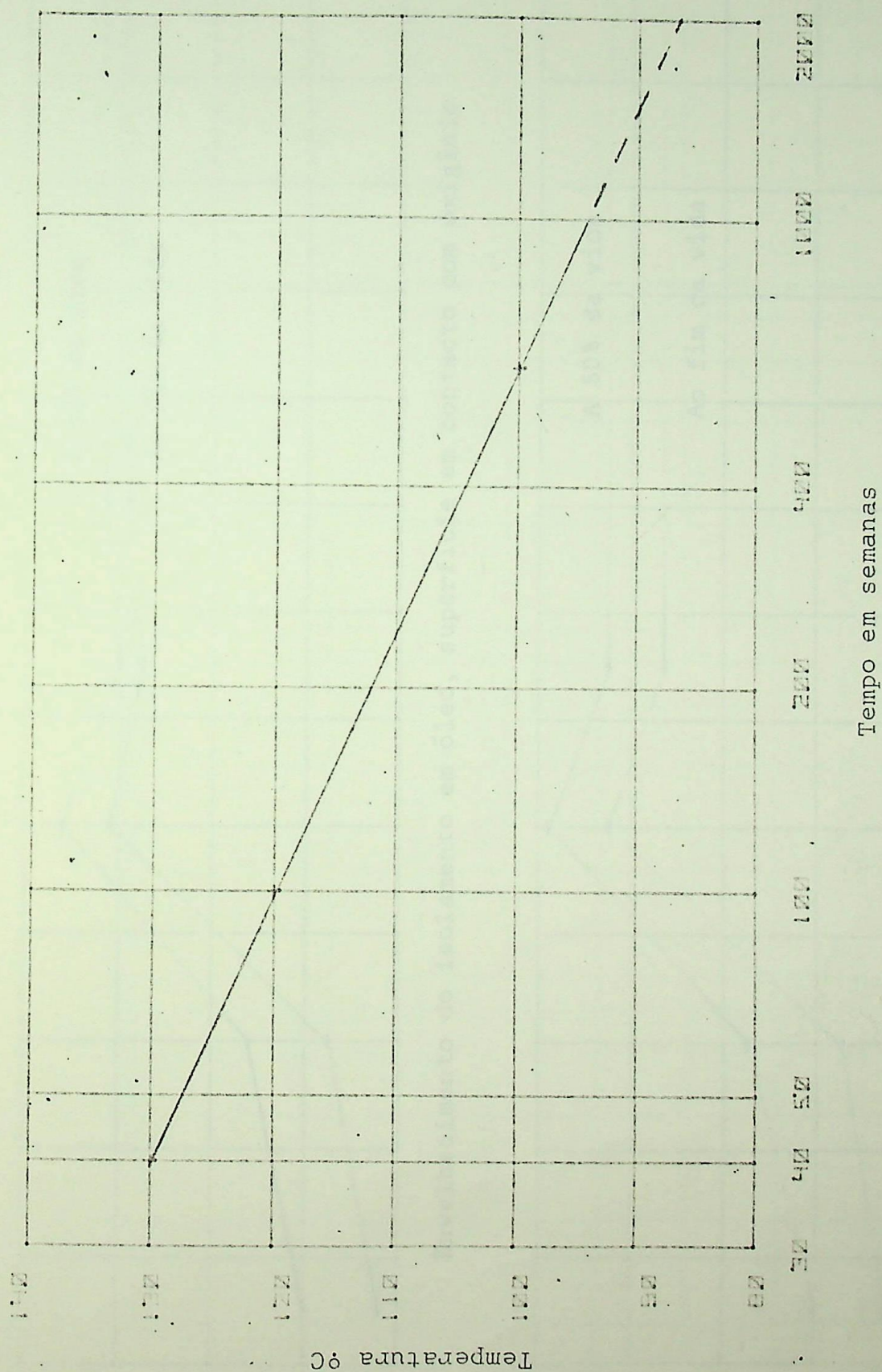
Envelhecimento de cambraia envernizada, no óleo

Figura 2.1



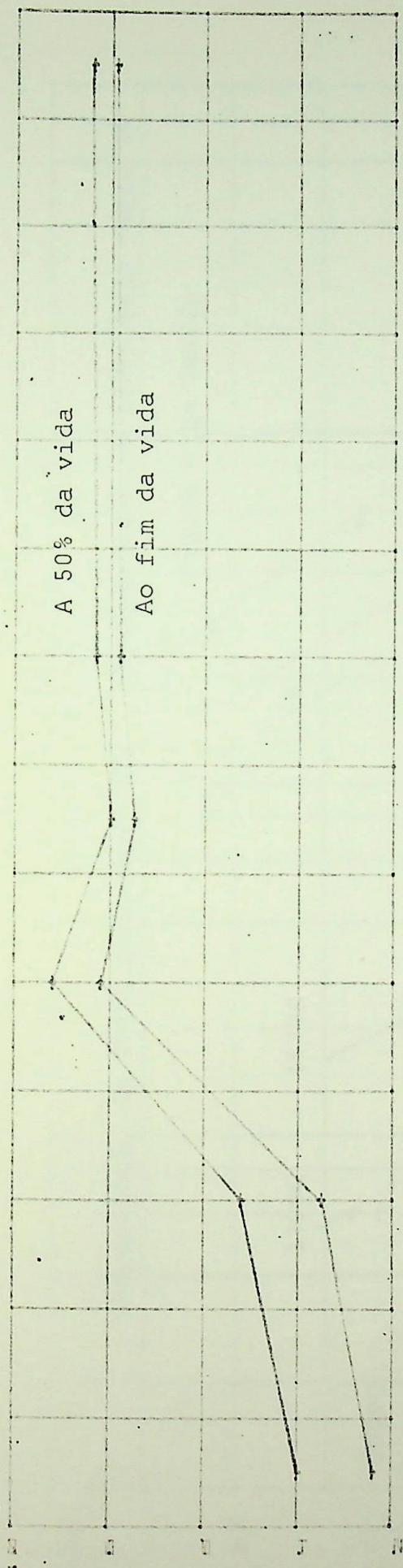
Efeito da temperatura na deteriorização mecânica do isolamento classe A, no óleo.

Figura 2.2

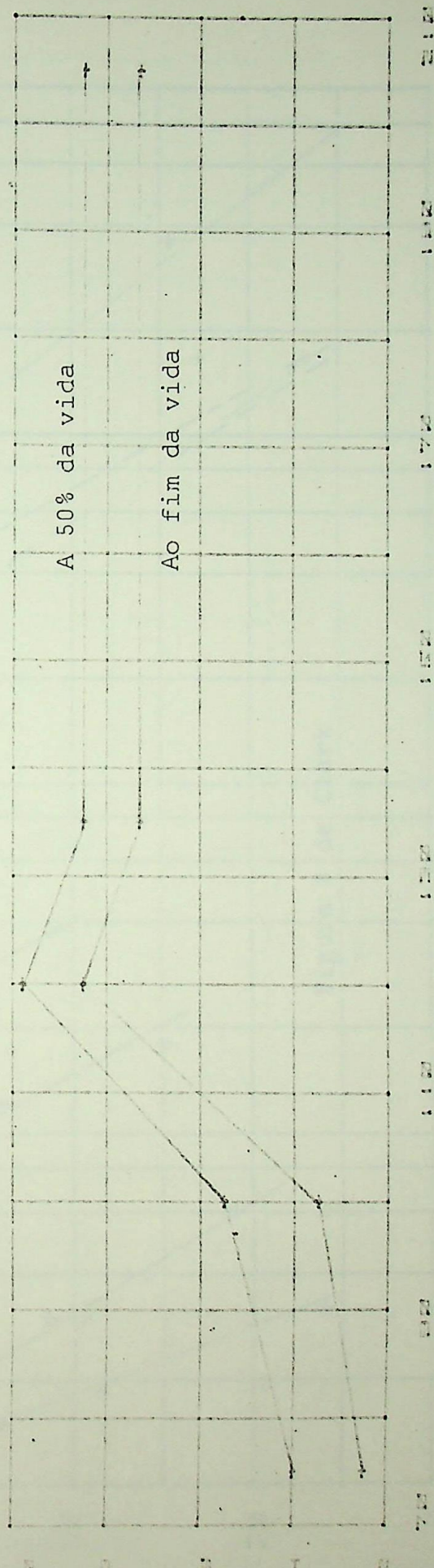


Tempo necessário a causar a completa deteriorização mecânica do isolamento classe A, no óleo.

Figura 2.3

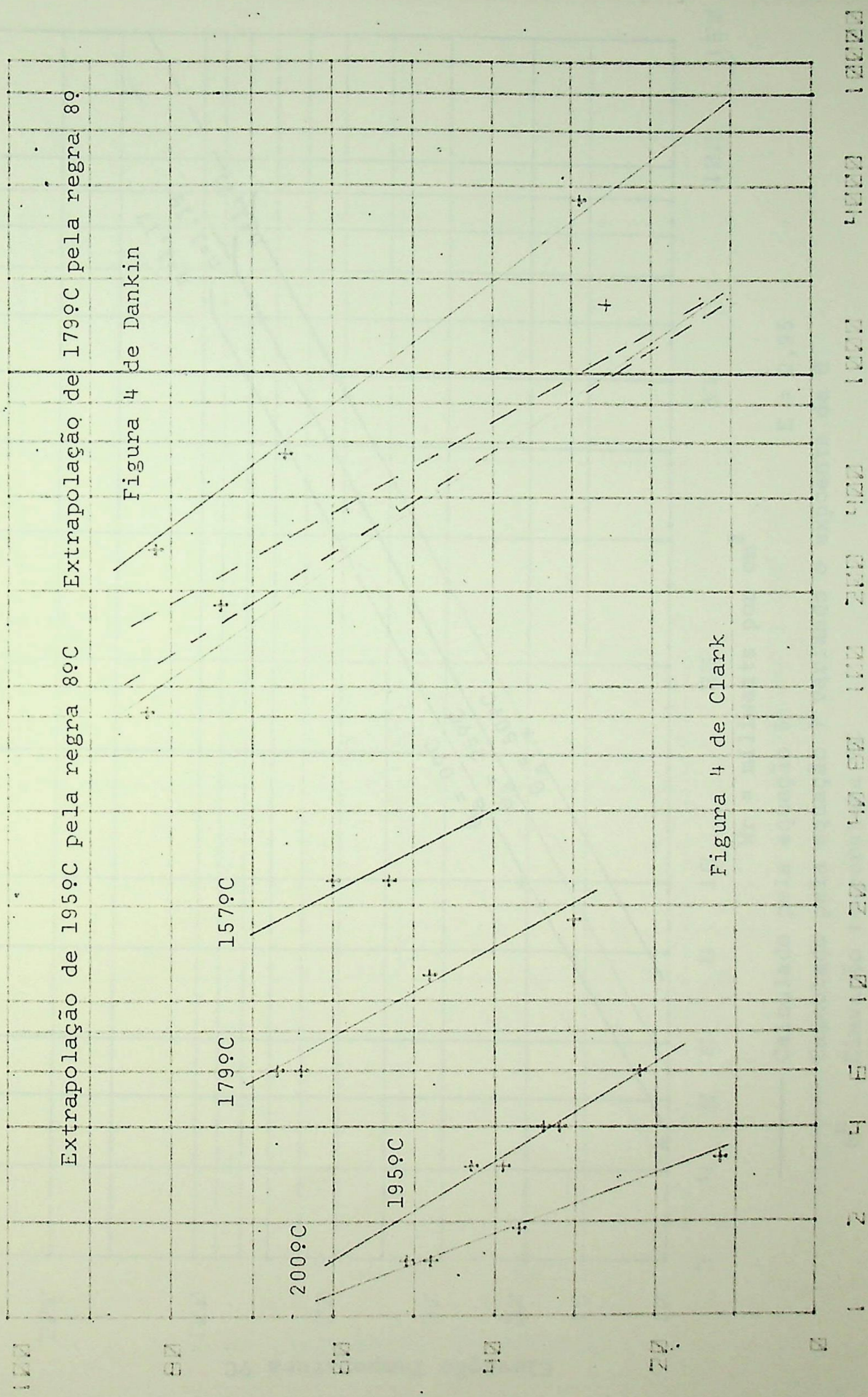


Envelhecimento do isolamento em óleo, superfície em contacto com oxigênio



Envelhecimento do isolamento no óleo, superfície em contacto com o Nitrogênio

Elevação de Temperatura $^{\circ}\text{C}$, necessária para duplicar a deteriorização mecânica do isolamento de papel manilha em óleo.



