



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Influência de Correntes
Harmônicas na Perda de Vida
Útil de Transformadores de
Distribuição**

Daniella Gonzalez

Ilha Solteira - SP

1210001295



Daniella Gonzalez

Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida Útil de Transformadores de Distribuição



Trabalho Apresentado à UNESP – Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre.

Insc. 071/2002 - NAD 056/02

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA <i>19.9.02</i>	DATA DE TOMBAMENTO <i>30.09.02</i>
REGISTRADO POR <i>Ailza</i>	TOMBO <i>Te. 1295</i>
AQUISIÇÃO <i>leayã autor R\$ 10,00</i>	CLASSIFICAÇÃO <i>G643i</i>

Ilha Solteira

2002

30400007

ENG. ELÉTRICA

sup - 181009

sup - 54544

“INFLUÊNCIA DE CORRENTES HARMÔNICAS NA PERDA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO”

DANIELLA GONZALEZ

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA -
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).**

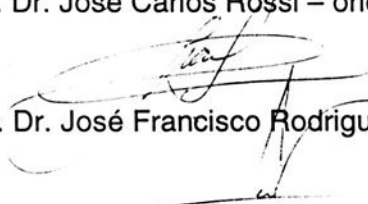


Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Vice-Coordenador em Exercício

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Carlos Rossi – orientador



Prof. Dr. José Francisco Rodrigues



Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira

Ilha Solteira, maio de 2002

BCpIS - FEIS - UNESP

DANIELLA GONZALEZ

Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida Útil de Transformadores de Distribuição

Trabalho Apresentado à UNESP – Universidade
Estadual Paulista como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de mestre.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: José Carlos Rossi

Ilha Solteira

2002

BCpIS - FEIS - UNESP



Gonzalez, Daniella

Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida Útil de Transformadores de Distribuição, Ilha Solteira – S.P, Maio de 2002.

175 páginas

Dissertação de Mestrado – UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Introdução
2. Curvas de Carga Representativas dos Transformadores
3. Análise do Efeito da Variação da Frequência nos Parâmetros Internos do Transformador
4. Fontes de Aquecimento no Transformador quando operando sob Condições Distorcidas
5. Cálculo das Temperaturas Internas do Transformador
6. Perda de Vida Útil.
7. Ensaios Experimentais
8. Simulações
9. Apresentação dos Resultados
10. Conclusões e Discussão



"Sinto-me tão envaidecida de vós, de vosso exemplo e esforço, que talvez não saiba exprimir em palavras o especial carinho, o amor sincero e a gratidão que vos dedico. Divide, pois, conosco os méritos dessa conquista, porque ela vos pertence, ela é tão vossa quanto minha".

AOS MEUS PAIS

Ao meu marido Guilherme, pelo incentivo e apoio
em todos os momentos, e pelo amor e confiança
que sempre depositou em mim...

OFEREÇO.

À minha irmã Andressa pelo incentivo,
companheirismo, cumplicidade e amor que me
concede constantemente.

DEDICO.



AGRADECIMENTOS

Todo trabalho científico é, sem dúvida, um trabalho de equipe. Assim sendo, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho, em especial aos abaixo relacionados:

- A Deus, pois sem ele nada disso seria possível.
- A todos os meus mestres, desde aqueles que me ensinaram as primeiras letras até os que, atualmente, orientam minhas atividades. A eles devo a minha formação intelectual e profissional.
- Ao meu orientador José Carlos Rossi, pelas orientações e diretrizes para a realização deste trabalho, pela paciência, pela calma e pelo respeito.
- A Luís Carlos Origa de Oliveira pelo apoio e pela disposição constante para sanar as minhas dúvidas.
- Ao meu amigo Devair Rios Garcia por sua eterna disposição em ajudar e suas colaborações tão importantes para a realização desse trabalho.
- A minha amiga Fabiola Cristina de Freitas, pela presença e apoio constantes.
- Aos amigos e colegas da Pós Graduação em Engenharia Elétrica da FEIS.
- Ao meu marido pela sua incansável disposição para incentivar o término deste trabalho e por seu amor.
- À minha irmã pelo seu zelo e apoio sempre que precisei.
- Aos meus pais por todo amor, respeito, carinho e dedicação de sempre.
- A CAPES pelo auxílio financeiro.

RESUMO

O grande crescimento da eletrônica de potência em equipamentos pertencentes às redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como a utilização de equipamentos cujas características são não lineares, fazem com que a qualidade no fornecimento de energia mereça um grande enfoque e pesquisas nos dias atuais. Nessas condições, torna-se necessário investigar o inter-relacionamento entre os equipamentos em funcionamento e a qualidade da rede à qual os mesmos se encontram conectados.

Nesse contexto encontram-se os transformadores de distribuição, presentes em grande quantidade nas redes de energia na interface entre os sistemas de energia e as cargas, e que foram projetados para trabalhar com mínimas distorções em suas formas de onda de tensão e corrente. Assim, se submetidos a formas de onda distorcidas esses dispositivos podem ter o seu comportamento afetado.

A operação com corrente (e/ou tensão) distorcida resulta em um aumento das perdas internas do transformador, o que resulta em um aumento da sua temperatura de funcionamento, que como consequência direta acarretará uma diminuição na sua expectativa de vida útil, pois a temperatura de funcionamento afeta diretamente a isolação dos enrolamentos primário e secundário. Medir a degradação dessa isolação é justamente medir a perda de vida do transformador.

Pelo exposto, o presente texto se propõe ao estudo, análise física, modelagem e análise do desempenho térmico e estimativa da vida útil de transformadores de distribuição submetidos a fenômenos harmônicos, através de simulações de carregamentos não lineares.

ABSTRACT

The great growth of the potency electronics in equipments belonging to the transmission nets and distribution of electric energy, as well as the use of equipments whose characteristics are not lineal, results in great focus and research of the quality in the supply of energy a in the current days. In those conditions, is necessary to investigate the inter-relationship among the equipments in operation and the quality of the net to which the same ones meet connected.

In that context they meet the distribution transformers, presents in great amount in the nets of energy in the interface between the systems of energy and the loads, and that were projected to work with minimum harmonics in its forms of tension wave and current. Like this, if submitted the distorted waveforms those devices can have its affected behavior.

The operation with current (and/or voltage) distorted results in an increase of the internal losses of the transformer, which results in an increase of its operation temperature, that as direct consequence will cart a decrease in its expectation of useful life, because the operation temperature affects the protecting varnish of the primary and secondary wires directly.

For the exposed, the present text intends to the study and analysis of the thermal acting and estimate of the useful life of distribution transformers submitted to harmonic phenomenons, through simulations of non-lineal loads.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
I.1 Considerações Iniciais	01
I.2 Estado da Arte	02
I.3 Objetivos do Trabalho	07
I.4 Estrutura do Trabalho	09
CAPÍTULO II – CURVAS DE CARGA REPRESENTATIVAS DOS TRANSFORMADORES	11
II.1 Considerações Iniciais	11
II.2 Curvas Diárias de Carga	11
II.3 Curvas p_u da média	12
II.4 Curvas Estratificadas de carga	13
II.5 Agregação de curvas	16
II.6 Crescimento de Carga	19
II.7 Sobrecarga Admissível	20
CAPÍTULO III – ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA FREQUENCIA NOS PARÂMETROS INTERNOS DO TRANSFORMADOR	21
III.1 Considerações Iniciais	21
III.2 Efeitos da Frequência nas Resistências e Indutâncias dos Enrolamentos Primário e Secundário do Transformador	21
III.3 Uma Outra Forma de Analisar os Efeitos da Frequência nas Impedâncias dos Enrolamentos Primário e Secundário do Transformador	27
CAPÍTULO IV – FONTES DE AQUECIMENTO NO TRANSFORMADOR QUANDO OPERANDO SOB CONDIÇÕES DISTORCIDAS	29

IV.1 Considerações Iniciais	29
IV.2 Perdas no ferro sob condições de tensão não senoidais	29
IV.3 Perdas nos enrolamentos sob condições de tensão não senoidais	34
CAPÍTULO V - CALCULO DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO TRANSFORMADOR	37
V.1 Considerações Iniciais	37
V.2 Cálculo da elevação da temperatura do topo do óleo em relação à ambiente (Go)	38
V.3 Cálculo da elevação da temperatura do ponto mais quente em relação à temperatura do topo do óleo (Ghs)	44
V.4 Temperatura Ambiente	47
V.5 Constantes Térmicas do transformador	47
V.6 Fator de correção da resistência	49
CAPÍTULO VI – PERDA DE VIDA ÚTIL	51
VI.1 Considerações Iniciais	51
VI.2 Dados necessários	51
VI.3 Perda de vida útil	53
VI.4 Cálculo da perda de vida útil	56
CAPÍTULO VII – ENSAIOS EXPERIMENTAIS	61
VII.1 Considerações Iniciais	61
VII.2 Aspectos Gerais	61
VII.3 Tipos de lampada de descarga	62
VII.4 Metodologia dos ensaios	66
VII.5 Dispositivos Analisados nos ensaios	68
VII.6 Resultados Observados	69
CAPÍTULO VIII – SIMULAÇÕES	70



VIII.1 Considerações Iniciais	70
VIII.2 Procedimento Utilizado	70
VIII.3 Listagem do programa	71
VIII.4 Considerações Finais	112
CAPÍTULO IX – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	113
IX.1 Considerações Iniciais	113
IX.2 Carregamento 1	113
IX.3 Carregamento 2	118
IX.4 Carregamento 3	122
IX.5 Carregamento 4	127
IX.6 Carregamento 5	132
IX.7 Carregamento 6	136
IX.8 Carregamento 7	141
IX.9 Carregamento 8	145
IX.10 Considerações Finais	150
CAPÍTULO X – CONCLUSÕES E DISCUSSÃO	151
X.1 Considerações Iniciais	151
X.2 Discussão dos resultados apresentados	151
X.3 Considerações Finais	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
APENDICE I – RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DOS DISPOSITIVOS DE ILUMINAÇÃO EFICIENTES	158



CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso racional dos insumos é um dos princípios básicos da competitividade no mundo globalizado. Para muitas empresas, o consumo de energia elétrica chega a 5% do seu faturamento. Assim, as metodologias que visam a eficiência energética tem como meta fundamental a diminuição dos custos, tanto no setor industrial, quanto nos setores comercial e residencial.

Os sistemas de iluminação comportam uma substancial redução no consumo de energia elétrica, com o uso de tecnologias energeticamente eficientes. Estas aplicações têm proporcionado uma redução de cerca de 30% a 40% no consumo com iluminação, que, em alguns casos, representa uma parcela significativa do consumo total.

Entretanto, muitos dos benefícios alcançados nesses programas de eficiência energética, devem-se ao grande avanço da eletrônica de potência através da aplicação de dispositivos de controle e acionamento baseados em chaveamentos eletrônicos de alta e baixa frequência e, se por um lado essa tecnologia vem trazendo enormes contribuições com respeito à flexibilização e racionalização do consumo de energia elétrica, por outro lado, o aumento dessas cargas não lineares, tanto em número de aplicações quanto em potência individual, suscita grandes preocupações com respeito à qualidade do fornecimento da energia elétrica, principalmente no que se refere à geração de harmônicas.

A presença dessas tensões e/ou correntes harmônicas nos sistemas elétricos de potência pode causar vários inconvenientes como, por exemplo, o aumento das perdas de energia, o aumento da demanda de potência reativa, a diminuição do fator de potência, a atuação indevida da proteção, erros na medição da energia elétrica e a diminuição na vida útil de equipamentos.

Quase toda a energia elétrica gerada no Brasil utiliza água como fonte de trabalho mecânico aos seus geradores. Entretanto, como as nossas usinas localizam-se afastadas dos grandes centros de consumo, a energia produzida por elas deve percorrer um longo caminho desde a sua geração até a sua efetiva utilização.

O transformador é uma das principais razões que permitem a utilização tão difundida de sistemas de energia a corrente alternada, pois torna possível tanto a geração e a transmissão da energia elétrica a níveis de tensão mais econômicos, como sua distribuição e utilização da energia na tensão mais apropriada ao dispositivo de utilização.