Bobinas em Óleo (25 a 40°C), com dados de Clark e Dankin

Figura 2.5

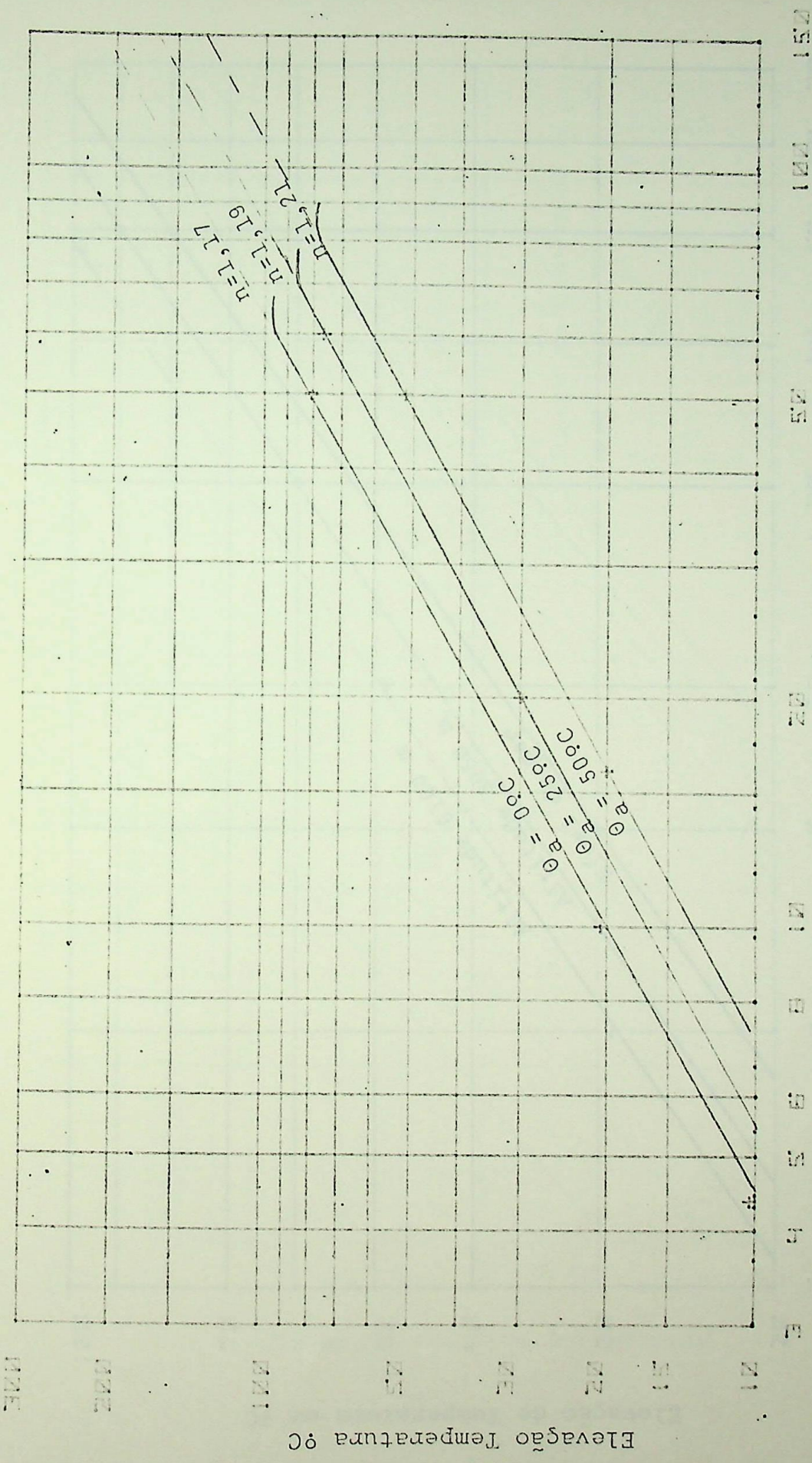
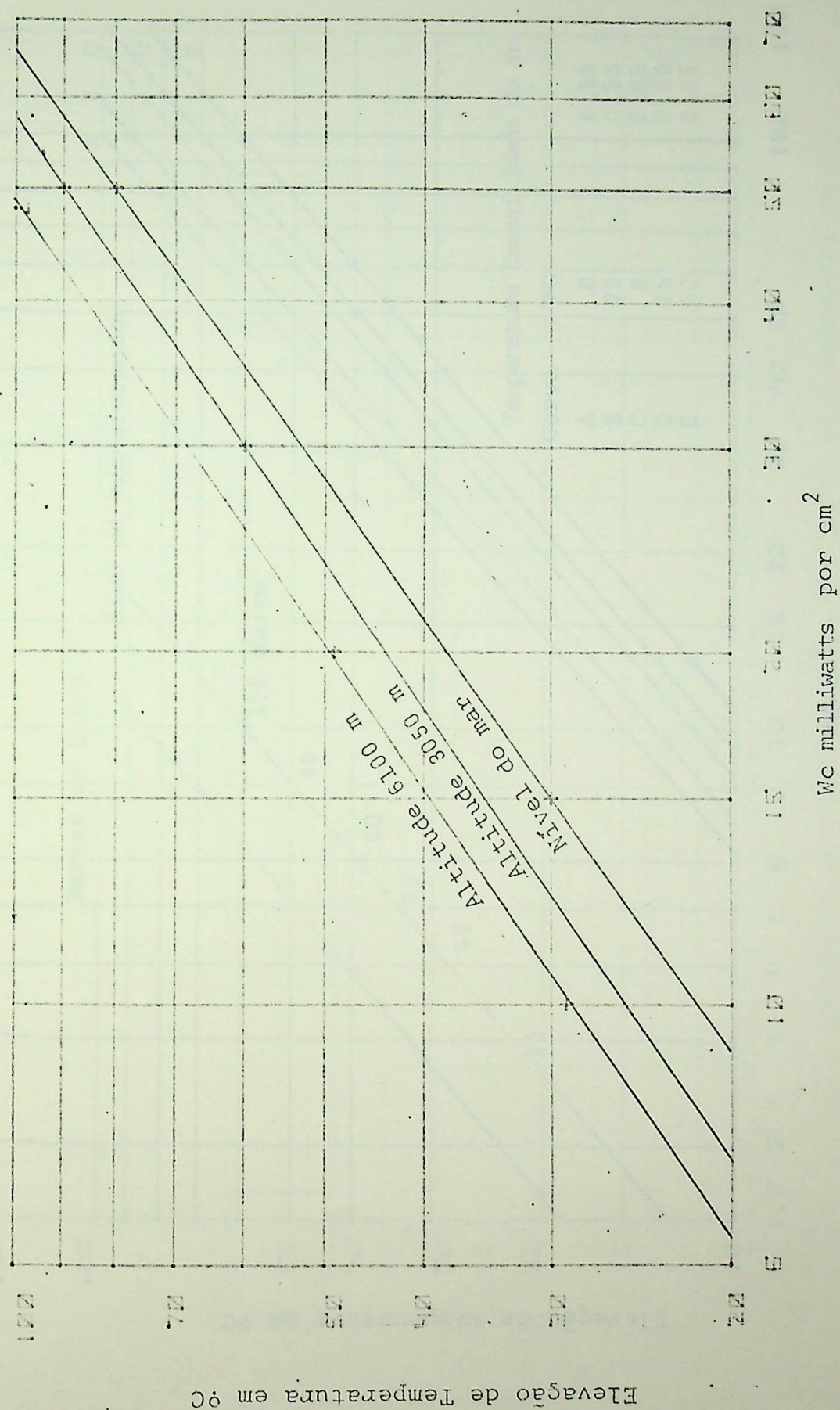
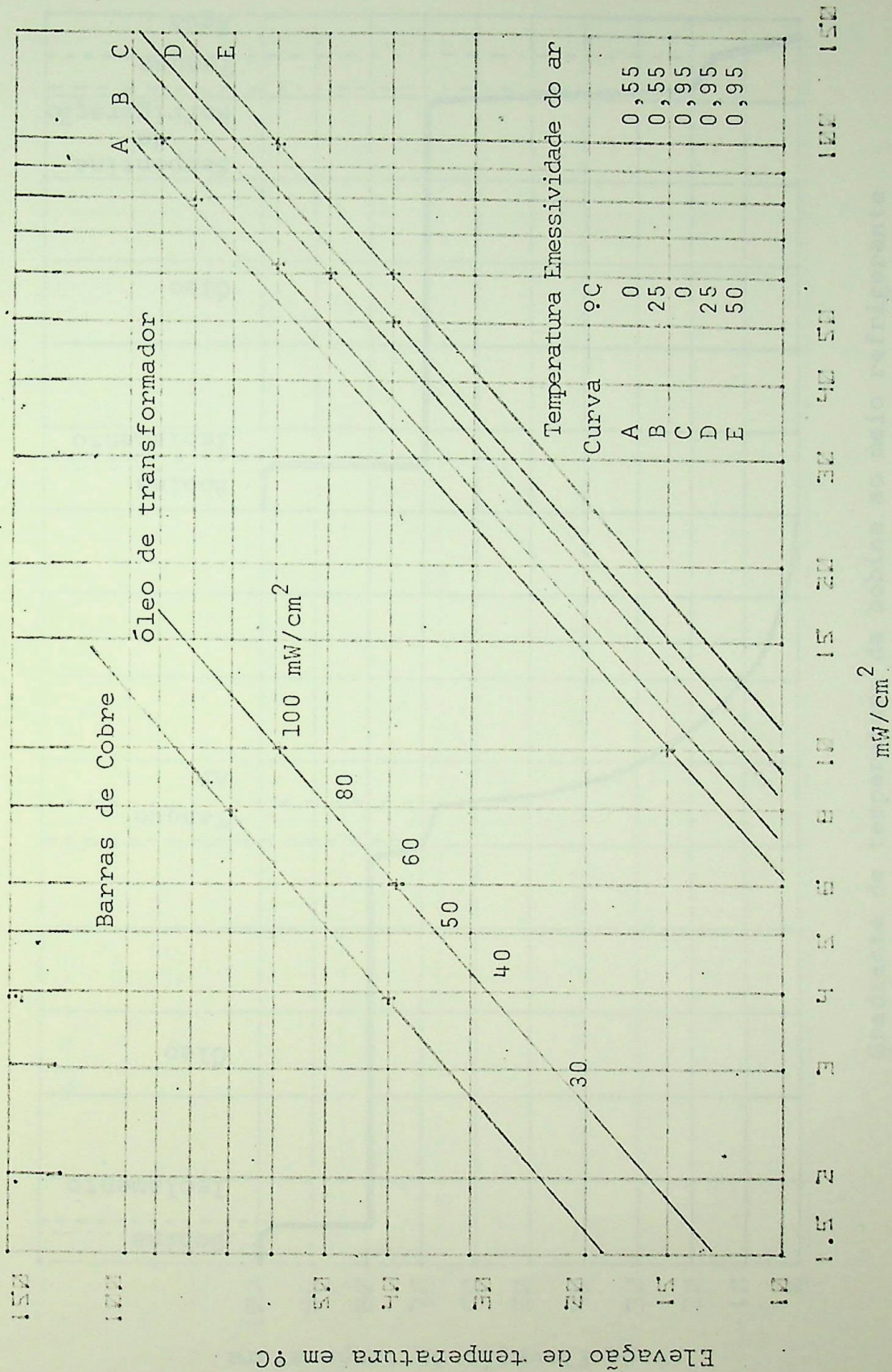


Figura 2.6



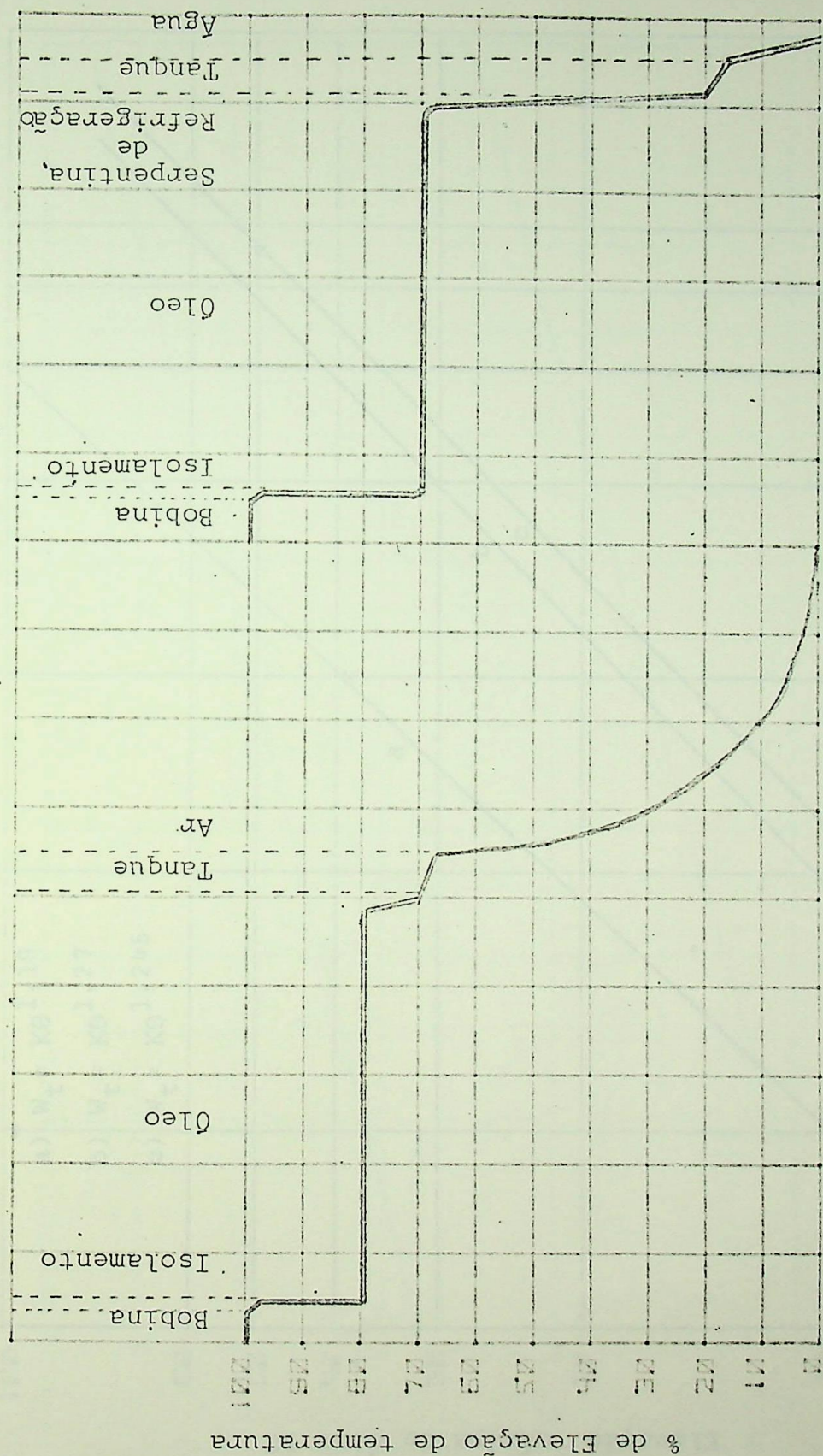
Transferência de Calor: por convecção em milliwatts por cm^2 de superfície

Figura 2.7



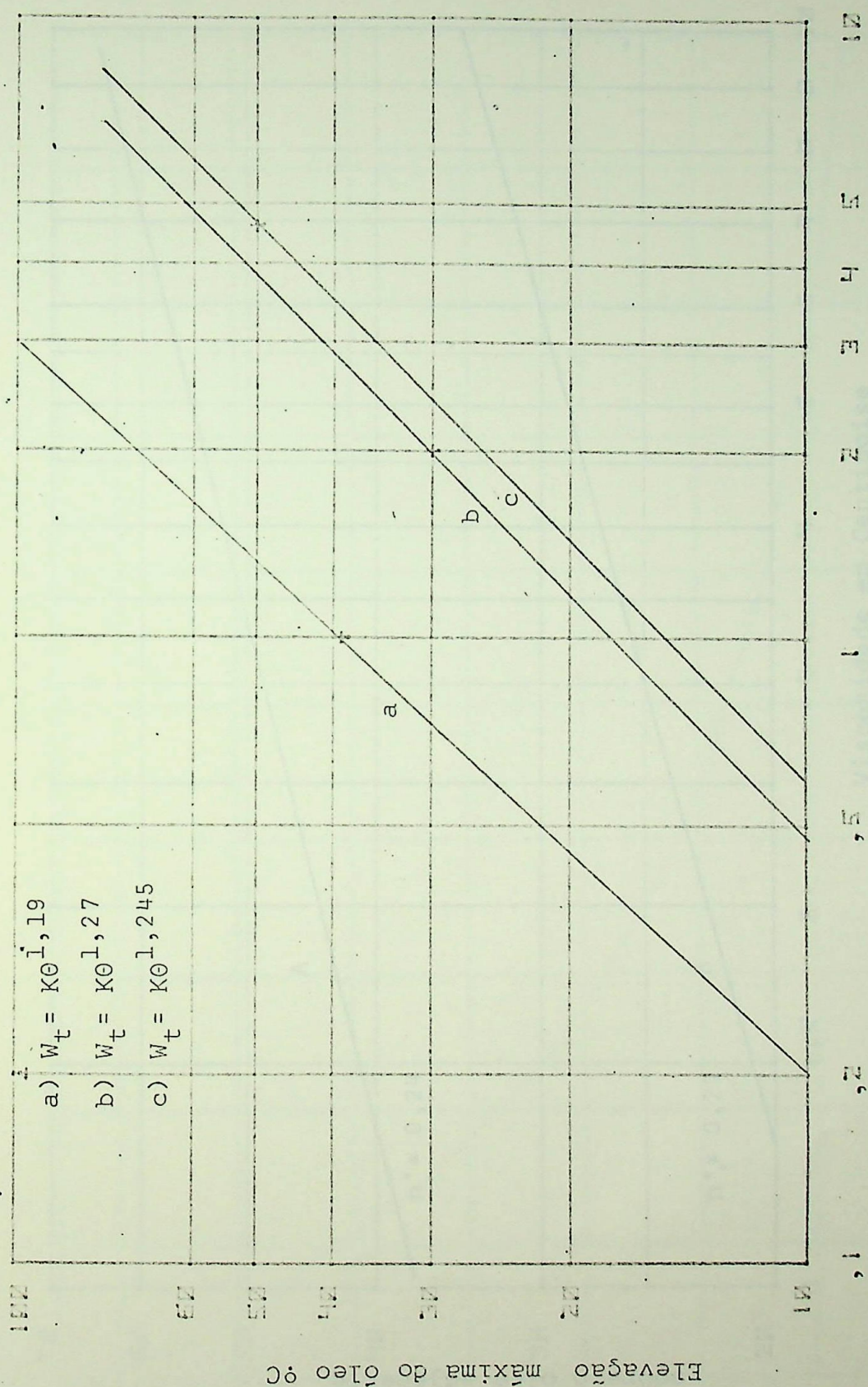
Transferência de calor por irradiação e convecção das superfícies verticais em função da elevação de temperatura, para três temperaturas ambientais e dois coeficientes de emissividade.

Figura 2.8



Gradiente de temperatura da bobina ao meio refrigerante

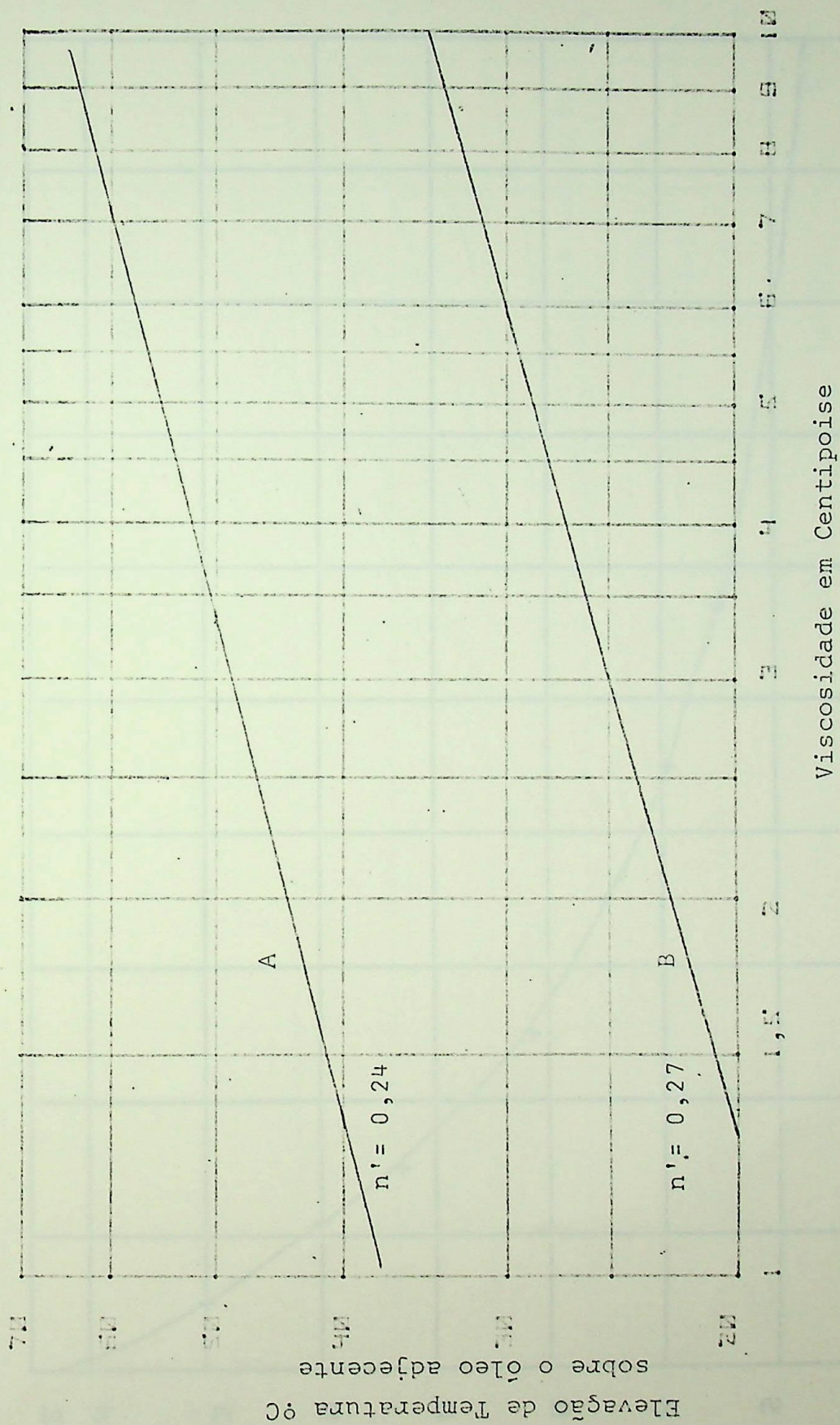
Figura 2.9



W_t Perdas Totais kW

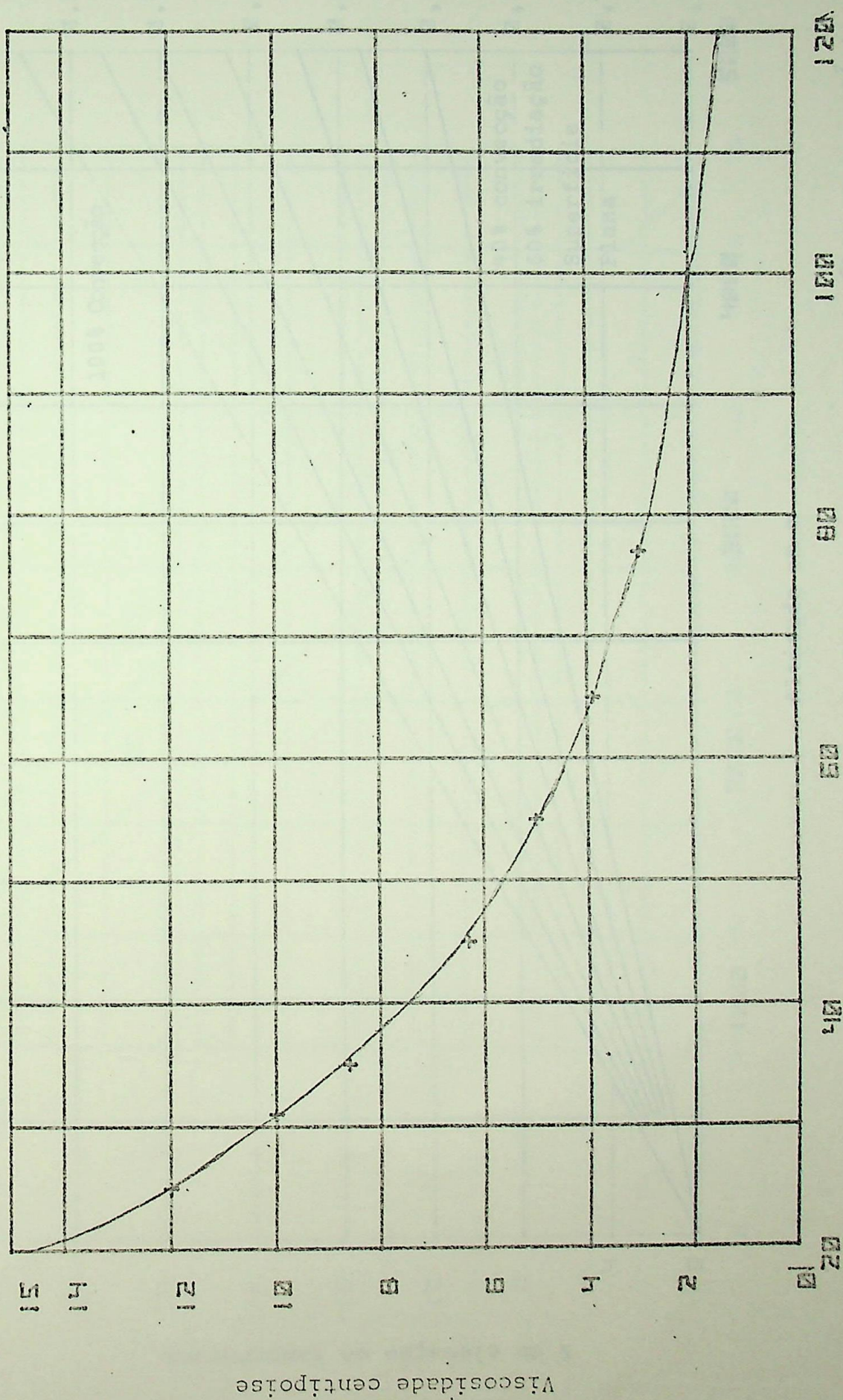
Variação da elevação da temperatura do topo do óleo, com as perdas em kW