Normalmente, as usinas hidrelétricas geram energia a uma tensão de aproximadamente 6 KV, entretanto, a transmissão da energia nesse nível de tensão acarretaria perdas muito grandes durante o percurso, tornando a relação custo-benefício antieconômica. Assim sendo, é necessária a elevação dessa tensão gerada a níveis que melhorem a relação custo benefício do processo de transmissão (69KV, 138 KV, 440 KV ou 700 KV, por exemplo, no Brasil), exigindo, portanto o uso de um transformador elevador de tensão, chamado transformador de



potência ou de força. Não obstante, quando essa energia alcança os centros de consumo, torna-se necessário diminuir novamente o seu nível de tensão para que ela seja distribuída com segurança sobre as cidades. Utiliza-se então, um transformador abaixador de tensão que reduz a tensão de transmissão para uma menor chamada tensão de distribuição (13.8 KV, por exemplo). Mas, essa tensão de distribuição ainda não é aquela na qual funcionam os aparelhos que utilizamos diariamente em nossas casas, de modo que, antes do seu consumo a energia necessita ainda passar por mais um transformador abaixador de tensão, agora chamado transformador de distribuição, que reduz a tensão de distribuição a valores compatíveis com o consumo.

Os transformadores de distribuição, embora tenham seu custo unitário relativamente baixo, são encontrados em grande quantidade, de modo que, em conjunto representam boa parte dos investimentos das empresas de energia e, assim como os demais equipamentos presentes nas redes de energia elétrica, foram projetados para trabalhar com correntes e tensões o mais senoidal possível.

Dessa forma, o aumento do número e do porte das cargas especiais implantadas no sistema, associadas às cargas tradicionais, e que podem gerar índices de distorção harmônica acima dos permissíveis ou recomendáveis, resulta na necessidade de conduzir investigações sobre o comportamento dos transformadores quando alimentam essas cargas, de modo a identificar ações direcionadas à racionalização do uso energia, mas que também garantam a qualidade do seu fornecimento com relação ao bom funcionamento dos equipamentos presentes nas redes de energia.

Quando estão submetidos à tensões e/ ou correntes harmônicas, os transformadores tem sua temperatura de funcionamento aumentada, o que afeta diretamente a vida útil do material isolante dos enrolamentos. Em outras palavras, a presença de harmônicos tenderá a diminuir a vida útil dos transformadores, o que se não previsto de forma adequada, poderá causar danos à rede em questão e, conseqüentemente, prejuízos as concessionárias e à qualidade da energia fornecida.

Dentro desse escopo, o presente trabalho se propõe a analisar o comportamento dos transformadores de distribuição quando estão operando sob condições distorcidas, enfatizando a perda de vida útil adicional causada por tensões e/ou correntes harmônicas presentes nas redes de distribuição devido ao aumento das cargas não lineares em funcionamento nas redes.

1.2 ESTADO DA ARTE

Vários estudos foram realizados para analisar as condições elétricas, térmicas e a vida útil de transformadores quando submetidos a condições de alimentação senoidal. Dentre eles destacam-se:

1) Autor: Augusto Ferreira Brandão Júnior

"Políticas de Instalação e Operação de Transformadores" (Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1978) [1]

Neste trabalho, o autor apresenta um método para a escolha do mínimo custo de



instalação de transformadores de potência em uma subestação. O método baseia-se na comparação dos custos de várias políticas de instalação de transformadores variando-se a potência nominal, vida útil e número de unidades instaladas.

O autor utiliza-se de conceitos de vida útil provável e taxa de deterioração da isolação no cálculo da sobrecarga admissível do transformador. O valor de potência nominal do transformador de subestação é escolhido sem admitir sobrecarga em regime normal de operação, deixando esta ocorrer apenas em situações de emergência. Não obstante, no caso dos transformadores de distribuição aqui estudados, o critério de escolha da potência pode admitir sobrecarga em regime, desde que esta leve à perda de vida útil controlada.

Na sua conclusão, o autor, diz que a aplicação do método descrito leva a uma utilização mais racional da unidade transformadora, pois fornece um número: a vida útil provável, o qual dá uma medida do grau de solicitação do equipamento, tornando possível uma previsão do comportamento futuro do transformador. Ainda diz que, para esse planejamento ser coerente, é imprescindível a existência de dados históricos sobre a temperatura ambiente, dados de crescimento de carga e forma da curva de carga diária na subestação estudada, pois a confiança depositada nos resultados dos estudos é diretamente proporcional à representatividade dos dados com os quais foi elaborado.

II) Autor: Se Uh Ahn

“Políticas de Carregamento dos Transformadores de Distribuição” (Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1993). [2]

Aqui, o autor apresenta considerações referentes ao cálculo da perda de vida útil em transformadores devido à carregamento acima da potência nominal e determina uma política de carregamento para transformadores de distribuição direcionada aos consumidores residenciais. Ainda compara a metodologia proposta, a qual calcula a perda de vida útil nesses transformadores através da sua curva diária de carga e da sua curva de temperatura, com a metodologia atualmente praticada pelas concessionárias de energia, que utilizam a função KVAS, a qual relaciona a energia mensal passante de uma estação transformadora (KWh) com a demanda máxima estimada da referida instalação com 90% de probabilidade de não ser excedida.

Em sua conclusão, o autor diz que a curva diária de carga representada pela curva média é um modelo útil para a escolha do transformador, entretanto, para se ter valores corretos de perda de vida deve-se utilizar a curva estratificada de carga e a curva de temperatura do dia. Diz também que, quando a metodologia que utiliza as curvas de carga e de temperatura é comparada com aquela que utiliza a função KVAS, a primeira apresenta um dimensionamento cerca de 20% menor.

III) Autor: José Antônio Jardini, et al

“Avaliação de Perda de Vida em transformadores de distribuição através de Análise de Cluster e Redes Neurais” (Nota Técnica do Centro de Excelência em Energia Elétrica CED284/



PLAN010/NT013/OR – Fevereiro de 1998). [3]

Os autores desta nota técnica apresentam métodos de estimativas de perda de vida de transformadores de distribuição, descritos através de Análise de Cluster e também através de Redes Neurais. Justificam-se dizendo que através do método de cálculo de perda de vida que utiliza as curvas de carga e de temperatura, o tempo de processamento para análise de cada transformador individualmente é muito grande, devido ao elevado número de transformadores de distribuição em uma concessionária. Sugere-se neste artigo que disponha-se de um banco de dados padrão, com as curvas de carga e as respectivas curvas de perda de vida de diversos tipos de transformadores, e que a estimativa de vida de um outro transformador seja feita comparando-o com os transformadores do banco de dados. Os autores então fornecem duas alternativas de solução: Classificação e Interpolação, sendo a Análise de Cluster, o procedimento de Distância Euclidiana e o LQV de Redes Neurais processos de classificação.

Em sua conclusão, os autores comparam os métodos e observam que todos apresentam boas respostas e com precisão aceitável.

IV) Autor: José Antônio Jardini, et al

"Curvas Diárias de Carga – Base de dados estabelecida com medições de campo" (Nota Técnica do Centro de Excelência em Energia Elétrica). [4]

Os autores desta nota técnica apresentam um estudo elaborado para a determinação das curvas diárias de carga de consumidores residenciais, comerciais e industriais baseado em medições de campo, além de uma metodologia de agregação dessas cargas para a determinação do carregamento esperado em equipamentos e partes da rede, utilizando-se as curvas determinadas de cada atividade e os consumos mensais dos consumidores conectados.

Em sua conclusão, os autores comparam as curvas obtidas por agregação e por medição e verificam uma boa consistência entre os valores medidos e calculados. Ainda propõem que as curvas diárias representativas dos consumidores sejam definidas na forma estatística, deste modo pode-se escolher a probabilidade desejada de não ser excedida e determinar uma curva para uso nos cálculos.

Obviamente, também foram realizados estudos dos transformadores quando submetidos a formas de onda não senoidal, e dentre eles destacam-se:

V) Autor: John H. Blake, et al.

"Oil Immersed Power Transformer Overload Calculations by Computer" (Artigo IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems – Vol. PAS 88 – nº 8 – Agosto 1969) [7]

Neste trabalho, o autor apresenta recomendações sobre a seleção da temperatura ambiente, correção de resistência para variações de temperatura e avaliação das curvas diárias de carga, para a realização dos cálculos das temperaturas do transformador em relação



ao seu carregamento.

O autor demonstra as formulações utilizadas para o cálculo das temperaturas do transformador e desenvolve um programa que, de acordo com o próprio, aumentou a capacidade de avaliação de sobrecargas de emergência.

Primeiramente, o autor introduz as equações utilizadas no cálculo das temperaturas do transformador tanto para regime permanente quanto para transitórios. Em seguida ele discute os métodos de cálculo de perda de vida e a obtenção da curva de carga para operação normal e de emergência.

Introduzidos todos os cálculos necessários, o autor descreve a elaboração e o funcionamento do programa desenvolvido.

VI) Autor: Antonio Carlos Delaiba

"Comportamento de transformadores com cargas não lineares: Uma abordagem analítica, experimental e numérica pelo método dos elementos finitos" (Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica da USP, 1997) [8]

Neste trabalho, o autor apresenta estudos que inter-relacionam o comportamento elétrico, magnético, térmico e a vida útil de transformadores na presença de sinais distorcidos e de possíveis níveis CC.

O autor utiliza-se de técnicas do domínio da frequência, e realiza simulações computacionais para observar comportamento dos transformadores no domínio do tempo.

Primeiramente, o autor desenvolveu uma modelagem matemática no domínio da frequência, caracterizando as cargas como um fenômeno determinístico, e concebeu um programa digital para a análise do comportamento dos transformadores quando estes alimentam cargas não lineares. Aqui o autor realizou investigações sobre o circuito equivalente completo e os parâmetros que descrevem o transformador sob condições de operação não senoidais. Os resultados computacionais mostraram que as variações na frequência de operação sobre os componentes que fazem parte do circuito equivalente (domínio da frequência) pouco afetam o desempenho térmico dos transformadores, exceto com relação às resistências do enrolamento de baixa tensão para alguns transformadores de potência. Ainda o autor analisou o fenômeno de transformadores submetidos a dupla excitação (CA e CC), onde de um modo geral os resultados mostraram que as distorções típicas de tensão e/ou corrente podem afetar drasticamente o comportamento térmico e a vida útil dos transformadores, exceto para níveis baixos de distorção ou níveis de CC em torno da corrente de magnetização.

Em seguida, o autor desenvolve análises experimentais e confronta os resultados com aqueles obtidos matematicamente, obtendo uma boa aproximação. O autor então, complementa os estudos anteriores considerando o comportamento dinâmico das fontes harmônicas, ou seja, tratando-as como fenômenos aleatórios e, portanto, utilizando-se da estatística descritiva para avaliar os resultados.



O autor ainda modela os transformadores no domínio do tempo utilizando-se do método de elementos finitos, onde ele apresenta a análise de uma simulação computacional de um transformador trifásico alimentando cargas lineares ou não lineares, utilizado um simulador computacional denominado "FLUX2D", obtendo resultados com boa concordância com as análises anteriores.

Na sua conclusão, o autor ainda oferece desafios no sentido de abordagem do tema em questão, como por exemplo, o desenvolvimento de modelos térmicos para o tratamento do transformador, de forma que eles possam representar mais apropriadamente o fenômeno considerado; a investigação experimental da aplicabilidade dos procedimentos para transformadores de grande porte; o entendimento do estudo e da metodologia para outros itens associados à qualidade de energia elétrica; etc.

VII) Autor: Elder Geraldo Domingues

"Uma Contribuição à Modelagem de Transformadores Convencionais e Especiais Utilizando o Simulador Saber" (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1996) [9]

Neste trabalho, o autor apresenta estudos no sentido de incorporar variações nos modelos de transformadores convencionais e especiais no simulador SABER.

Primeiramente, o autor apresentou as modelagens de transformadores monofásicos e trifásicos no domínio do tempo, considerando os efeitos da não linearidade no núcleo e das capacitâncias de fuga presentes nestes dispositivos. Em seguida ele realiza os mesmos estudos para os transformadores chamados especiais, no caso os estrela delta estendidos e de três enrolamentos utilizados para eliminação de harmônicas em estações multi conversoras. Todos os casos são simulados.

O autor ainda analisa o efeito da variação de frequência nos parâmetros equivalentes do transformador, com o intuito de verificar a necessidade ou não da inclusão desses efeitos no modelo dos transformadores.

Na sua conclusão, o autor atesta a validade e versatilidade do simulador utilizado, além de observar a pouca variação causada, na prática, pela variação da frequência nos parâmetros do transformador. Ainda, o autor sugere para o futuro a inclusão dos efeitos da variação das perdas no núcleo com a variação da frequência, a modelagem de autotransformadores e de outros transformadores especiais com defasamentos angulares genéricos.