Figura 2.10



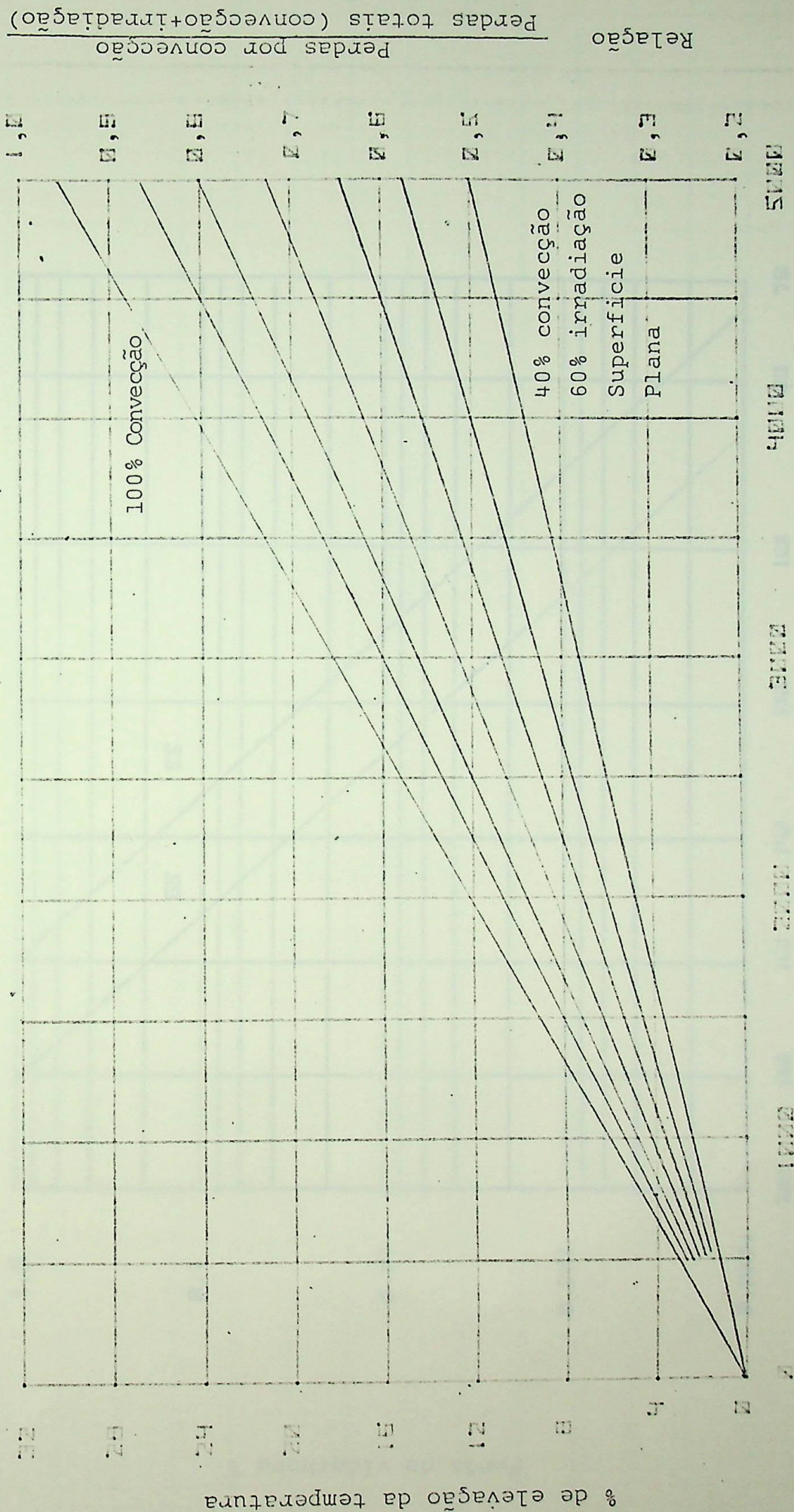
Elevação de temperatura para perdas constantes, com a modificação de viscosidade do óleo.

Figura 2.11



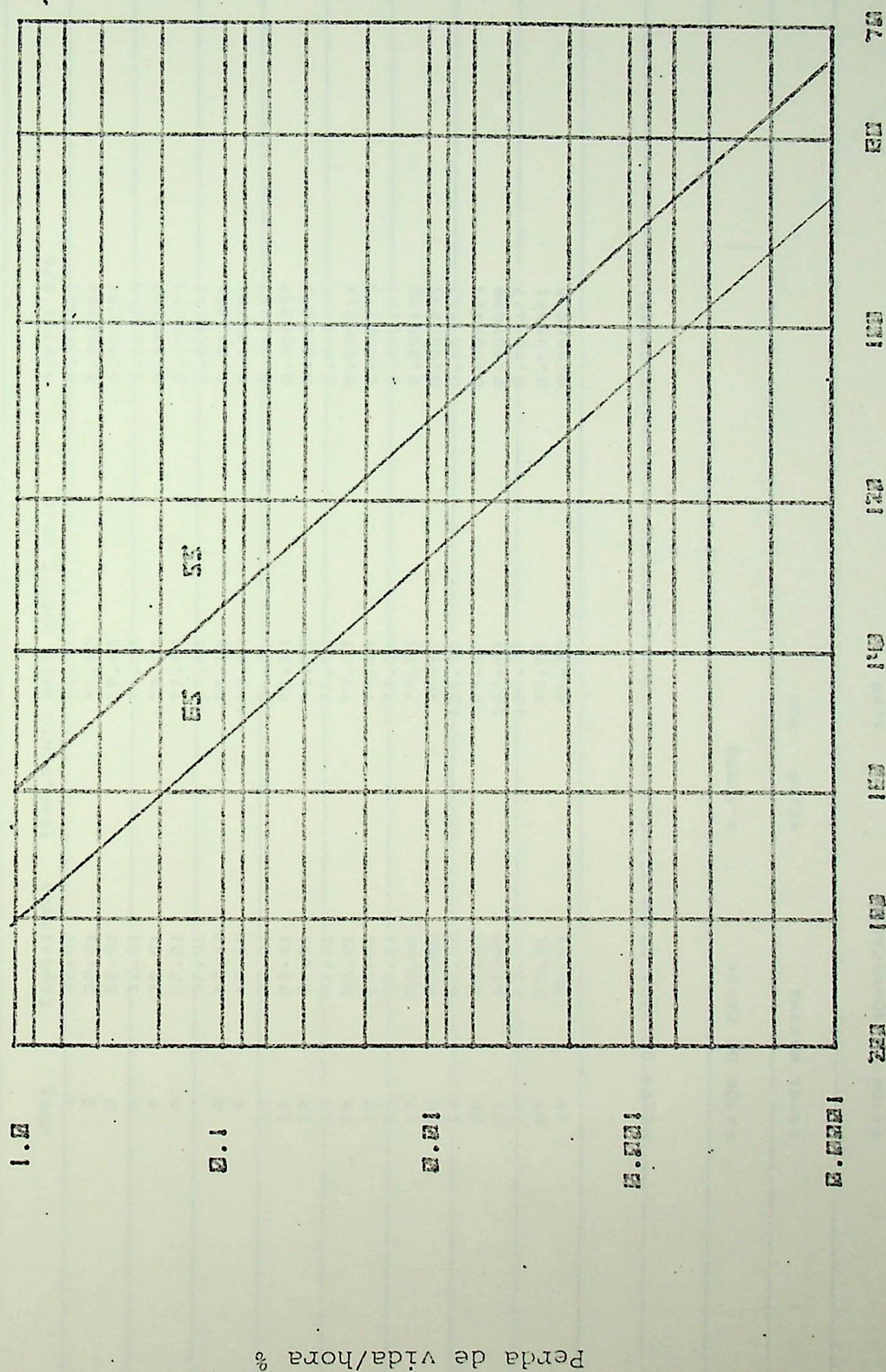
Efeito da temperatura na viscosidade do óleo 10C

Figura 2.11-A



Efeito da altitude na elevação de temperatura do topo do óleo ou superfície do tanque.

Figura 2.12



Temperatura do ponto mais quente em °C

Curvas de perda de vida utilizadas pela PJM

Figura 3.1

HORA	CARGA(MVA)	TEMP.PONTO MAIS QUENTE GR.C	P.VIDA O/O
1	32.01	81.77	0.000302
2	32.01	80.42	0.000254
3	32.01	79.45	0.000224
4	32.01	78.75	0.000205
5	32.01	78.25	0.000192
6	32.01	77.89	0.000173
7	32.01	77.64	0.000177
8	42.68	98.16	0.002231
9	42.68	102.63	0.003734
10	32.01	84.86	0.000447
11	32.01	82.63	0.000337
12	32.01	81.03	0.000275
13	32.01	79.89	0.000239
14	32.01	79.07	0.000214
15	32.01	78.48	0.000198
16	32.01	78.06	0.000187
17	32.01	77.75	0.000180
18	42.68	98.25	0.002255
19	42.68	102.70	0.003762
20	42.68	105.93	0.005415
21	42.68	108.28	0.007028
22	42.68	109.08	0.008477
23	32.01	99.98	0.000941
24	32.01	86.30	0.000535