VIII) Autor: A. W. Galli et al.

"Temperature rise of small oil-filled distribution transformers supplying nonsinusoidal load currents" (IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, nº 1, Janeiro 1996). [10]

Aqui, o autor apresenta testes de elevação de temperatura em um transformador de



distribuição monofásico imerso em óleo que foi especialmente construído com termopares embutidos para permitir a medição da verdadeira temperatura de ponto quente (hot-spot) em carga, e compara os resultados para condições de corrente senoidais e não senoidais.

Os resultados desses testes mostram que quando submetido a corrente de plena carga com taxa de distorção harmônica acima de 40% e harmônicas de baixa ordem, a média de aumento de temperatura dos enrolamentos é de 2 a 7°C maior que quando submetido a corrente de plena carga senoidal.

Em sua conclusão, o autor afirma que o estudo indica que o padrão existente para transformadores de distribuição pequenos alimentados por correntes não senoidais resultam boas estimativas da capacidade de carga dos mesmos, pois a maior diferença observada entre a temperatura de hot-spot e a temperatura média dos enrolamentos foi de 7°C (para transformadores de 25 KVA), a qual indica que os 15°C comumente permitidos são bastante conservativos.

IX) Autor: M.T Bishop et al.

"Evaluating Harmonic-Induced Transformer Heating" (IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, nº 1, Janeiro 1996). [11]

Aqui, o autor realiza experiências com um transformador monofásico de 25 KVA, imerso em óleo, com o primário de 2,4 KV e o secundário de 120/240 V, alimentando uma carga cuja corrente continha distorção harmônica. O transformador em questão tem termopares instalados estrategicamente de modo a permitir a monitoração da temperatura no núcleo e na bobina. A carga geradora de harmônica é puramente resistiva somada com um pulso de corrente de duração de 2,4 ms.

Os resultados desses testes mostram que o transformador de distribuição de 25 KVA é menos sensível a carregamento harmônico do que o esperado. Os testes indicaram que mesmo operando sob condições diferentes das ideais, o transformador não ultrapassa a temperatura de operação limite.

Em sua conclusão, o autor afirma que mais testes devem ser realizados para uma conclusão definitiva, e que as concessionárias deveriam monitorar os seus transformadores instalados com relação à influência que as cargas geradoras de harmônicas poderiam causar em seus equipamentos.

I.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Pelo exposto no item anterior, observa-se que o tema tem sido explorado, entretanto, devido à sua complexidade, investigações adicionais são ainda necessárias.

De um modo geral, os transformadores são projetados para operar em regime permanente e na frequência fundamental. No entanto, em situações envolvendo uma faixa de frequências harmônicas ou fenômenos transitórios eles ainda devem realizar suas funções.



Dessa forma o presente trabalho segue na direção de investigar os efeitos das distorções harmônicas na vida útil dos transformadores existentes nas redes de energia.

Assim, o objetivo desse trabalho é realizar estudos e simulações que analisem situações onde o transformador alimenta cargas não lineares e portanto, funciona sob condições distorcidas de tensão e/ou corrente.

Considerar-se-á aqui um transformador de distribuição que alimenta consumidores residenciais, cujas cargas tradicionais são substituídas por circuitos de iluminação eficiente.

De forma a atingir o objetivo proposto acima, adotou-se a metodologia de pesquisa apresentada no algoritmo a seguir e resumida no fluxograma da figura 1.1.

Algoritmo básico do procedimento metodológico adotado:

- (1) Levantamento bibliográfico sobre os assuntos envolvidos na pesquisa realizado através de consultas a trabalhos científicos publicados e a referências bibliográficas específicas.
- (2) Escolha dos dispositivos eficientes a serem utilizados no estudo.
Como a finalidade aqui é qualificar, sem quantificar, o fenômeno do aumento da perda de vida útil dos transformadores quando submetidos à formas de onda de corrente e/ou tensão distorcidas, optou-se por dispositivos de iluminação comumente utilizados em instalações residenciais, como lâmpadas fluorescentes compactas e lâmpadas fluorescentes acionadas por reatores eletrônicos, por exemplo.
- (3) Ensaios dos dispositivos eficientes no laboratório.
Utilizando equipamentos de medição adequados, realizou-se o diagnóstico do desempenho elétrico dos dispositivos analisados, no que diz respeito à qualidade da energia elétrica.
- (4) Análise do comportamento da vida útil de um transformador de distribuição quando este alimenta consumidores residenciais. Primeiramente admitindo-se que os equipamentos existentes nestas residências não gerem harmônicas e, em seguida, considerando-se que foram instalados dispositivos de iluminação eficiente em todas as residências, ou seja, considerando que haja geração de harmônicas.
- (5) Comparação dos resultados de perda de vida útil obtidos para os carregamentos geradores e não geradores de harmônicas.
- (6) Apresentação dos resultados obtidos na simulação.



I.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de atingir as metas anteriores, este trabalho apresenta-se organizado em capítulos, quais sejam:

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Trata de introduzir o que foi realizado neste trabalho e em que contexto ele é inserido.

CAPÍTULO II – CURVA DE CARGA REPRESENTATIVA DOS TRANSFORMADORES.

Descrição de como são obtidas as curvas de carga e quais os possíveis tratamentos utilizados para a sua análise.

CAPÍTULO III – ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NOS PARÂMETROS INTERNOS DO TRANSFORMADOR.

Este capítulo busca incluir os efeitos da variação das resistências e indutâncias dos enrolamentos dos transformadores com relação à frequência.

CAPÍTULO IV – FONTES DE AQUECIMENTO NO TRANSFORMADOR QUANDO OPERA SOB CONDIÇÕES DISTORCIDAS.

Nesta unidade observa-se os efeitos das distorções harmônicas nas perdas do transformador e sua influência no aquecimento da mesmo.

CAPÍTULO V – CÁLCULO DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO TRANSFORMADOR

Aqui se descreve como são calculadas as temperaturas relevantes ao cálculo da perda de vida em transformadores sob condições senoidais e não senoidais de operação.

CAPÍTULO VI – PERDA DE VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR.

Aqui se estudam as etapas necessárias para o cálculo da perda de vida útil em transformadores de distribuição quando estes são submetidos à tensões e/ou correntes harmônicas ou não.

CAPÍTULO VII – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados com dispositivos de iluminação eficientes, que serão utilizados como carga nas simulações de perda de vida dos transformadores de distribuição.

CAPÍTULO VIII – SIMULAÇÕES

Esta unidade trata da descrição do processo utilizado na simulação da perda de vida útil do transformador de distribuição analisado.

CAPÍTULO IX – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Aqui se apresentam os resultados das simulações para diferentes tipos de carga não lineares acopladas a um transformador de distribuição e comparam-se esses valores a valores obtidos para um carregamento puramente senoidal.



CAPÍTULO X – CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais discussões e conclusões finais dos vários capítulos que formam o corpo deste trabalho, além de apresentar os próximos passos a serem seguidos na direção da dissertação.

O trabalho é completado com a bibliografia sobre o assunto.

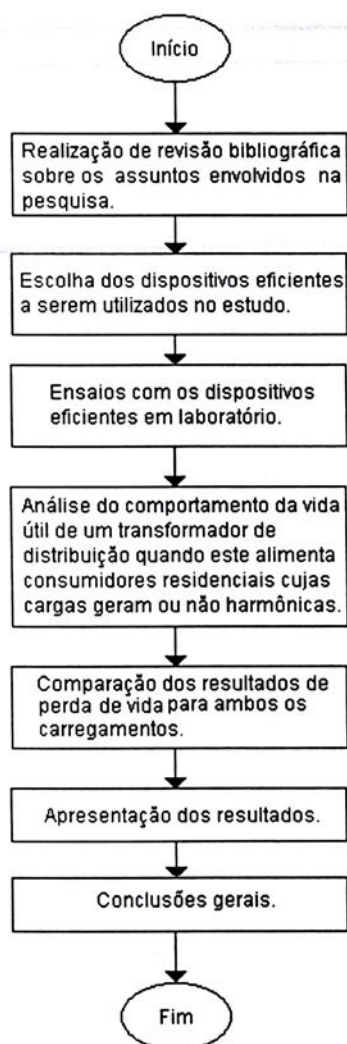


Figura I.1 – Fluxograma do procedimento metodológico utilizado no desenvolvimento da pesquisa.

CAPÍTULO II – CURVA DE CARGA REPRESENTATIVA DOS TRANSFORMADORES

II.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As curvas diárias de carga características dos transformadores, sejam eles da rede de distribuição ou de transmissão, aparecem como uma necessidade primordial para as concessionárias de energia elétrica, pois são essas curvas que indicam as características dos consumidores e seus hábitos de consumo.

O conhecimento dessas curvas é importante também para o dimensionamento das redes, sua análise tarifária, sua aplicação no gerenciamento de cargas e, principalmente, para a escolha da potência dos transformadores.

Este capítulo estuda essencialmente métodos de obtenção e de análise de curvas diárias de carga representativas dos transformadores de distribuição.

II. 2 CURVAS DIÁRIAS DE CARGA

Uma curva diária de carga exprime o valor da potência aparente passante pelo transformador em função do tempo. Ela pode ser composta pelos valores instantâneos da potência ou por valores de potência média em dados intervalos de tempo. Assim, os pulsos são acumulados durante o intervalo, fornecendo a energia acumulada no mesmo, que dividida pelo tempo do intervalo, fornece a potência média representativa daquele ponto.

Neste procedimento de obtenção de pontos de potência média em intervalos, uma ponta de curta duração como a de um chuveiro, que tem duração média de cinco minutos, tem seu valor atenuado. Para maior esclarecimento, na figura II.1, é mostrada a demanda máxima que se obtém dependendo do valor do intervalo de integração do medidor. Se o intervalo de integração for quinze minutos, por exemplo, a demanda máxima da primeira hora será 40 KVA contra 27,5 KVA para um intervalo de uma hora. Se o medidor for instantâneo, essa demanda pode apresentar valores superiores a 40 KVA.

Não obstante, é praxe nas concessionárias obter um ponto a cada intervalo de quinze minutos, resultando em noventa e seis pontos de medição.

Essas curvas normalmente são obtidas utilizando-se conjuntos de medidores de disco convencionais acoplados a um registrador digital chamado REP – Registrador Eletrônico Programável¹

¹ É um registrador provido de memória de massa, que conta os pulsos gerados pelo medidor e acumula-os calculando a energia de cada intervalo de integração predeterminado e a potência média no intervalo.



No caso de intervalos maiores serem suficientes, de uma em uma hora por exemplo, pode-se programar o REP ou então, converter os dados utilizando-se de alguma técnica estatística para cálculo de média. Comumente, as concessionárias utilizam o método das médias quadráticas². Essa forma de média foi escolhida pois a perda de vida do transformador é uma função da elevação de sua temperatura, principalmente por perdas Joule, e estas são proporcionais ao quadrado da potência, sendo portanto mais adequado que outros tipos de médias.

Como a finalidade das curvas de carga é definir o comportamento da carga de determinado transformador, seja qual for o intervalo considerado, tornam-se necessários vários dias de medição contínuos, que resultam em várias curvas diárias de carga para cada transformador. Os dados resultantes dessas curvas deverão então ser agrupados em uma única curva, de modo que cada transformador tenha sua própria representação. Isto é feito calculando-se a média de todas as curvas e os seus respectivos desvios padrão, ou seja para cada ponto da curva calcula-se:

$$P_{\text{média}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N P(t)}{N} \quad (II.1)$$

$$S_{\text{absoluto}}^2(t) = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{\text{média}}(t) - P(t))^2}{N-1}$$

sendo N o número de dias de medição.

Assim, para cada transformador tem-se uma curva de carga média e uma de desvios, que represente o seu comportamento ao longo do dia.

II.3 CURVAS “PU DA MÉDIA”

Como cada transformador alimenta um tipo de carga diferente, para que as curvas dos vários transformadores possam ser comparadas, torna-se necessária uma conversão dos dados em função de um valor de base.