PERDA-DE-VIDA-EM-UM-DIA-0/0 0.037894

FATOR DE CARGA 0.82290

CARGA MAXIMA 42.68 MVA

FATOR DE SOBRECARGA 1.29

41 46 51 56 61 66 71 76 81 86 91 96 101 105 111 116 121 126 131 136 141

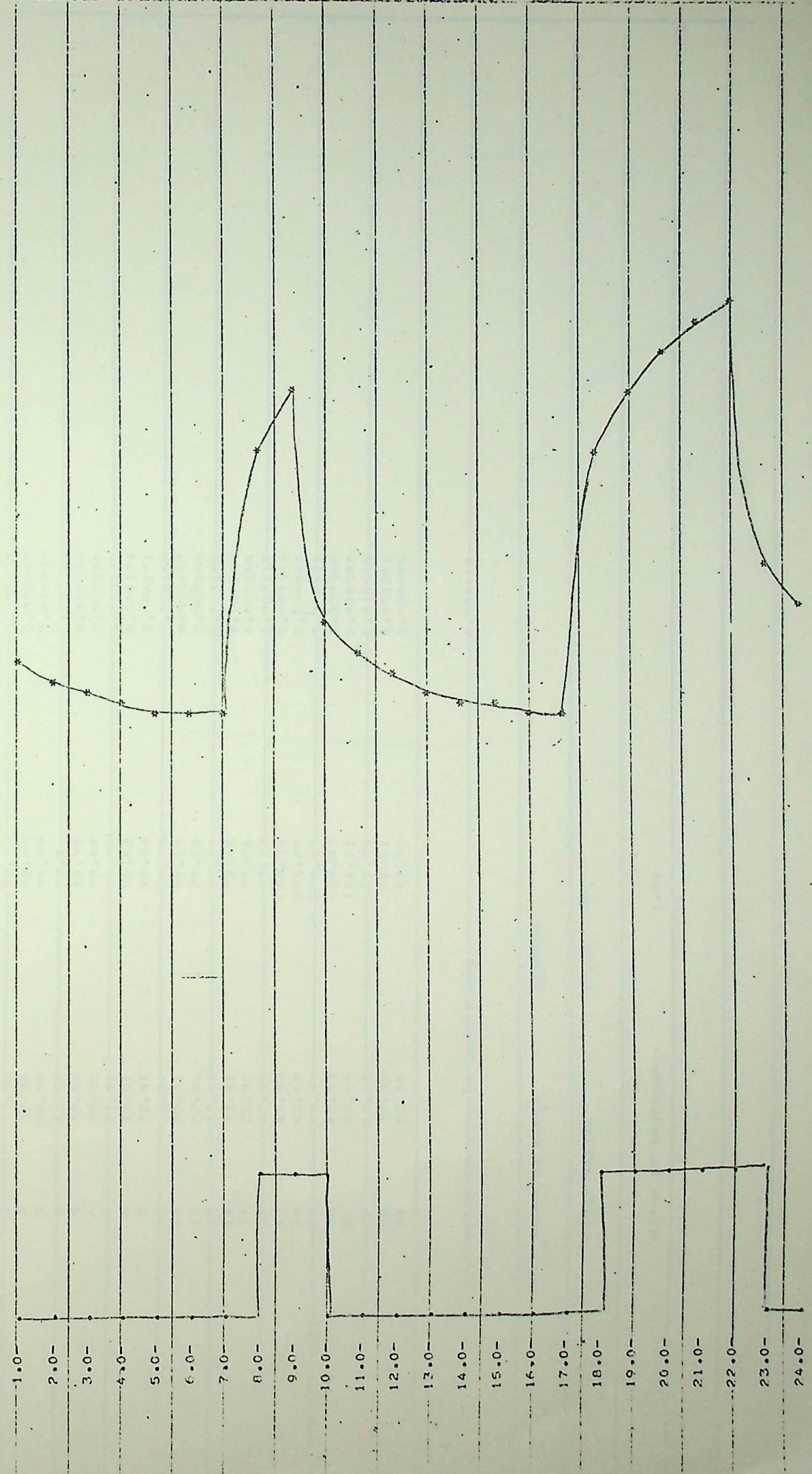


FIGURA 4.1B

HORA	CARGA (MVA)	TEMP. PONTO MAIS QUENTE GR.C	DEVIDA 0/0
1	32.01	82.30	0.000304
2	32.01	80.00	0.000267
3	32.01	79.72	0.000282
4	32.01	78.94	0.000210
5	32.01	78.79	0.000106
6	32.01	77.68	0.000166
7	32.01	77.71	0.000170
8	32.01	77.50	0.000174
9	32.01	77.76	0.000171
10	32.01	77.25	0.000140
11	32.01	77.18	0.000167
12	32.01	77.12	0.000166
13	32.01	77.00	0.000165
14	32.01	77.06	0.000164
15	32.01	77.04	0.000164
16	42.69	87.72	0.002110
17	42.69	102.31	0.003500
18	42.69	105.65	0.005047
19	42.69	108.07	0.006371
20	42.69	109.83	0.008340
21	42.69	111.11	0.009587
22	42.69	112.04	0.010604
23	32.01	91.41	0.001001
24	32.01	87.77	0.000609

DEVIDA DE VIDA EM TEMPERATURA 0/0 0.050310

FATOR DE CARGA 0.82270

CARGA MAXIMA 42.69 MVA

FATOR DE SOBRECARGA 1.29

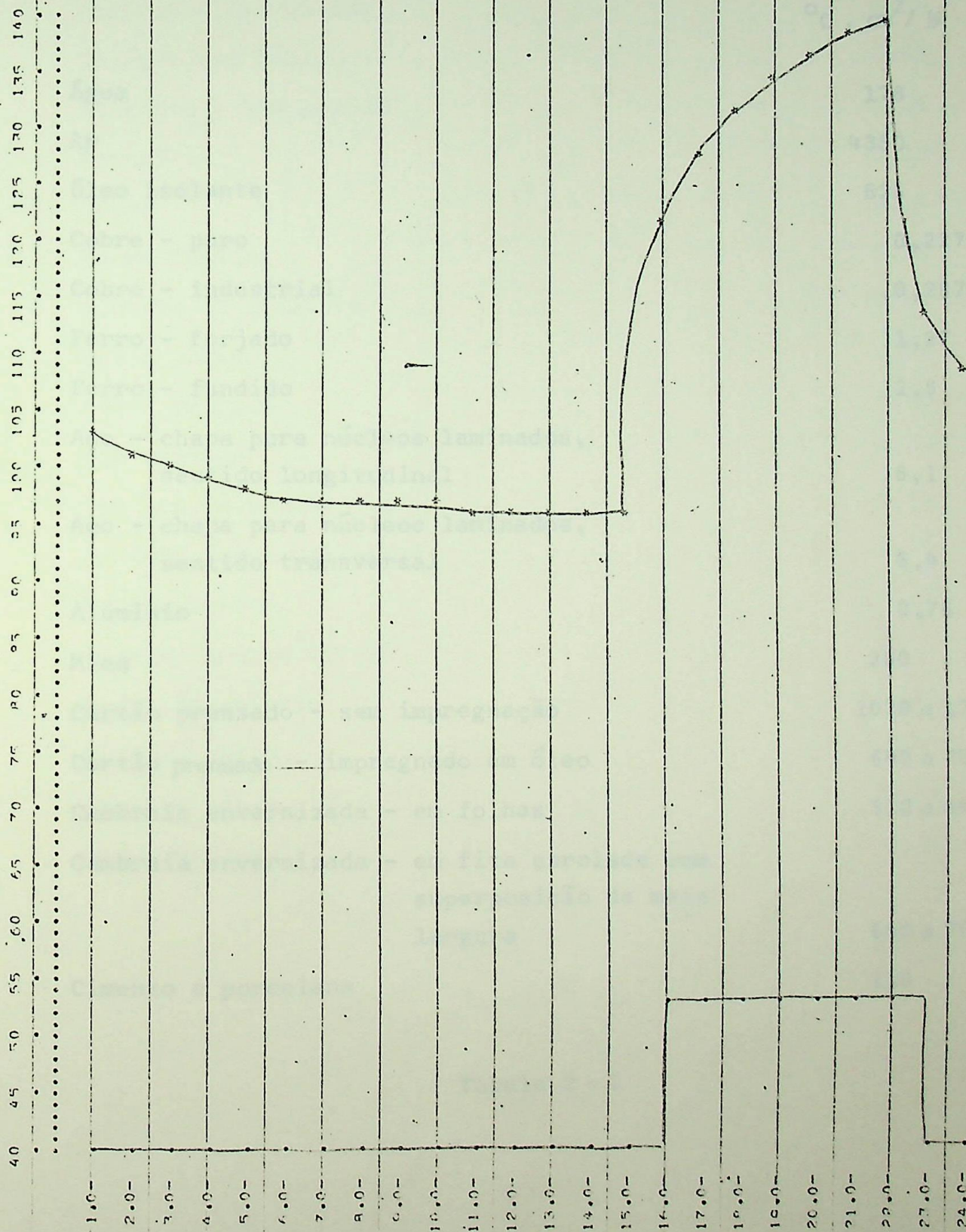


FIGURA 4.2B

Resistividade Térmica dos materiais utilizados nos transformadores

Material	Resistividade Térmica $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$
Água	178
Ar	4350
Óleo isolante	625
Cobre - puro	0,227
Cobre - industrial	0,287
Ferro - forjado	1,27
Ferro - fundido	2,5
Aço - chapa pura núcleos laminados, sentido longitudinal	6,1
Aço - chapa para núcleos laminados, sentido transversal	6,4
Aluminio	0,76
Mica	280
Cartão prensado - sem impregnação	1020 a 1270
Cartão prensado - impregnado em Óleo	640 a 765
Cambraia envernizada - em folhas	510 a 640
Cambraia envernizada - em fita enrolada com superposição de meia largura	640 a 765
Cimento e porcelana	110

Tabela 2 - I

Irradiação Total a Baixas Temperaturas

Prata - bem polida	0,02
Platina - bem polida	0,05
Zinco - bem polido	0,05
Alumínio - bem polido	0,05
Níquel	0,12
Cobre	0,15
Ferro fundido	0,25
Pintura de alumínio	0,55
Latão polido	0,60
Cobre oxidado	0,60
Aço oxidado	0,70
Pintura de bronze	0,80
Pintura negra brilhante	0,90
Vêniz branco	0,95
Esmalte branco, vítreo	0,95
Papel de amianto	0,95
Pintura verde	0,95
Pintura cinza	0,95
Negro de fumo	0,95

Tabela 2 II

Watts Irrradiados por uma Superfície de 1 cm^2 $E=0,95$

Aumento Temperatura	Temperatura ambiente 0°C		Temperatura ambiente 25°C		Temperatura ambiente 50°C	
Em $^{\circ}\text{C}$	Equação 6	Equação 7	Equação 6	Equação 7	Equação 6	Equação 7
10	0,00457	0,00422	0,0055	0,00536	0,00673	0,0067
20	0,00976	0,00984	0,0126	0,01256	0,01595	0,0153
40	0,02196	0,0220	0,0281	0,0281	0,0355	0,0341
60	0,03673	0,0359	0,0462	0,0459	0,0569	0,0558
80	0,05394	0,0522	0,0685	0,0666	0,0848	0,0809
100	0,07517	0,0651	0,0941	0,0829	0,1147	0,1007

Tabela 2 - III

MUDANÇA DA PRESSÃO BARAMÉTRICA COM A ALTITUDE

Altura Acima do Nível do Mar	Densidade do Ar Temperatura 25°C cm Hg	Relativa
0	760	1,00
610	706	0,93
1219	655	0,861
1829	608	0,800
2438	564	0,742
3048	520	0,684
3658	483	0,636
4267	445	0,586

TABELA 2-IV

Efeito da Velocidade do Vento sobre a Elevação de Temperatura em Grandes Transformadores Auto Ventilados

Velocidade Vento	Elevação de Temperatura do Topo do Óleo em por cento da Elevação no Ar Parado
km/h	
0	100
3	80
6	50
13	30
19	25

TABELA 2-V

Transmissão de Calor por Superfícies Planas Verticais em
Ambiente a 25°C W/cm²

Elevação de Temperatura °C	Irradiação E=0,95 Equação (7)	Convecção ao Nível do Mar Equação (9)	Total(Irradiação + Convecção) Equação (10)
10	0,0055	0,00388	0,0094
20	0,0125	0,00922	0,0217
30	0,0201	0,0153	0,0355
40	0,0280	0,0217	0,0498
50	0,0372	0,0287	0,0659
60	0,0462	0,0364	0,0826
70	0,0552	0,0440	0,0998

TABELA 2-VI

Distribuição de Temperatura para bobinas horizontais, com termopares colocados abaixo dos distanciadores entre espiras das bobinas mais próximas às bobinas superiores.

Temperatura aproximada do óleo	W/cm ²	Temperatura do ponto mais quente	Temperatura do óleo adjacente	Temperatura média, película de óleo	Viscosidade do óleo μ centipoise	Elevação máxima de temperatura sobre o óleo °C	
						Calculada	Medida
25	0,0475	38,5	24,7	30,0	10,15	13,4	13,8
25	0,151	54,2	23,1	34,0	8,95	30,9	31,1
25	0,291	71,8	25,3	42,2	7,0	47,5	46,5
25	0,662	106,0	27,2	54,0	5,02	81,0	79,1
34	0,048	47,0	30,7	39,7	7,5	12,8	12,8
34	0,139	60,0	31,7	41,3	7,2	28,4	28,2
34	0,291	80,2	34,1	50,5	5,6	46,0	46,0
34	0,646	110,9	34,0	60,0	4,3	78,2	76,9
45	0,051	56,6	44,6	48,6	5,8	12,3	12,0
45	0,148	70,0	44,0	53,6	5,1	26,4	26,0
45	0,307	87,7	44,1	59,3	4,4	44,0	43,6
45	0,688	119,3	45,3	70,6	3,48	76,0	74,1
75	0,056	85,6	74,5	78,6	2,85	11,0	11,1
75	0,161	97,0	97,0	81,7	2,70	24,0	24,0
75	0,333	115,4	75,1	80,0	2,35	40,2	40,3
75	0,746	148,8	76,3	100,0	2,0	70,5	72,5
100	0,060	108,5	98,4	102,5	1,9	10,5	10,1
100	0,172	121,6	98,9	106,9	1,75	22,7	22,7
100	0,355	139,2	100,2	113,6	1,6	38,2	39,0
100	0,783	168,8	100,9	125,0	1,25	64,5	67,9

TABELA 2 - VII

Capacidades (kVA) relativas em função da temperatura ambiente, que produzem uma temperatura máxima de 95°C .

Relação entre as perdas no cobre e no ferro	2:1			3:1			5:1		
Elevação máxima temperatura no óleo	35	40	45	35	40	45	35	40	45
Elevação de temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura máxima do óleo	30	25	20	30	25	20	40	25	20
Temperatura ambiente $^{\circ}\text{C}$	% kVA, calculados segundo a equação(18)								
50	74	73	72	75	75	75	77	77	77
40	88	87,5	87	89	89	89	89	89	88,5
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	111	111,5	112	110	110,5	110	110	110	110
10	122	122,5	123	121	121,5	122	120	120,5	121
0	132	133	134	130	131	132	129	129,5	130
- 10	141,5	142,5	143,5	138	139	140	138	138,5	130

Tabela 2 VIII

Comparação entre a elevação da temperatura em transformadores de 25 kVA colocados a sombra, tanque liso, pintado de cor escura e tinta a base de alumínio. Temperatura ambiente 26°C.