Assim, todos os pontos das curvas médias dos transformadores devem ser divididos por:

² Método das médias quadráticas:

$$P_{\text{média}}(\text{intervalo}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M P^2(t)}{M}}$$

sendo M o número de pontos existentes no intervalo.



$$P_{base} = \frac{1}{24} \int_{24 \text{ horas}} P_{média}(t) dt \quad (II.2.a)$$

Ou:

$$P_{base} = \frac{KWh \text{ mensal}}{24 \times 30} \quad (II.2.b)$$

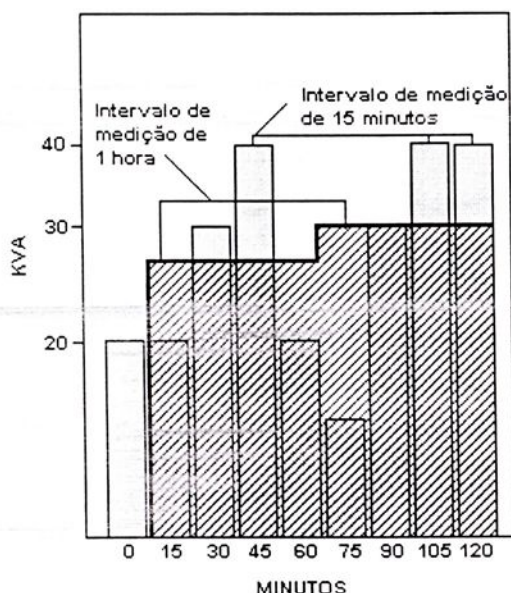


Figura II.1 – Gráfico comparativo entre os intervalos de integração de quinze minutos e uma hora

Essas curvas são chamadas “PU da média”. E uma delas é ilustrada na figura II.2.

Após esse processo, todas as curvas de carga medidas, mesmo em transformadores com cargas diferentes, estarão na mesma base e poderão, portanto, ser comparadas entre si.

II. 4 CURVAS ESTRATIFICADAS DE CARGA

As curvas de carga média em pu, embora permitam a comparação entre transformadores alimentando cargas diferentes, não demonstram a realidade dos transformadores medidos, pois, observa-se que, para um mesmo transformador, a demanda máxima diária pode ocorrer em horários diferentes e com amplitudes diferentes.

Em função disso, é essencial encontrar uma situação que os represente. Isso pode ser feito utilizando-se das curvas médias e de desvio padrão e supondo-as em uma distribuição gaussiana. Nessa distribuição, o valor correspondente à média ($P_{média}$) mais “K” desvios padrão (S), corresponde a uma probabilidade “P%” de não ser excedido, com $P\%=f(K)$.

A obtenção dessas curvas se faz através da curva média e de suas desvios absolutos, sendo calculada pela fórmula:

$$\text{Curva } P\% = P_{\text{média}} + K \cdot S \quad (\text{II.3})$$

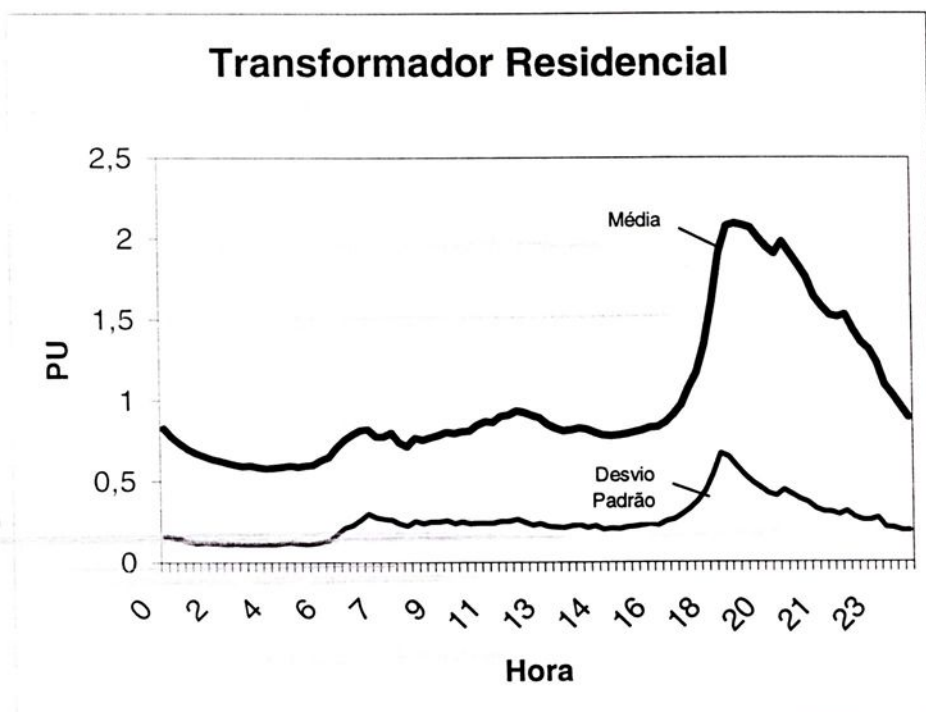


Figura II.2 – Curva de carga média em p.u ou Curva “PU da média”

O valor de “K” é normalizado pela curva de Gauss. Sendo:

Tabela II.1 – Valores de K para
normalização de Gauss

P%	K
2,5	-1,960
10	-1,280
20	-0,840
30	-0,525
40	-0,225
50	0,000
60	0,225

70	0,525
80	0,840
90	1,280
97,5	1,960

Assim, procura-se estabelecer uma família de curvas que represente a carga em um transformador, com sua respectiva probabilidade de ocorrência, composta por onze estratos.

Tabela II.2 – Curvas Estratificadas de Carga com suas respectivas probabilidades de ocorrência

Curva P = 2,5% representativa da faixa de 0% a 5%
Curva P = 10% representativa da faixa de 5% a 15%
Curva P = 20% representativa da faixa de 15% a 25%
Curva P = 30% representativa da faixa de 25% a 35%
Curva P = 40% representativa da faixa de 35% a 45%
Curva P = 50% representativa da faixa de 45% a 55%
Curva P = 60% representativa da faixa de 55% a 65%
Curva P = 70% representativa da faixa de 65% a 75%
Curva P = 80% representativa da faixa de 75% a 85%
Curva P = 90% representativa da faixa de 85% a 95%
Curva P = 97,5% representativa da faixa de 95% a 100%

Cada curva definida acima tem uma probabilidade de ocorrer de 10%, exceto as curvas 2,5% e 97,5% que tem 5% de probabilidade de ocorrência cada uma.

As curvas representativas desse processo são exemplificadas na figura II.3.

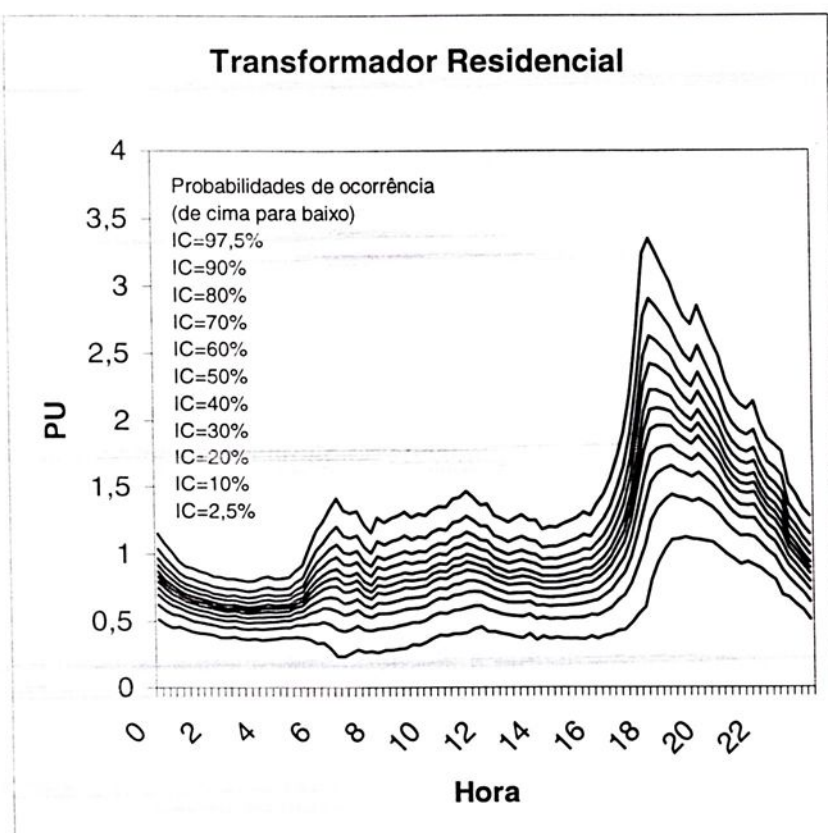


Figura II.3 - Curvas Estratificadas de Carga

II.5 AGREGAÇÃO DE CURVAS

Este método apresenta uma metodologia que permite a determinação da curva de carga ou o carregamento esperado em equipamentos e pontos determinados da rede de distribuição, com base na agregação das curvas representativas das várias atividades obtidas através de medições em campo e dos consumos mensais dos consumidores ligados a esse elemento.

A metodologia fornece a possibilidade de uma avaliação sistemática do comportamento da carga do consumidor, através de medições permanentes e permite um monitoramento do carregamento dos equipamentos da rede.

Realiza-se uma campanha de medições em campo para determinar o comportamento da curva de carga de consumidores, obtendo-se as curvas representativas das classes de consumo mais significativas: Residencial, Comercial e Industrial; através de medições apropriadas e técnicas estatísticas e de amostragem.

Para um determinado consumidor, transformador ou alimentador, com base nos valores das curvas diárias de carga medidas, as curvas média e de desvio padrão são calculadas. Em seguida elas são todas colocadas na mesma base conforme descrito anteriormente, obtendo-se assim as curvas em p.u.

O próximo passo é a determinação das curvas representativas da média $m_i(t)$ e do desvio padrão $s_i(t)$ dos segmentos de mercado analisados. Para isso agrupa-se os

consumidores residenciais por faixa de consumo, e os consumidores comerciais e industriais por ramo de atividade.

A identificação do consumidor residencial em cada faixa de consumo é feita pelas curvas média ($m_j(t)$) de desvio padrão ($s_j(t)$) em p.u., representativas dessa faixa. Para uso futuro, uma vez conhecido o consumo mensal de um certo consumidor, a sua curva diária de carga pode ser obtida multiplicando-se os valores em p.u. da curva representativa do estrato mensal a qual ele pertence pelo seu valor de base [KWh / (24 x 30)]. Procedimento análogo poderá ser utilizado para os consumidores do ramo industrial e comercial, observando a qual ramo de atividade ele pertence.

Na análise dos consumidores residenciais, as curvas de carga representativas são definidas por concessionária e por estrato de consumo.

As figuras II.4 e II.5, exemplificam as curvas “m” e “s” para um desses estratos.

Os elevados valores de desvio padrão devem-se à densidade no horário de utilização do chuveiro elétrico.

Para análise dos consumidores comerciais e industriais utilizam-se somente as curvas dos dias úteis, quando as curvas diárias são próximas entre si, resultando em baixos valores de desvio padrão.

As figuras II.6 e II.7 mostram as curvas para uma atividade comercial e uma industrial, respectivamente.

Os altos valores de desvios padrão encontrados, quando trata-se de atividade industrial, são devido ao fato de que a maioria das indústrias de pequeno porte possui motores elétricos cujo funcionamento, na maioria das vezes, é intermitente ao longo do dia resultando em picos de carga que comparativamente ao consumo mensal das indústrias analisadas, pode provocar uma dispersão relativamente alta dos valores medidos.

Cria-se então um banco de dados, com base em medições, com as curvas “m” e “s” representativas dos estratos de consumo residenciais, comerciais e industriais.

A energia mensal consumida de todos os consumidores é alocada em outro banco de dados disponível no departamento comercial das empresas, o qual é atualizado mensalmente.

Assim, além da medição direta efetuada no equipamento, as suas curvas média e de desvio padrão podem também ser obtidas pela agregação das curvas dos consumidores ligados a ele. Considere-se, por exemplo, um transformador com “p” consumidores tipo “a”, e “q” consumidores tipo “b”. As curvas F_i e F_j de cada consumidor podem ser representadas por:

$$\begin{aligned} F_i &= m_a P_i + K \cdot s_a P_i \\ F_j &= m_b P_j + K \cdot s_b P_{ji} \end{aligned} \quad (II.4)$$

Sendo P_i e P_j as potências de base para cada consumidor.



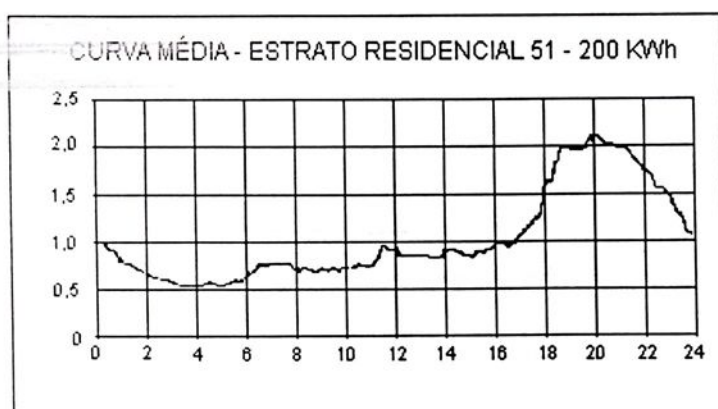


Figura II.4 – Curva Média para estrato residencial 51 – 200 KWh



Figura II.5 – Curva de desvio padrão para estrato residencial 51 – 200 KWh

A agregação de “p” e “q” consumidores no transformador será dada por:

$$P_{média}(t) = \sum_1^p m_a P_i(t) + \sum_1^q m_b P_j(t) \quad (II.5)$$

$$S_{absoluto}^2(t) = \sum_1^p [s_a P_i(t)]^2 + \sum_1^q [s_b P_j(t)]^2$$

Dessa forma, para a obtenção das curvas média e de desvio padrão de um equipamento, baseando-se nos consumidores ligados a ele, os seguintes passos devem ser seguidos: (i) Montagem de um banco de dados com as curvas média e de desvio padrão, em p.u, representativa dos consumidores dos três segmentos de mercado analisados (Residencial, Comercial e Industrial); (ii) Conhecimento do consumo mensal de todos os consumidores e, no caso de consumidores comerciais ou industriais, conhecimento também do seu ramo de atividade.

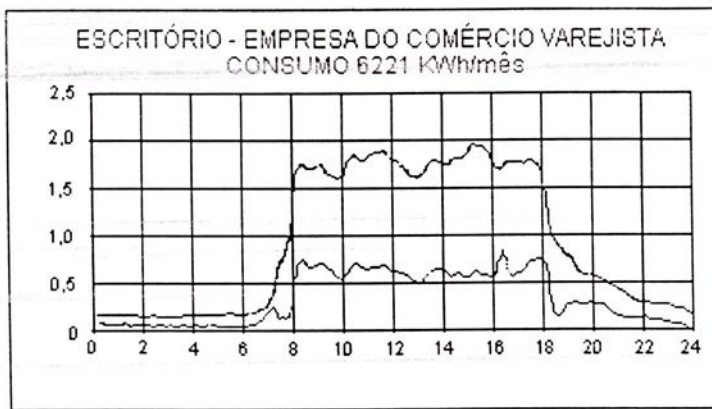


Figura II.6 – Curvas Média e de Desvios representativas de uma atividade comercial.

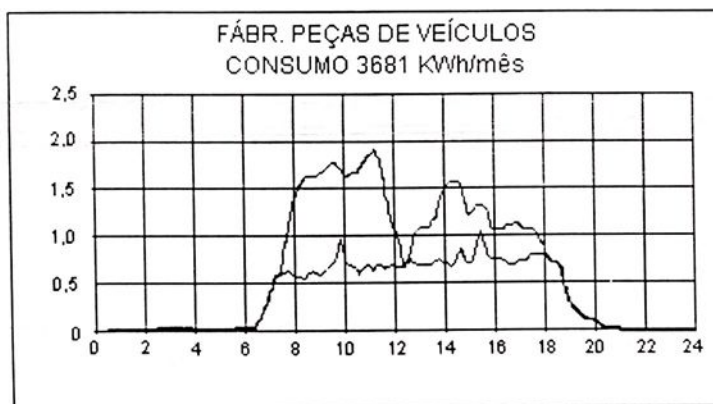


Figura II.7 – Curvas Média e de Desvios representativas de uma atividade industrial.

II.6 CRESCIMENTO DE CARGA

A expressão:

$$P_n = P_o \cdot (1 + r)^n \quad (II.6)$$

é a mais comumente utilizada para representar o crescimento de carga nas redes de distribuição. Sendo:

- P_n a potência no ano "n"
- P_o a potência no ano 0 (zero).
- r a taxa de crescimento média anual, em pu
- n número de anos

Assim, com a taxa de crescimento médio anual, cujo valor é encontrado no setor de planejamento das concessionárias, é possível prever a potência solicitada pela carga nos anos seguintes.

II.7 SOBRECARGA ADMISSÍVEL

Das experiências adquiridas ao longo dos anos e das pesquisas referentes ao fenômeno do envelhecimento, sabe-se que um transformador pode ser sobrecarregado durante determinado intervalo de tempo, sem que isto ocasione a sua destruição ou uma perda de vida excessiva. Assim, visto que a curva de carga não é constante durante todo o tempo, pode-se considerar em um dimensionamento que o transformador está sobrecarregado parte do tempo.

O carregamento médio, em geral, em transformadores de distribuição é menos de 50% da sua carga máxima. De modo que, se a demanda máxima da curva de carga durante o dia for igual à potência nominal do transformador, então ele estará operando ocioso parte do tempo. Da mesma forma, uma sobrecarga de curta duração, especialmente se a temperatura ambiente for baixa, não reduzirá a expectativa de vida do transformador. Assim, permitindo uma sobrecarga ocasional, a relação custo/benefício será mais favorável.



CAPÍTULO III - ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NOS PARÂMETROS INTERNOS DO TRANSFORMADOR

III.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os modelos existentes de transformadores consideram que os parâmetros internos representativos do seu circuito equivalente são invariáveis com a frequência. Fato este que é verdadeiro quando se trata da frequência fundamental, entretanto, quando são realizados estudos relacionados com frequências mais elevadas o fenômeno pode merecer atenção especial.

De fato, à medida que a frequência se eleva, parâmetros como as resistência e indutâncias podem sofrer significativas alterações.

Assim, este capítulo destina-se a ao estudo e modelagem de transformadores submetidos à fenômenos em que diferentes frequências se fazem presentes.

III.2 EFEITOS DA FREQUÊNCIA NAS RESISTÊNCIAS E INDUTÂNCIAS DOS ENROLAMENTOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR

Existem dois fenômenos físicos que se manifestam simultaneamente nos enrolamentos de um transformador. O Efeito Skin e o Efeito Proximidade.

O Efeito Skin ou Efeito Pelicular é o resultado da não uniformidade da indutância própria através das secções retas do condutor. Como o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo que a sua superfície, sua indutância (reatância) nesse ponto é maior que na superfície fazendo com que a corrente circule em menor densidade no centro do condutor. Essa distribuição de corrente faz com que a resistência CA seja maior.

O Efeito Proximidade é resultado da interação entre dois ou mais condutores. Nesse caso, os campos magnéticos dos condutores próximos interagem entre si distorcendo a distribuição de correntes dos mesmos e, conseqüentemente, alterando o valor da resistência elétrica.

A título de ilustração, a figura III.1, mostra a relação entre as resistências CA e CC em função da frequência para diferentes condutores planos de secções circulares; e a figura III.2, ilustra os dois efeitos (Skin e Proximidade) separadamente em função da frequência para um cabo de 95 mm².

Na figura III.2, pode-se observar que para altas frequências o efeito Skin é maior, enquanto que para frequências menores sobressai-se o efeito proximidade.



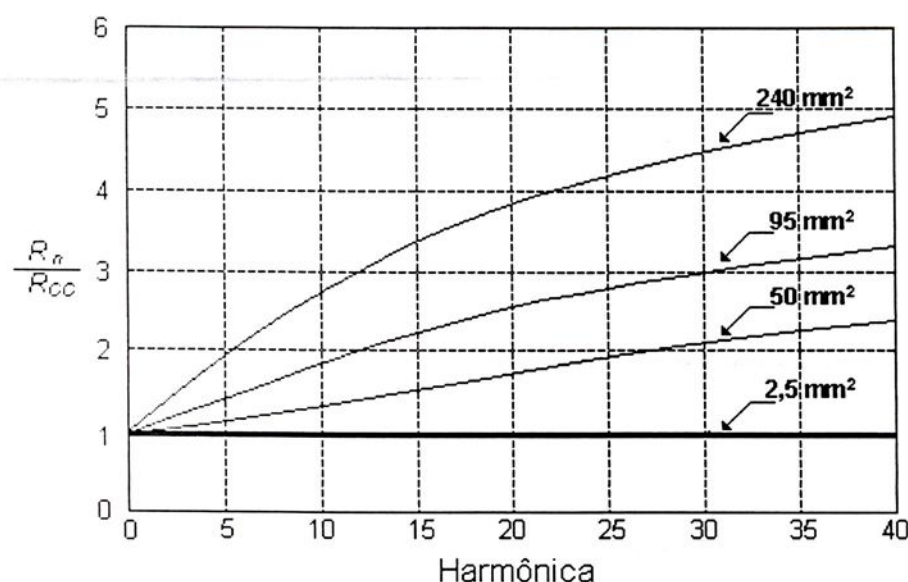


Figura III.1 – Relação entre as resistências CA e CC em função da frequência para condutores de diferentes seções

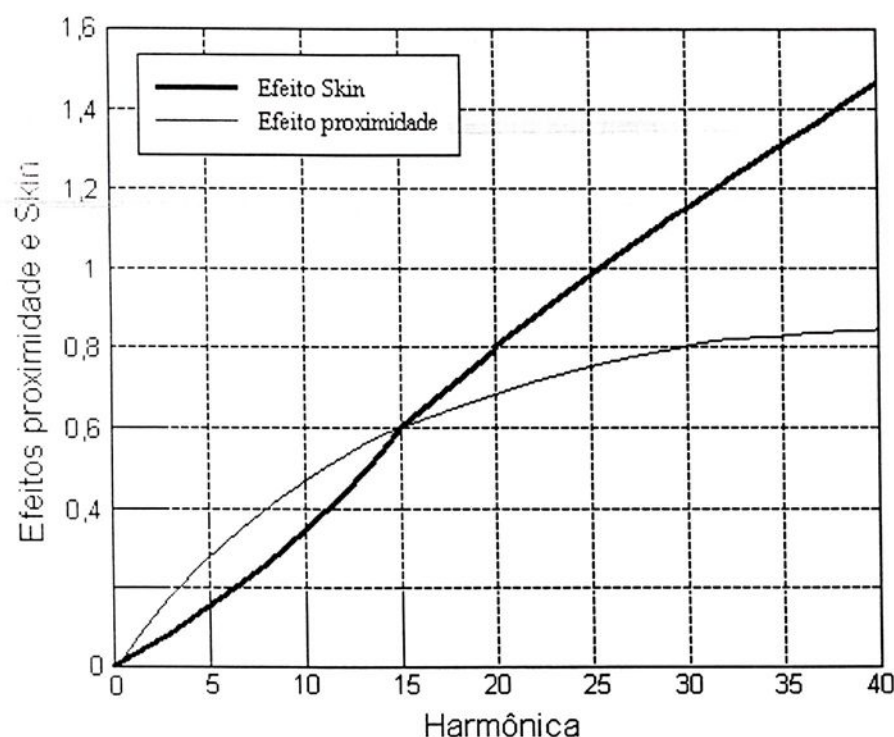


Figura III.2 – Efeitos Skin e Proximidade em função da frequência para um condutor de seção circular 95 mm².