Transformador nº	Elevação de temperatura do óleo na parte superior em °C.		Elevação máxima de temperatura da superfície do tanque em °C.	
	escura	Alumínio	escura	Alumínio
1	37,2	46,3	32,5	41,0
2	36,7	47,6	32,0	41,6
Média	37,0	47,0	32,3	41,3
Porcentagem	78,5	100,0	78,5	100,0

Tabela 2 IX

Sobrecarga Suportável por um Transformador Específico

Duração da Sobrecarga	Fator da Sobrecarga	P. Vida Admissível por dia %
6 meses	1,49	0,1154
1 mês	1,59	0,4544
1 semana	1,62	0,7000
1 dia	Impossível*	1,500
Normal	1,40	0,0369

* No caso, não foi possível utilizar esta sobrecarga, pois com um fator de sobrecarga de 1,67 o transformador ultrapassou os valores indicados no item 3.5.

Tabela 4-I

Verificação da Sensibilidade do Fator de Sobrecarga
aos dados de um transformador

Fator Sobrecarga	Volume Óleo %		Peso do Tanque %		Peso Parte Ativa %		Temperatura Óleo %		Relação Perdas %		Perdas Ple na Carga %		Temperatura Ambiente %	
	110	90	110	90	110	90	110	90	110	90	110	90	110	90
	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,41	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,37	1,43

Tabela 4.II

...

[illegible]

RECEIVED OPTIONS: REPORT: NAME: 7-77

OPTION: 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 841. 842. 843. 844. 845. 846. 847. 848. 849. 850. 851. 852. 853. 854. 855. 856. 857. 858. 859. 860. 861. 862. 863. 864. 865. 866. 867. 868. 869. 870. 871. 872. 873. 874. 875. 876. 877. 878. 879. 880. 881. 882. 883. 884. 885. 886. 887. 888. 889. 890. 891. 892. 893. 894. 895. 896. 897. 898. 899. 900. 901. 902. 903. 904. 905. 906. 907. 908. 909. 910. 911. 912. 913. 914. 915. 916. 917. 918. 919. 920. 921. 922. 923. 924. 925. 926. 927. 928. 929. 930. 931. 932. 933. 934. 935. 936. 937. 938. 939. 940. 941. 942. 943. 944. 945. 946. 947. 948. 949. 950. 951. 952. 953. 954. 955. 956. 957. 958. 959. 960. 961. 962. 963. 964. 965. 966. 967. 968. 969. 970. 971. 972. 973. 974. 975. 976. 977. 978. 979. 980. 981. 982. 983. 984. 985. 986. 987. 988. 989. 990. 991. 992. 993. 994. 995. 996. 997. 998. 999. 1000.

FUNCTION PVICAR(TEMP,ITMP)

TESTA LIMITED BY 1E+00

IF (ITMP.GT. 0) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

5020 IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

IF (TEMP.GT. 1E+00) GO TO 5010

SOURCE STATEMENT LABELS

LABEL ISN ADDR

5010 14 000100

5020 21 000100

5030 21 000100

5040 21 000100

5050 21 000100

5060 21 000100

5070 21 000100

5080 21 000100

5090 21 000100

5100 21 000100

5110 21 000100

5120 21 000100

5130 21 000100

5140 21 000100

5150 21 000100

5160 21 000100

5170 21 000100

5180 21 000100

5190 21 000100

5200 21 000100

5210 21 000100

5220 21 000100

5230 21 000100

5240 21 000100

5250 21 000100

5260 21 000100

5270 21 000100

5280 21 000100

5290 21 000100

5300 21 000100

COMPILES GENERATED LABELS

LABEL ISN ADDR

5010 14 000100

5020 21 000100

5030 21 000100

5040 21 000100

5050 21 000100

5060 21 000100

5070 21 000100

5080 21 000100

5090 21 000100

5100 21 000100

5110 21 000100

5120 21 000100

5130 21 000100

5140 21 000100

5150 21 000100

5160 21 000100

5170 21 000100

5180 21 000100

5190 21 000100

5200 21 000100

5210 21 000100

5220 21 000100

5230 21 000100

5240 21 000100

5250 21 000100

5260 21 000100

5270 21 000100

5280 21 000100

5290 21 000100

5300 21 000100

NAME

TEMP

ISN

ADDR

TYPE

ADD.

NAME

TEMP

ISN

ADDR

TYPE

ADD.

NAME

TEMP

ISN

ADDR

TYPE

ADD.

NAME

TEMP

ISN

ADDR

TYPE

ADD.

NAME

TEMP

ISN

ADDR

TYPE

ADD.

NAME

TEMP

NAME

TEMP

POTENCIA NOMINAL . 33.000 MVA
 DEFESA PASSIVA ATIVA 33370.00 KG
 DEFESA TANGUE 5491.00 KG
 VOLUME DE CILINDRO 22700.00 L

EXATIDÃO DOS TESTES

ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LÍQUIDO SOBRE O AMBIENTE 31.00 GR.C
 ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LÍQUIDO PARA TEMPERATURA AMBIENTE 31.00 GR.C
 PERDAS A PLENA CARGA 208.37 KW
 ELEVACAO MÍNIMA DE TEMPERATURA DO ENROLAMENTO 40.30 GR.C

*** TEMPERATURA AMBIENTE 30.00 GR.C ***

***** RESULTADOS GUT1005 *****

HORA	CARGA (MVA)	TEMP. PUNTO	MAIS QUENTE	GR.C	P. VIDA 0/0
1	32.02	90.08	90.08		0.000031
2	32.02	90.57	90.57		0.0000340
3	32.02	90.72	90.72		0.000037
4	32.02	90.72	90.72		0.0000391
5	32.02	90.72	90.72		0.000045
6	32.02	90.72	90.72		0.0000455
7	32.02	90.72	90.72		0.0000455
8	32.02	90.72	90.72		0.0000455
9	32.02	90.72	90.72		0.0000455
10	32.02	90.72	90.72		0.0000455
11	32.02	90.72	90.72		0.0000455
12	32.02	90.72	90.72		0.0000455
13	32.02	90.72	90.72		0.0000455
14	32.02	90.72	90.72		0.0000455
15	32.02	90.72	90.72		0.0000455
16	32.02	90.72	90.72		0.0000455
17	32.02	90.72	90.72		0.0000455
18	32.02	90.72	90.72		0.0000455
19	32.02	90.72	90.72		0.0000455
20	32.02	90.72	90.72		0.0000455
21	32.02	90.72	90.72		0.0000455
22	32.02	90.72	90.72		0.0000455
23	32.02	90.72	90.72		0.0000455
24	32.02	90.72	90.72		0.0000455

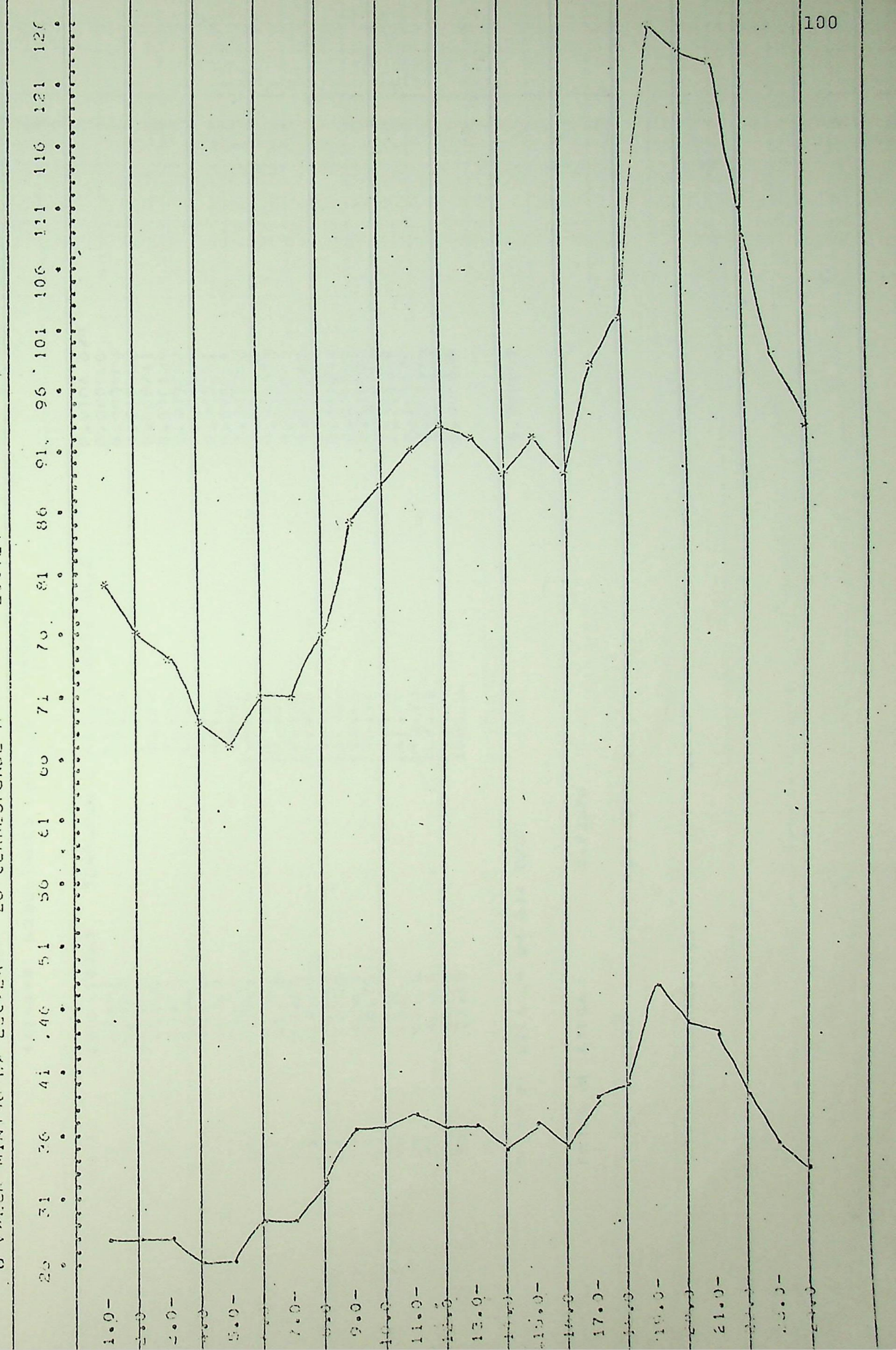
0.661921

DEBIDA DE VIEA EM UM DIA 0/0

FATOR DE CARGA 0.73373

CARGA MAXIMA 5540 MVA

CARGA DE SELECCAO 1000



HORA	CARGA (KVA)	TEMP. PUNTO MAIS QUENTE GR.C	P. VIDA O/O
1	32.27	91.07	0.000900
2	34.27	97.19	0.000605
3	37.17	97.58	0.000632
4	39.96	79.98	0.000211
5	39.96	76.84	0.000199
6	33.08	81.23	0.000262
7	33.08	81.23	0.000262
8	30.64	86.59	0.000551
9	41.04	97.07	0.001869
10	41.04	100.39	0.002762
11	42.04	107.52	0.003677
12	41.01	105.07	0.005177
13	41.04	100.51	0.005166
14	33.90	101.51	0.003969
15	41.04	100.54	0.004124
16	30.60	101.59	0.003232
17	43.62	111.49	0.006690
18	44.75	110.18	0.016522
19	32.82	102.04	0.003611
20	39.08	141.79	0.211042
21	49.00	140.73	0.191170
22	43.02	127.20	0.091470
23	30.52	113.00	0.016549
24	37.15	100.43	0.005650

0.700297

CARGA DE VILA EM UM DIA O/O.