É importante observar que a precisão da modelagem desses efeitos é muito importante para estimar o aumento das perdas Joule devido às altas resistências dos enrolamentos para frequências elevadas. Entretanto, como a maioria dos transformadores possui pequenas seções transversais dos enrolamentos de alta tensão, os efeitos podem ser considerados

desprezíveis para esses enrolamentos. Contrariamente, os enrolamentos de baixa tensão possuem maiores secções transversais, estes, portanto, tem maior sensibilidade ao efeito. A figura III.3 ilustra as variações das resistências ôhmicas dos enrolamentos de alta e baixa tensão em função da frequência para um transformador Siemens de 300 KVA

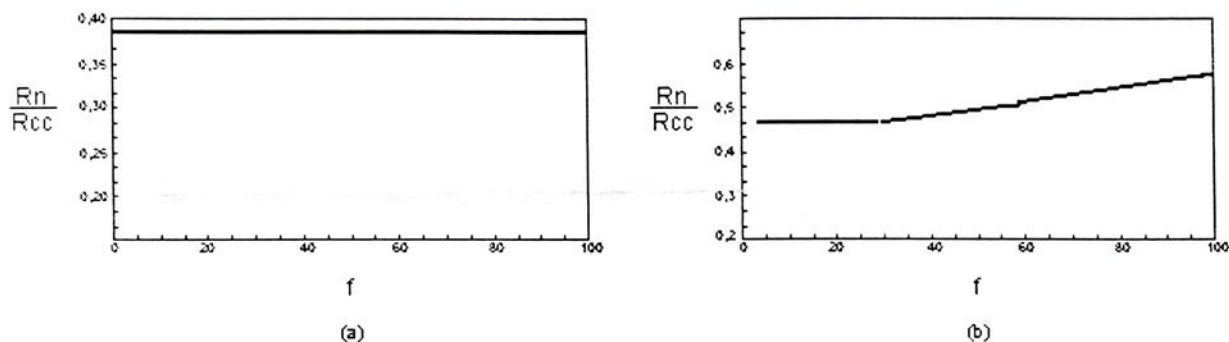


Figura III.3 – (a) Resistência do enrolamento de alta tensão em função da frequência;

(b) Resistência do enrolamento de baixa tensão em função da frequência

A título de ilustração, na figura III.4 mostra-se, para o mesmo transformador, que a reatância de dispersão tem um comportamento linear com a frequência, o que sugere que ela é pouco ou nada afetada pela variação da mesma.

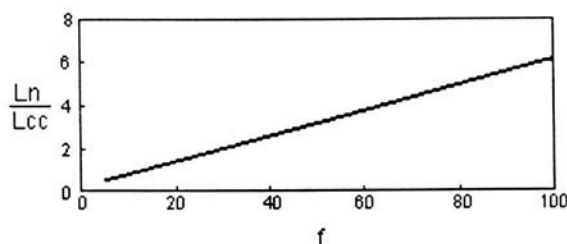


Figura III.4 – Reatância de dispersão em função da frequência;

III.2.1 EFEITOS DA FREQUÊNCIA NAS RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR.

Para um condutor retilíneo de secção circular, muitas são as expressões propostas para corrigir a resistência com a frequência. Faz-se então a seguir uma listagem das formulações existentes e suas diferenças.

FORMULAÇÃO 01: Sugerida por W. D. Stevenson na segunda edição do livro "Elements of Power System Analysis" da editora McGraw Hill Company em 1962.

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = \frac{mr}{2} \cdot \frac{ber(mr) \cdot bei'(mr) - bei(mr) \cdot ber'(mr)}{[bei'(mr)]^2 + [ber'(mr)]^2} \quad (III.1)$$

Sendo:

- $mr = 15,84 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{rc} \cdot n \cdot f}{R_{CC}}}$
- R_n a resistência do condutor na frequência nf , onde n é a ordem harmônica.
- R_{CC} a resistência do condutor à corrente contínua [Ω/m];
- ber a parte real da função de Bessel;
- bei a parte imaginária da função de Bessel;
- ber' a derivada de ber ;
- bei' a derivada de bei ;
- μ_{rc} a permeabilidade relativa do cobre.

A figura III.5 mostra a relação $\frac{R_n}{R_{CC}}$ para diferentes valores de mr .

FORMULAÇÃO 02: Sugerida por J. C. Oliveira Et. Al. na apostila "Cargas Elétricas Especiais" editada pela UFU em 1986.

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = 1 + 8,522 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{nf}{R_{CC}}\right)^2 - 5,81 \times 10^{-15} \cdot \left(\frac{nf}{R_{CC}}\right) \text{ para } 0 < \frac{nf}{R_{CC}} \leq 1350 \quad (III.2a)$$

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = 0,25 + 0,255 \cdot \sqrt{\frac{nf}{R_{CC}}} + 2,0846 \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{nf}{R_{CC}}}} \text{ para } \frac{nf}{R_{CC}} > 1350 \quad (III.2b)$$

FORMULAÇÃO 03: Sugerida por J. C. Oliveira Et. Al. na apostila "Cargas Elétricas Especiais" editada pela UFU em 1986 e também por F.A C. Pires em sua tese de doutorado na UNICAMP chamada "Uma contribuição ao estudo de harmônicas em Sistemas de Potência" em 1991.

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = \sqrt{n} \quad (\text{III.3})$$

FORMULAÇÃO 04: Também sugerida por J. C. Oliveira Et. Al. na apostila "Cargas Elétricas Especiais" editada pela UFU em 1986.

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (\text{III.4})$$

FORMULAÇÃO 05: Sugerida por F.A C. Pires em sua tese de doutorado na UNICAMP chamada "Uma contribuição ao estudo de harmônicas em Sistemas de Potência" em 1991.

$$\frac{R_n}{R_{CC}} = n^{0,9} \quad (\text{III.5})$$

FORMULAÇÃO 06: Sugerida pela SIEMENS S/A – TUSA em "Informações Técnicas".

$$R_n(s) = R_{CC}(s) \cdot [1 + 3,039 \times 10^{-2} \cdot n^2] \quad \text{para transformadores de 150 KVA} \quad (\text{III.6a})$$

$$R_n(s) = R_{CC}(s) \cdot [1 + 3,129 \times 10^{-2} \cdot n^2] \quad \text{para transformadores de 300 KVA} \quad (\text{III.6b})$$

Nota-se que há muita discrepância entre as formulações sugeridas nas várias referências, de modo que essas recomendações são muito discutíveis, não ensejando qualquer generalidade suficiente para se adotada sem restrições. Dessa forma, a escolha da melhor formulação depende do fim ao qual ela servirá.

III.2.2 EFEITOS DA FREQUÊNCIA NAS INDUTÂNCIAS DOS ENROLAMENTOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR.

Para um condutor retilíneo de secção circular, a seguinte expressão é sugerida por W. D. Stevenson (mesmo que sugere a formulação III.1 para a correção da resistência) para a correção da indutância com a frequência.

$$\frac{L_n}{L_{CC}} = \frac{4}{mr} \cdot \frac{bei(mr) \cdot bei'(mr) - ber(mr) \cdot ber'(mr)}{[bei'(mr)]^2 + [ber'(mr)]^2} \quad (III.7)$$

Sendo:

- $mr = 15,84 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{rc} \cdot n \cdot f}{R_{CC}}}$
- L_n a indutância do condutor na frequência nf ;
- L_{CC} a indutância do condutor à corrente contínua [Ω/m];
- ber a parte real da função de Bessel;
- bei a parte imaginária da função de Bessel;
- ber' a derivada de ber ;
- bei' a derivada de bei ;
- μ_{rc} a permeabilidade relativa do cobre.

A figura III.6 mostra a relação $\frac{L_n}{L_{CC}}$ para diferentes valores de mr .

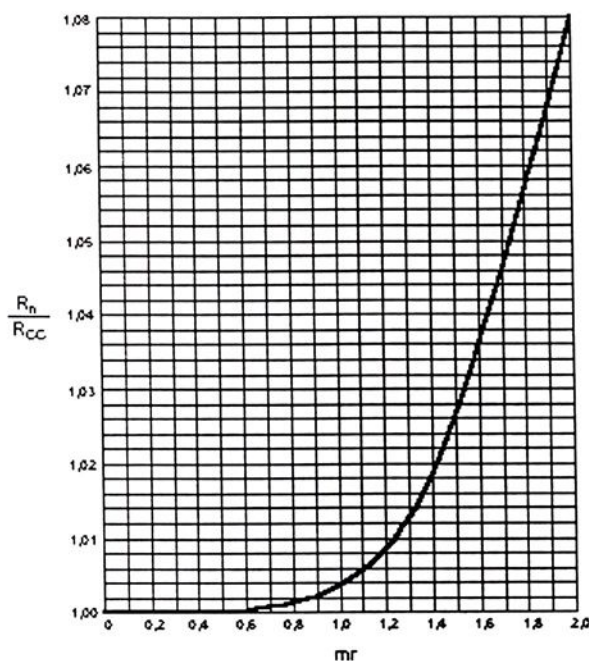
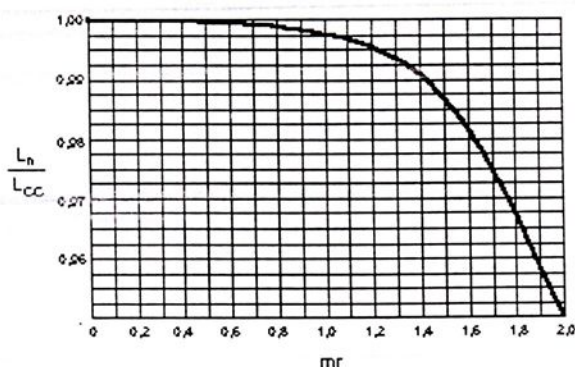


Figura III.5 – Relação R_n/R_{CC} para diferentes valores de mr .


Figura III.6 – Relação L_h/L_{cc} para diferentes valores de mr .

III.3 UMA OUTRA FORMA DE ANALISAR OS EFEITOS DA FREQUÊNCIA NAS IMPEDÂNCIAS DOS ENROLAMENTOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR

Não obstante às formulações apresentadas anteriormente, uma outra forma de analisar a interdependência das resistências e reatâncias dos enrolamentos de alta e baixa tensão em função da frequência pode ser reproduzida razoavelmente no circuito da figura III.7.

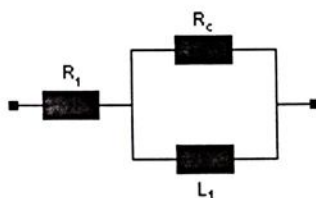


Figura III.7 – Circuito equivalente.

O circuito equivalente sugerido consta dos elementos R_1 e L_1 , que são a resistência e a indutância de dispersão na frequência nominal e da resistência R_c , em paralelo com L_1 , que é responsável pela produção de um efeito equivalente à dependência dos parâmetros com a frequência.

As partes real e imaginária da impedância de dispersão dos enrolamentos de alta e baixa tensão são calculadas através das expressões III.8 e III.9.

$$R(f) = \left(R_1 + \frac{R_c \cdot (\omega L_1)^2}{R_c^2 + (\omega L_1)^2} \right) \quad (\text{III.8})$$

$$X(f) = \left(\frac{R_c^2 \cdot (\omega L_1)}{R_c^2 + (\omega L_1)^2} \right) \quad (\text{III.9})$$

Sendo constantes os valores de R_1 e L_1 e, conhecendo-se o comportamento de $R(f)$, pode-se determinar o valor de R_c . Admitindo-se que o valor da resistência do enrolamento para a frequência f_n seja R_n em III.8 obtém-se a expressão III.10, cuja solução fornece o valor de R_c .

$$R_c^2 - \frac{(\omega_n L_1)^2}{R_n - R_1} \cdot R_c + (\omega_n L_1)^2 = 0 \quad (\text{III.10})$$

Dessa forma, o circuito equivalente para transformadores monofásicos considerando-se o efeito da variação da frequência passa a ser aquele mostrado na figura III.8, onde R_{cp} e R_{cs} são as resistências que incorporam tal efeito.

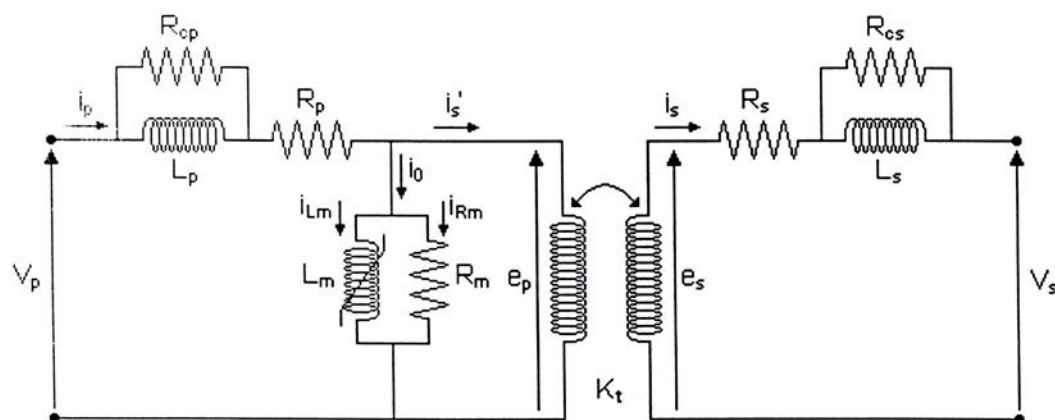


Figura III.8 – Circuito elétrico equivalente considerando a variação da resistência dos enrolamentos primário e secundário com a frequência

CAPÍTULO IV - FONTES DE AQUECIMENTO NO TRANSFORMADOR QUANDO OPERANDO SOB CONDIÇÕES DISTORCIDAS

IV.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sob condições senoidais de operação, as relações entre as tensões e perdas no núcleo, bem como entre corrente e perdas nos enrolamentos são bem conhecidas. Entretanto, quando esses equipamentos operam sob o impacto de sinais elétricos distorcidos essas relações devem ser reavaliadas.