FACTOR DE CARGA

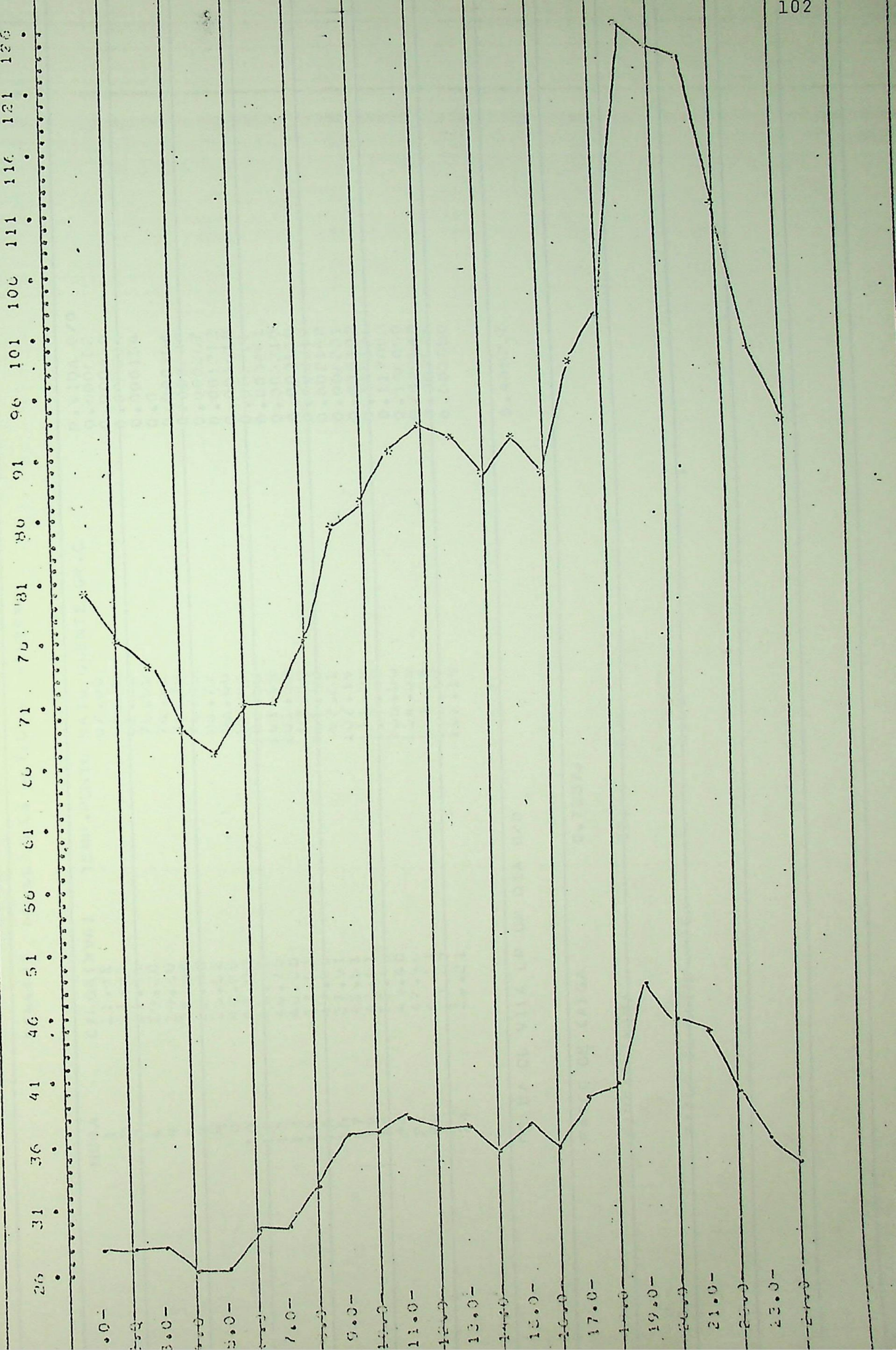
0.73573

CARGA MAXIMA

33.02 KVA

FACTOR DE SOBRECARGA

1.03



HORA	CARGA (NVA)	TEMP. PUNTO	MAIS QUENTE GR.C	P. VIDA 0/0
1	31.45	97.90	97.90	0.000032
2	31.45	94.90	94.90	0.000420
3	31.45	91.92	91.92	0.000294
4	29.40	70.95	70.95	0.000154
5	29.40	74.92	74.92	0.0
6	32.90	70.70	70.70	0.000204
7	32.90	70.95	70.95	0.000204
8	29.42	83.72	83.72	0.000107
9	40.00	93.66	93.66	0.001312
10	40.00	90.41	90.41	0.001718
11	40.00	100.99	100.99	0.002222
12	40.75	101.92	101.92	0.003441
13	40.00	101.93	101.93	0.003310
14	37.91	97.90	97.90	0.002139
15	40.00	101.99	101.99	0.003317
16	37.91	97.91	97.91	0.002142
17	42.91	107.19	107.19	0.006231
18	43.01	111.99	111.99	0.010102
19	43.42	107.90	107.90	0.042194
20	40.40	135.99	135.99	0.117006
21	47.90	134.99	134.99	0.106060
22	42.91	121.94	121.94	0.020840
23	37.97	100.99	100.99	0.007986
24	35.21	102.19	102.19	0.003650

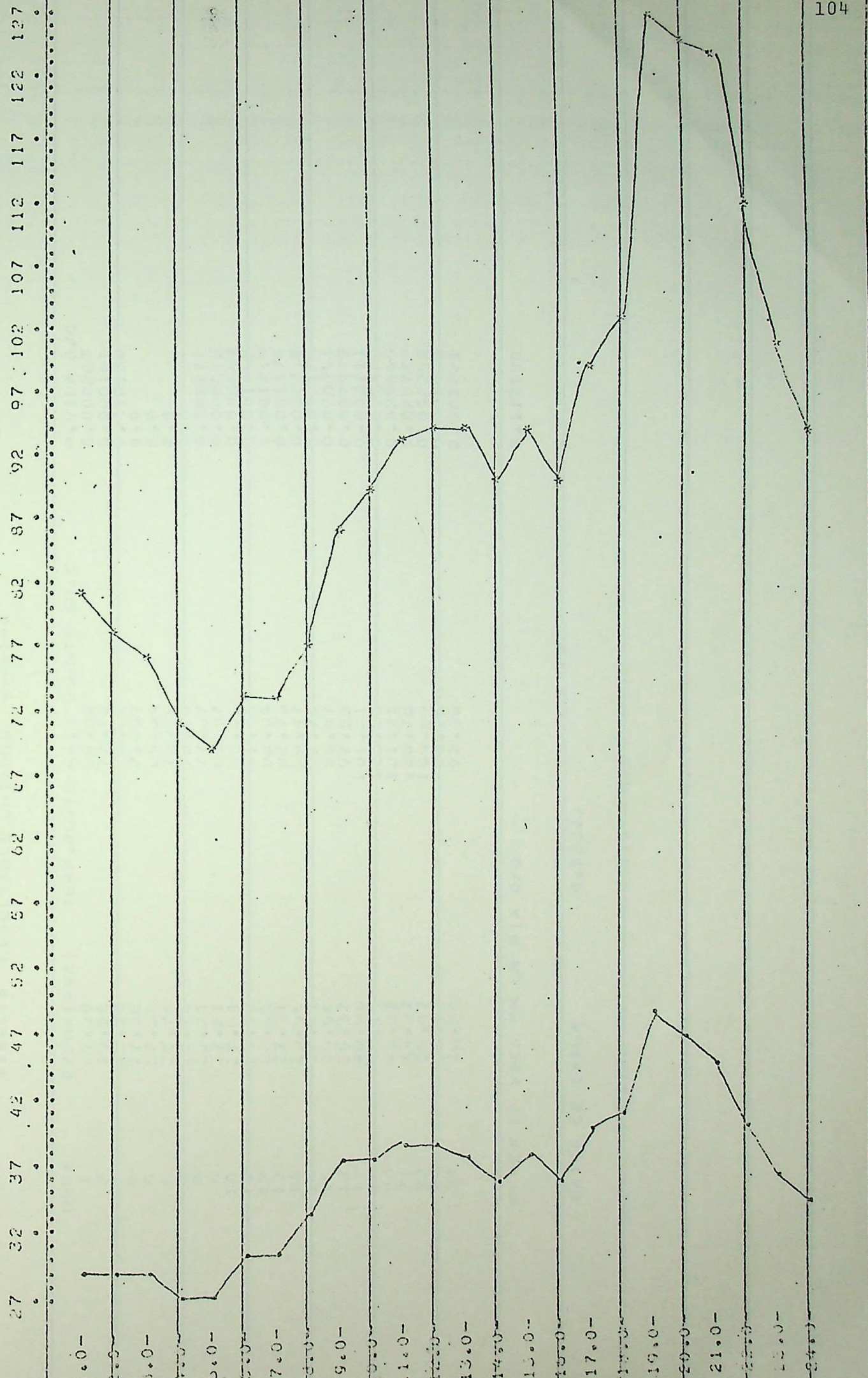
0.445236

PEÇA DE VILA EM UM DIA 0/0

FATOR DE CARGA 0.73573

CARGA MAXIMA 52.40 TON

FATOR DE SUPERFICIA 1.09



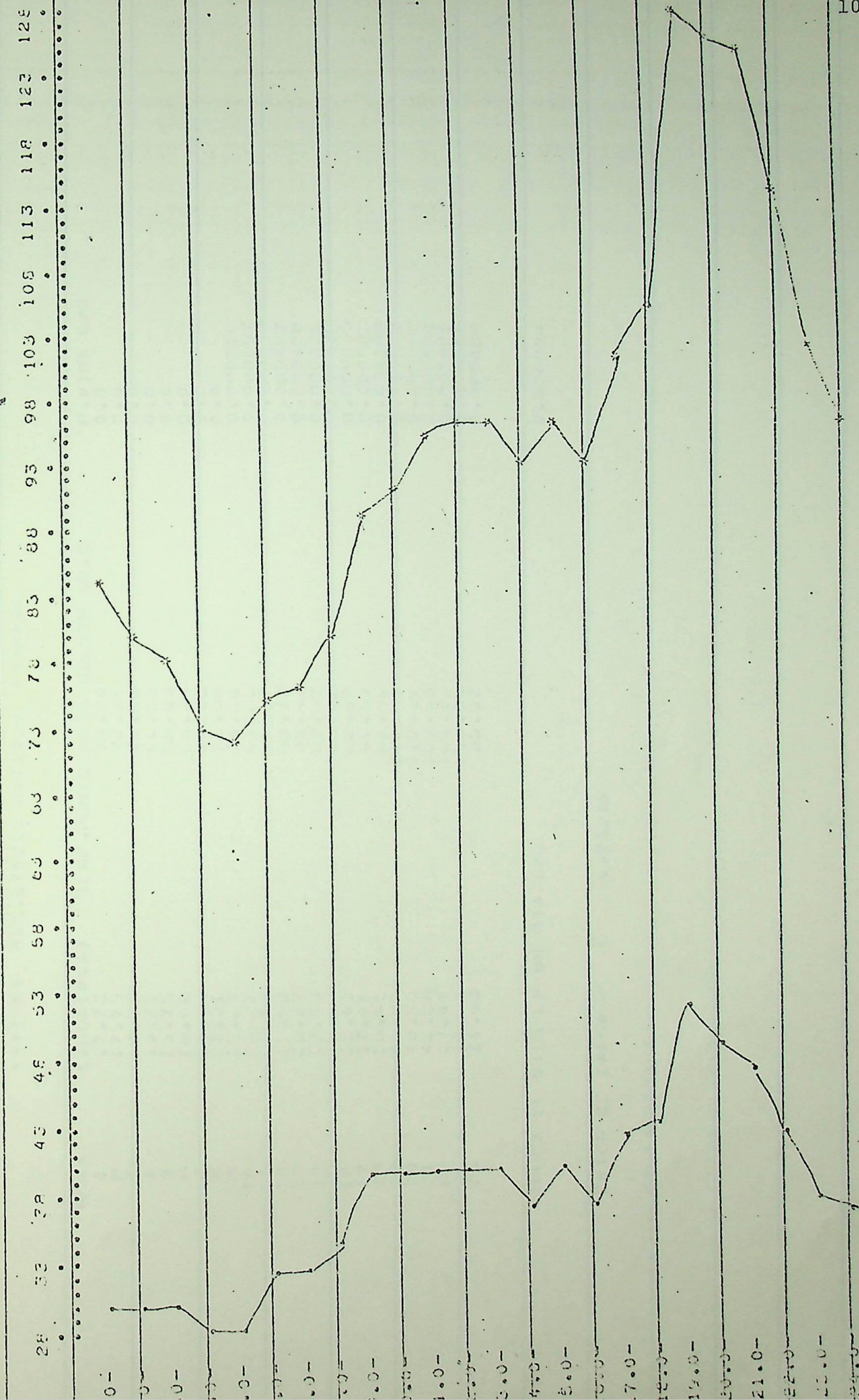
HORA	CARGA (NVA)	TEMP. PUNTO	FAIS QUENTE	GR.C	P. VIDA O/O
1	29.30		60.60		0.000267
2	30.50		77.76		0.000181
3	33.50		79.52		0.000130
4	37.38		71.07		0.0
5	37.58		69.54		0.0
6	38.76		72.99		0.0
7	38.76		73.14		0.0
8	39.51		77.57		0.000171
9	37.51		65.97		0.000514
10	37.51		68.53		0.000657
11	37.51		67.54		0.001055
12	38.51		93.04		0.001218
13	37.51		92.73		0.001174
14	39.50		89.47		0.000790
15	37.51		92.74		0.001175
16	39.50		89.47		0.000791
17	39.57		97.55		0.002077
18	40.90		101.51		0.003211
19	40.10		123.53		0.015435
20	40.52		121.71		0.028449
21	44.37		120.78		0.026773
22	39.87		109.59		0.009392
23	34.55		99.88		0.002438
24	33.56		93.00		0.001221