O presente capítulo tem como objetivo observar os efeitos das distorções harmônicas nas perdas do transformador e sua influência no aquecimento do mesmo.

IV.2 PERDAS NO FERRO SOB CONDIÇÕES DE TENSÃO NÃO SENOIDAIS

Um transformador operando sob condições senoidais, com uma excitação de frequência f , tem suas perdas totais no ferro calculadas através da expressão IV.1.

$$P_{FE} = P_H + P_F = \eta \cdot f \cdot B_{max}^s + \lambda \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \quad (IV.1)$$

Sendo:

- P_H as perdas provocadas pela histerese do material magnético do núcleo;
- P_F as perdas causadas pelas correntes de Foucalt;
- η, λ constantes dependentes do material do núcleo;
- f a frequência do sinal aplicado;
- B_{max} o valor máximo da densidade de fluxo magnético;
- s um expoente dependente do material do núcleo. Para os materiais mais comumente usados s varia de 1,5 à 2,5.

Nos transformadores de distribuição operando com frequência de 60Hz as perdas por correntes parasitas (Foucalt) tendem a ser menores em relação às perdas por histerese ficando na ordem de 20 a 50% das perdas totais no ferro, dependendo é claro dos materiais empregados e a forma de fabricação do transformador.



Entretanto, faz-se necessária a adaptação da equação IV.1 para condições não senoidais de operação, ou seja para o caso em que as excitações dos transformadores sejam distorcidas.

O conhecimento e a análise das formas de onda distorcidas podem ser estudados através da ferramenta oferecida pelo postulado de Fourier. Dessa forma, a análise é um processo de cálculo através do qual são obtidas as amplitudes e fases da componente harmônica fundamental e das componentes múltiplas.

A grande vantagem da utilização dessa técnica é que, para sistemas lineares, cada componente harmônica pode ser considerada separadamente, e a distorção final determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido. Dessa forma, os sistemas elétricos sujeitos a alimentação não senoidal, podem ser tratados considerando individualmente o efeito de cada componente harmônica.

Realiza-se, então, a seguir a análise isolada dos efeitos associados à histerese e correntes de Foucault.

PERDAS POR HISTERESE

Considere-se uma tensão distorcida, com zero simples¹ para $\omega t = 0$ e $\omega t = \pi$, ou seja $v(0)=v(\pi)=0$, tal como ilustrado na figura IV.1.

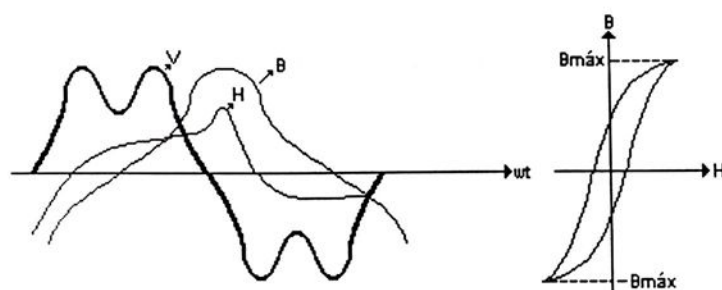


Figura IV.1 – Tensão distorcida com zero simples e seu respectivo laço de histerese.

Nessas condições, a densidade de fluxo magnético $B(\omega t)$ é expressa por:

$$B(\omega t) = k_1 \cdot \int v(\omega t) \cdot d\omega t \quad (\text{IV.2})$$

Sendo:

¹ Ondas de tensão com zeros múltiplos, que introduzem ciclos internos ao laço de histerese, são encontradas muito raramente na prática, de modo que não se faz necessária a sua análise.

- $k_1 = \frac{1}{2NS\omega}$ uma constante de proporcionalidade;
- N o número de espiras do enrolamento;
- S a área da secção transversal do núcleo;
- $\omega = 2\pi f$ a velocidade angular.
- A tensão distorcida $v(\omega t)$ em sua forma mais geral é dada pela equação IV.3.

$$v(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{IV.3})$$

Sendo:

- V_n o valor eficaz da harmônica de ordem n ;
- φ_n a fase da harmônica de ordem n ;

Assim, a densidade de fluxo instantânea para cada uma das componentes harmônicas da tensão distorcida é dada por:

$$B(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{2NS\omega} \cdot \frac{V_n}{n} \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{IV.4})$$

A amplitude da curva de indução magnética pode então ser determinada pela equação IV.5.

$$B_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{NS\omega} \cdot \frac{V_n}{n} \cdot \cos \varphi_n \quad (\text{IV.5})$$

Assim, as perdas por histerese referentes às contribuições individuais de cada harmônica são dadas por:

$$P_{Hn} = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^s = \eta f \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{NS\omega} \cdot \frac{V_n}{n} \cdot \cos \varphi_n \right)^s \quad (\text{IV.6})$$

Fazendo $n=1$ na equação IV.6, obtém-se as perdas por histerese na frequência fundamental.

$$P_{H1} = \eta f \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{NS\omega} \cdot V_1 \right)^s \quad (\text{IV.7})$$

Dividindo-se a expressão IV.6 por IV.7, e somando-se os efeitos de cada componente harmônica, obtém-se as perdas por histerese para condições não senoidais em função das perdas na frequência fundamental.

$$\frac{P_{HN}}{P_{H1}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{V_n}{V_1} \cdot \cos \varphi_n \right)^s = \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{V_n}{V_1} \cdot \cos \varphi_n \right)^s \right] \quad (\text{IV.8})$$

Sendo:

- P_{HN} as perdas por histerese para um suprimento distorcido;
- P_{H1} as perdas por histerese na frequência fundamental;
- n a ordem harmônica;
- V_n a tensão eficaz do n -ésimo harmônico;
- V_1 o valor eficaz da tensão fundamental;
- φ_n a fase do n -ésimo harmônico.

PERDAS POR CORRENTES DE FOUCALT

Considere-se a mesma onda de tensão considerada no momento da análise das perdas por histerese. Nessas condições, o valor da amplitude da indução magnética B_{max} para cada componente harmônica ainda pode ser representado pela equação IV.5, reescrita a seguir.

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2}}{NS\omega} \cdot \frac{V_n}{n} \cdot \cos \varphi_n$$

Entretanto, para as harmônicas de alta frequência, as correntes parasitas fazem com que a indução magnética não seja uniforme, apresentando-se maior nas extremidades das chapas do material do núcleo. Esse fenômeno implica na redução das perdas parasitas, e é considerado pela inclusão do parâmetro C_{en} nas expressões apresentadas a seguir.

$$P_F = \lambda \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \quad (\text{IV.9})$$

$$P_{Fn} = .n^2 \cdot \lambda \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \cdot C_{en} \quad (\text{IV.10})$$

Sendo:

$$C_{en} = \begin{cases} 1 - 0,0017\xi^{3,61} & \text{se } \xi < 3,6 \\ \frac{3}{\xi} & \text{se } \xi > 3,6 \end{cases}$$

$$\xi = \Delta \cdot \sqrt{\pi\mu\gamma n f}$$

- P_{Fn} as perdas por correntes parasitas para a harmônica de ordem n ;
- μ a permeabilidade magnética do núcleo;
- γ a condutividade elétrica do núcleo;
- Δ a espessura da chapa do núcleo;
- n a ordem harmônica da tensão;
- f a frequência da fundamental.

Para a frequência da fundamental, o termo C_{en} é igual a 1,0 e as perdas por correntes parasitas são dadas pela equação IV.9 substituindo-se nela a expressão de B_{max} . Assim:

$$P_{F1} = \lambda \cdot f^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{NS\omega} \cdot V_1 \right)^2 \quad (\text{IV.11})$$

Para uma tensão não senoidal, as perdas por correntes parasitas são dadas pela equação IV.10 substituindo-se o valor de B_{max} . Assim:

$$P_{Fn} = n^2 \cdot \lambda \cdot f^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{NS\omega} \cdot \frac{V_n}{n} \cdot \cos \varphi \right)^2 \cdot C_{en} \quad (\text{IV.12})$$

Dividindo-se a equação IV.12 pela IV.11 e somando-se as contribuições individuais, obtém-se o aumento das perdas por correntes de Foucault devido às condições não senoidais de operação.

$$\frac{P_{FN}}{P_{F1}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \cdot \cos \varphi \right)^2 \cdot C_{en} \quad (\text{IV.13})$$

IV.3 PERDAS NOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES SUJEITOS À CORRENTES NÃO SENOIDAIS

As perdas nos enrolamentos dos transformadores são muito importantes para analisar o seu desempenho térmico.

Considere-se um transformador alimentando uma carga não linear. As perdas no cobre deste podem ser calculadas utilizando-se o princípio da superposição. Assim:

$$P_{JN} = P_{JN}(p) + P_{JN}(s) \quad (IV.14)$$

Sendo:

- P_{JN} as perdas totais nos enrolamentos dos transformadores sob sinais distorcidos.
- $P_{JN}(p)$ as perdas totais no enrolamento primário sob sinais distorcidos.
- $P_{JN}(s)$ as perdas totais no enrolamento secundário sob sinais distorcidos

Nessas condições:

$$P_{JN} = \left\{ \left[\sum_0^{\infty} R_n(p) \cdot I_n^2(p) + \sum_0^{\infty} R_n(s) \cdot I_n^2(s) \right] + P_{EC} \right\} \cdot C(t) \quad (IV.15)$$

Sendo:

- $R_n(p)$ a resistência do enrolamento primário para o n-ésimo harmônico à temperatura ambiente;
- $R_n(s)$ a resistência do enrolamento secundário para o n-ésimo harmônico à temperatura ambiente;
- $I_n(p)$ o valor eficaz da n-ésima corrente harmônica no primário;
- $I_n(s)$ o valor eficaz da n-ésima corrente harmônica no secundário;
- n a ordem harmônica da corrente;
- P_{EC} perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para condições não senoidais;
- $C(t)$ é o fator de correção da resistência com a temperatura.

Em condições senoidais de operação, as perdas no cobre podem são:

$$P_{J1} = R_1(p) \cdot I_1^2(p) + R_1(s) \cdot I_1^2(s)$$

Como $I_1(p) = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_1(s) = \alpha \cdot I_1(s)$ então:

$$P_{j1} = R_1(p)\alpha^2 \cdot I_1^2(s) + R_1(s) \cdot I_1^2(s)$$

$$P_{j1} = (R_1(p)\alpha^2 + R_1(s)) \cdot I_1^2(s)$$

Mas $(R_1(p)\alpha^2 + R_1(s)) = R_{eqcc}$ referida ao lado secundário do transformador. Assim:

$$P_{j1} = R_{eqcc} I_1^2(s) \quad (IV.16)$$

Dividindo-se (IV.15) por (IV.16) tem-se:

$$\frac{P_{jN}}{P_{j1}} = \left\{ \frac{\sum_1^n (R_n(p)\alpha^2 + R_n(s)) \cdot I_n^2(s)}{R_{eqcc} \cdot I_1^2(s)} + \frac{P_{EC}}{P_{j1}} \right\} \cdot C(t)$$

Rearranjando

$$\frac{P_{jN}}{P_{j1}} = \left\{ \frac{\sum_1^n (R_{eqn}) \cdot I_n^2(s)}{R_{eqcc} \cdot I_1^2(s)} + \frac{P_{EC}}{P_{j1}} \right\} \cdot C(t)$$

Ou

$$\frac{P_{jN}}{P_{j1}} = \left\{ \sum_1^n \frac{R_{eqn}}{R_{eqcc}} \cdot \left(\frac{I_n(s)}{I_1} \right)^2 + \frac{P_{EC}}{P_{j1}} \right\} \cdot C(t) \quad (IV.17)$$

PERDAS ADICIONAIS NOS TRANSFORMADORES SUBMETIDOS À CORRENTES NÃO SENOIDAIS

A literatura clássica estabelece que as perdas nos enrolamentos de um transformador são compostas de duas parcelas. A primeira representa as perdas na resistência dos

enrolamentos. A segunda está associada às perdas adicionais, que são compostas, principalmente, pelas perdas magnéticas e pelas perdas no cobre devido ao fluxo de dispersão.

A componente das perdas no cobre que está relacionada com a circulação de correntes parasitas produzidas nos condutores pelo fluxo de dispersão é denominada perdas suplementares. Estas perdas dependem da corrente, do carregamento elétrico e da geometria dos condutores das bobinas. Sua determinação analítica não é simples, entretanto sua contribuição para as perdas totais no cobre, quando da operação normal dos transformadores é relativamente pequena. Nos ensaios experimentais para a determinação das perdas no cobre, as perdas suplementares são obtidas juntamente com as perdas no cobre, essas perdas são da ordem de 0,12% a 0,46% das perdas Joule nominais, dependendo das dimensões e do projeto do transformador.

A determinação analítica da variação dessas perdas com a frequência, do ponto de vista qualitativo, de acordo com a referência [15], deve considerar os cálculos apresentados na norma "Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents" da ANSI/IEEE como bons indicadores da influência da frequência nas perdas adicionais.

De acordo com essa referência, as perdas suplementares são oriundas de fugas do fluxo eletromagnético nos componentes do transformador, e são divididas em duas parcelas. Uma que ocorre nos enrolamentos propriamente ditos, chamada de perdas por correntes parasitas P_{EC} . E outra que ocorre nas partes estruturais, tais como núcleo, carcaça e paredes do tanque, chamada de perdas adicionais nas partes metálicas P_{OSL} . Essa última é geralmente de pequena magnitude, podendo ser desprezada sem grande prejuízo às perdas totais nos enrolamentos.

Assim, admitindo-se a circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos do transformador, as perdas por correntes parasitas pode ser calculada pela expressão IV.16.

$$P_{EC} = P_{EC1} \cdot \sum_{n=1}^{n_{max}} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \cdot n^2 \quad (\text{IV.16})$$

Sendo:

P_{EC1} as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para a frequência fundamental;

I_n o valor eficaz da n-ésima corrente harmônica;

I_1 o valor eficaz da componente fundamental da corrente.

Seguindo a referência [15], deve-se salientar que a expressão (IV.16) tem maior precisão para harmônicos de baixa ordem. Entretanto, no caso de transformadores de grande porte, conduzindo correntes com alto conteúdo harmônico, a relação pode levar a uma superestimativa das perdas.



CAPÍTULO V - CÁLCULO DAS TEMPERATURAS INTERNAS DO TRANSFORMADOR

V.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cálculo da perda de vida é essencialmente uma função do envelhecimento do material isolante, que depende diretamente da temperatura do enrolamento do transformador. Por essa razão desenvolveram-se fórmulas que relacionam perda de vida com a temperatura do enrolamento. Temperatura esta que deve ser estabelecida por seu valor médio e pela temperatura do ponto mais quente (ponto do enrolamento onde a temperatura é mais elevada), ou "Hottest Spot".

As temperaturas máximas do óleo e do ponto quente variam de acordo com a potência fornecida pelo transformador.

Entretanto, conforme visto no capítulo II, os consumidores variam a potência elétrica solicitada a cada instante do dia, o que resulta também na variação das temperaturas do transformador.

Mas, para qualquer transformador instalado pode-se definir uma curva diária de carga (KW x tempo) e uma curva diária de temperatura ambiente (°C x tempo). Esses dois fatores determinam uma curva de temperatura do ponto mais quente no tempo.

Para cada instante "t" do dia, a temperatura do ponto mais quente de um transformador é obtida através da soma de três parcelas:

$$T_{hs}(t) = G_{hs}(t) + G_o(t) + T_a(t) \quad (V.1)$$

Sendo:

- $T_{hs}(t)$ a temperatura no ponto mais quente no instante t em °C.
- $G_{hs}(t)$ a elevação da temperatura do ponto mais quente em relação à temperatura do topo do óleo no instante t em °C.
- $G_o(t)$ a elevação da temperatura do topo do óleo em relação à temperatura ambiente no instante t em °C.
- $T_a(t)$ a temperatura ambiente no instante t em °C.
-

Analisa-se a seguir cada uma dessas parcelas.



V.2 CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM RELAÇÃO À TEMPERATURA AMBIENTE (G_o)

V.2.1 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO ÓLEO ACIMA DA AMBIENTE - REGIME PERMANENTE

O óleo terá uma temperatura que dependerá do calor gerado e do sistema de refrigeração do transformador e da temperatura ambiente.

Em uma superfície a G_s °C (acima da temperatura ambiente), o calor emitido por centímetro quadrado W_s é proporcional a G_s elevado a um expoente n [1]. Tal expoente leva em consideração cor, forma da superfície, condições de refrigeração, etc.

Assim:

$$W_s = k_1 G_s^n$$

Sendo:

- W_s o calor emitido por cm^2 .
- K_1 uma constante de proporcionalidade.
- G_s a elevação da temperatura da superfície sobre a temperatura ambiente.
- n um expoente que depende da forma e posição da superfície.

Deduzindo G_s em função de W_s , tem-se:

$$G_s = \frac{1}{k_1} \cdot W_s^{1/n}$$

Ou

$$G_s = k_2 \cdot W_s^m$$

Sendo

- $k_2 = \frac{1}{k_1}$
- $m = \frac{1}{n}$

Pode-se modificar k_2 de modo a incluir a superfície do transformador e a diferença entre a temperatura média e a máxima do óleo. Dessa forma, pode-se reescrever a equação acima como:

$$G_{oreg} = k_3 \cdot W^m$$

Sendo:

- G_{oreg} a elevação da temperatura máxima do óleo sobre a ambiente.

- W a perda total do transformador, em Watts.
- K_3 uma constante de proporcionalidade.
- n um coeficiente que depende do tipo de refrigeração empregada no transformador.

Em funcionamento nominal a elevação da temperatura do óleo acima da ambiente é conhecida e pode ser escrito como:

$$G_{opc} = k_3 \cdot W_{pc}^m$$

Sendo:

- G_{opc} a elevação da temperatura máxima do óleo acima da ambiente para carga nominal, em °C.
- W_{pc} a perda total para carregamento nominal em Watts.

Dividindo membro a membro as equações de G_{oreg} e G_{opc} tem-se:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{W}{W_{pc}} \right)^m$$

As perdas totais nos transformadores são compostas por duas parcelas, uma no ferro W_{Fe} que depende da tensão aplicada, e outra no cobre W_{Cu} que depende da corrente circulante. Assim:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{W_{Fe} + W_{Cu}}{W_{Fe pc} + W_{Cu pc}} \right)^m \quad (V.2)$$

Sendo:

- W_{Cu} as perdas no cobre em Watts para o carregamento considerado.
- W_{Fe} as perdas no ferro em Watts para o carregamento considerado.
- $W_{Cu pc}$ as perdas no cobre à plena carga em Watts.
- $W_{Fe pc}$ as perdas no ferro à plena carga em Watts.

V.2.2 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO ÓLEO ACIMA DA AMBIENTE – TRANSITÓRIO

Num instante "t" a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente é $G_o(t)$. Num intervalo infinitesimal de tempo será:

$$G_o(t + dt) = G_o(t) + dG_o$$

Pelo princípio da conservação da energia tem-se:

$$CALOR \text{ GERADO} = CALOR \text{ ARMAZENADO} + CALOR \text{ DISSIPADO}$$

$$Wdt = K_d \cdot S_d \cdot G_o \cdot dt + C_t \cdot dG_o$$

Sendo:

- W é a potência dissipada, admitida constante no intervalo dt .
- K_d é o coeficiente de dissipação de calor para o meio ambiente.
- S_d é a superfície de dissipação de calor para o meio ambiente.
- C_t é a capacidade térmica do transformador.

A integração da equação anterior entre dois instantes H_i e H_f (inicial e final, respectivamente) de um intervalo leva à:

$$G_o(t) = [G_{oreg} - G_o(H_i)] \cdot \left(1 - e^{-t/T_o}\right) + G_o(H_i) \quad (V.3)$$

Conhecendo-se então as expressões V.2 e V.3 pode-se particulariza-las para caracterização do aumento da temperatura do topo do óleo em relação a ambiente para o funcionamento do transformador com carregamento senoidal e não senoidal.

V.2.3 CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO ÓLEO ACIMA DA AMBIENTE EM TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ONDAS PURAMENTE SENOIDAIS

REGIME PERMANENTE

Como a tensão aplicada ao transformador é praticamente constante, pode-se admitir que as perdas no ferro não variam com a carga que passa pelo transformador. Assim a equação V.2 pode ser reescrita como:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{W_{Fepc} + W_{Cu}}{W_{Fepc} + W_{Cupc}} \right)^m \quad (V.4)$$

As perdas no cobre em um transformador monofásico, pelo princípio da superposição serão dadas por:

$$W_{cu} = R_p I_p^2 + R_s I_s^2$$

Sendo:

- R_p a resistência do enrolamento primário em ohms.
- I_p a corrente no enrolamento primário em A.
- R_s a resistência do enrolamento secundário em ohms.
- I_s a corrente no enrolamento secundário em A.

Como $I_p = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_s = \alpha \cdot I_s$ então:

$$W_{cu} = R_p \alpha^2 I_s^2 + R_s I_s^2$$

$$W_{cu} = (R_p \alpha^2 + R_s) I_s^2$$

Mas $(R_p \alpha^2 + R_s) = R_{eq}$ referida ao lado secundário do transformador. Assim:

$$W_{cu} = R_{eq} I_s^2$$

Em plena carga as perdas no cobre são dadas por:

$$W_{cupc} = R_{eq} I_{spc}^2$$

Dividindo as perdas no cobre para um carregamento qualquer pelas perdas no cobre a plena carga tem-se:

$$\frac{W_{Cu}}{W_{Cupc}} = \left(\frac{I_s}{I_{spc}} \right)^2$$

Como a corrente é proporcional à potência aparente, se a tensão for mantida constante, vem que

$$\frac{W_{Cu}}{W_{Cupc}} = \left(\frac{S}{S_{nom}} \right)^2$$

Sendo:

- S a potência fornecida pelo transformador em KVA.
- S_{nom} a potência nominal do transformador em KVA.

Chamando de K a relação de potências, tem-se

$$W_{Cu} = K^2 W_{Cupc}$$

O que substituindo em V.4 leva a:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{W_{Fepc} + K^2 W_{Cupc}}{W_{Fepc} + W_{Cupc}} \right)^m$$

E que pode ser reescrita como:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} \right)^m$$

Sendo $R = \frac{W_{Cupc}}{W_{Fepc}}$.

Essa fórmula é válida para uma resistência constante do enrolamento. Entretanto, com o aumento da temperatura do transformador há uma variação da resistência do enrolamento. Dessa forma deve-se incluir na formulação anterior um fator C de correção da resistência que leve em conta esse efeito na perda do cobre. Assim:



$$G_{oreg}(t) = G_{opc} \cdot \left[\frac{1 + C(t) \cdot K(t)^2 \cdot R}{1 + R} \right]^n \quad (V.5)$$

TRANSITÓRIO

Calculado o valor da elevação da temperatura do óleo acima da ambiente em regime permanente, e substituindo-se esse valor na equação V.3 obtêm-se a expressão para o cálculo da elevação da temperatura do óleo acima da ambiente final.

$$G_o(t) = [G_{oreg} - G_{oi}] \cdot \left(1 - e^{-t/T_o(t)} \right) + G_{oi} \quad (V.6)$$

Sendo:

- $G_o(t)$ valor final da elevação da temperatura do óleo acima da ambiente no instante t em °C.
- G_{oreg} elevação da temperatura do óleo acima da ambiente em regime no instante t em °C.
- G_{oi} a elevação da temperatura do óleo acima da ambiente inicial em °C.
- $T_o(t)$ a constante de tempo de aquecimento do óleo no instante t em horas.

V.2.4 CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO ÓLEO ACIMA DA AMBIENTE EM TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ONDAS DISTORCIDAS

REGIME PERMANENTE

A elevação da temperatura final do óleo do transformador, operando em regime permanente com ciclo de carga