PERDA DE VIDA EM UM DIA O/O 0.117190

FATOR DE CARGA 0.73313

CARGA MAXIMA 45.19 NVA

FATOR DE SEGURANCA 1.49



HORA	CARGA (NVA)	TEMP. PUNTO	MAIS CUENTE GR.C	P.VIDA G/O
1	27.73		74.94	0.0
2	27.73		72.34	0.0
3	27.73		73.43	0.0
4	29.73		69.53	0.0
5	29.73		69.03	0.0
6	28.92		68.24	0.0
7	28.92		68.33	0.0
8	31.31		72.08	0.0
9	30.67		79.38	0.000234
10	30.67		61.53	0.000297
11	30.67		64.37	0.000227
12	30.93		65.70	0.000467
13	29.67		65.42	0.000460
14	30.43		62.37	0.000332
15	30.67		63.92	0.000473
16	30.43		62.37	0.000335
17	27.48		65.39	0.000603
18	28.43		62.35	0.001100
19	28.35		62.31	0.001047
20	29.03		60.33	0.000972
21	28.28		69.33	0.000000
22	27.48		68.13	0.002801
23	31.71		69.33	0.000303
24	31.93		65.37	0.000480

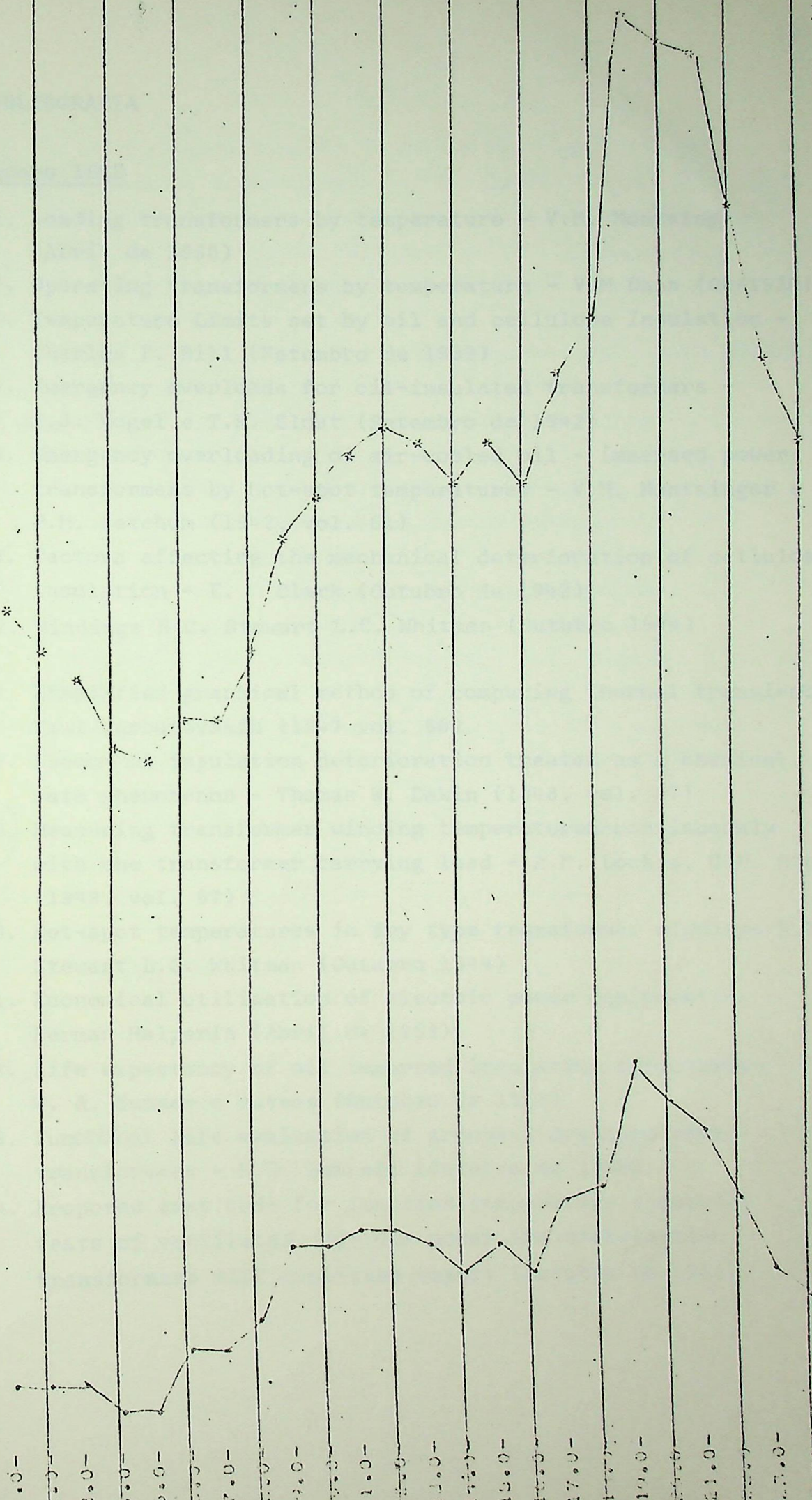
OFFER DE VILA LM UM DIA G/O 0.036804

FATOR DE CARGA 0.73373

CARGA MAXIMA 14.43 NVA

FATOR DE CORRECAO 1.40

130 125 120 115 110 105 100 95 90 85 80 75 70 65 60 55 50 45 40 35 30



BIBLIOGRAFIA

Papers IEEE

01. Loading transformers by temperature - V.M. Montsinger
(Abril de 1930)
02. Operating transformers by temperature - V.M Dann (04/1930)
03. Temperature Limits set by oil and cellulose Insulation -
Charles F. Hill (Setembro de 1939)
04. Emergency overloads for oil-insulated transformers -
F.J. Vogel e T.K. Sloat (Setembro de 1942)
05. Emergency overloading of air-cooled oil - immersed power
transformers by hot-spot temperatures - V.M. Montsinger e
P.M. Ketchum (1942, vol. 61)
06. Factors affecting the mechanical deterioration of cellulose
insulation - F. Clark (Outubro de 1942)
07. Windings H.C. Stewart L.C. Whitman (Outubro 1944)
08. Simplified graphical method of computing thermal transients -
Paul Narbutovskih (1947 vol. 66)
09. Electrical insulation deterioration treated as a chemical
rate phenomenon - Thomas W. Dakin (1948, vol. 67)
10. Measuring transformer winding temperatures continuously
with the transformer carrying load - A.M. Lockie, G.M. Stein
(1948, vol. 67)
10. Hot-spot temperatures in dry type transformer windings H.C.
Stewart L.C. Whitman (Outubro 1944)
11. Economical utilization of electric power equipment -
Herman Halperin (Abril de 1953).
12. Life expectancy of oil immersed insulation structures-
W. A. Summer e outros (Outubro de 1953)
13. Functional life evaluation of groupe-2 dry-type power
transformers - H.G. Zamhell (Outubro de 1955)
14. Proposed test code for function temperature endurance
tests of ventilated dry-type power and distribution
transformers AIEE committee report (Outubro de 1955):

- OK 15. Functional-Life expectancy tests for liquid filled distribution transformers - A.M. Lockie (Outubro de 1955)
- OK 16. Controlled temperature and insulation protection in the operation of power transformers - J.A. Klingensmith (04/56)
- ~~17.~~ Loading of sealed dry-type transformers - L.C. Whitman (Junho de 1957).
- ~~18.~~ Loading of ventilated dry-type transformers - L.C. Whitman (Dezembro de 1957)
- ~~19.~~ Unbalanced loading of 3-Phase Transformer Banks - Economics S.W. Andersen (Fevereiro de 1958)
- ~~20.~~ Effect of coil winding and processing on the electrical strength of oil-immersed insulating materials. - W.T. Sackett (Abril de 1958)..
- ~~21.~~ Mathematics of insulation - Aging calculations - L.C. Whitman (Setembro de 1959).
- ~~22.~~ Permalex, a new insulation system - M.F. Beavers e outros (Abril de 1960).
- ~~23.~~ Factors affecting the aging characteristics of various wire coating materials in transformer oil - Lipsey Juneau (Abril de 1960)
- ~~24.~~ Simplified methods of calculating insulation life characteristics - Whitman (Outubro de 1961)
- ~~25.~~ Controlled temperature and insulation protection in the operation of power transformers - F.B. Grace (12/1961).
- ~~26.~~ Effect of temperature and thermal aging on the electrical characteristics of film-type wire insulation in transformer oil - Beavers e Lipsey (Junho de 1962).
- OK 27. The constant and overload behavior of oil-filled transformers - H. Reber (Agosto de 1962)
- ~~28.~~ A new transformer insulation - Brummet (Fevereiro de 1963)
- ~~29.~~ Change of time constant with transformer load - Whitman (Fevereiro de 1963).
- OK 30. Transient temperature rise of transformers - Whitman - Holcomb (Fevereiro de 1963).

- OK
31. A Method of estimating the thermal life expectancy of distribution transformers - Robert Rood (Dezembro de 1963)
 - ✓ 32. Relative transformer aging obtained under ASA load-time recommendations when using different estimating procedures and aging curves - M.F. Beavers (Setembro de 1964).
 - ✓ 33. Evaluation of substation transformers loading using simulation techniques - J.P. Fitzgerald e outros (Abril de 1964)
 - ✓ 34. Loading guide for 65C rise distribution transformers - C.R. Acker (Setembro de 1964)
 35. Substation expansion reliability, and transformer loading policy analysis - Ossman e outros (Agosto de 1969).
 - ✓ 36. Oil - Immersed Power Transformer Overload Calculations by computer - John Black e outros (Agosto de 1969)
 37. An economic analysis of distribution transformer application- C.F. Mitchell e outros (Dezembro de 1959)
 38. Accelerated aging characteristics of formex and paper insulated wire in transformer oil - M.F. Beavers e outros (Dez. de 1959)
 39. Voltage stress as a factor in thermal evolution program for insulation systems in distribution transformers - M.F. Beavers e outros (Setembro de 1964).
 40. The relationship between summer weather and summer loads-A Regression Analysis - G.T. Henemann e outros (Novembro, 66)
 41. Determination of power transformer ratings for the Pennsylvania - New Jersey - Maryland Interconnection - R.R. Bast e outros (Agosto de 1971).
 42. Proposed Identification of the thermal endurance of transformers insulation systems - A.M. Loockie, C.J. McMillen (IEEE PES Summer Meeting Julho 1974)
 43. Methods of detecting abnormal hot-spots in transformers - IEEE Joint task force
 44. The combined effects of thermal Aging and Short-Circuit Stress on transformer life W.J. Nutt M.R. Patel PAS 95 (Julho/ Agosto 1976).
 45. A proposed functional life test model for power transformers W.J. Mc Nutt (Setembro/Outubro 1977).

Livros

46. Transformer Engineering - Blume, Boyajian, Camilli, Lennox, Minneci, Montsinger
47. Química um tratamento moderno - Pimentel e Spratley
48. Química Geral - Linus Pauling
49. The short - circuit strength of power transformers - M. Waters
50. Fundamentos de la teoria y del calculo de fiabilidade de elementos y dispositivos de automatizacion y tecnica del calculo - B. Sotskow
51. Centrales y redes electricas - Buchhold H. Happoldt
52. Electric Machinery - The dynamics and statics of electromechanical energy conversion - A.F. Fitzgerald e Charles Kingsley Jr.
53. Standard Handbook for Electrical Engineers - Archer F. Knowlton
54. Electrical Machines - M. Kostenko e L. Piotrovslsy
55. A Guide to FORTRAN IV Programming - Daniel D. McCracken
56. Métodos numéricos em FORTRAN - John M. Cormick, Mario G. Salvadori.
57. FORTRAN - Monitor Principios - Tercio Pacitti.
58. Transformer Oil - R.A. Lipshtein e M.I. Shakhnovich

Apostilas

59. Course Notes - Scheduling and economic operation - W.F. B'Relis e outros
60. Introdução à Computação Digital - José Abel R. dos Santos e Tatu Nakanishi.

ANSI

61. Guide for loading oil immersed distribution and power transformers C 57.92.
62. Guide for loading oil immersed power transformers with 65 C average winding rise, TR 98.

ABNT

63. P.NB-110 Guia para aplicação de cargas em transformadores de força e de distribuição, em liquido isolante.

DATA 13.09 / 1994

PROC.

PED. Substituida

LIV.

Cz\$ DOAÇÃO-PPG

I - V N - P - O	
BIM - EFEI	
DATA	Rubrica

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200317



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA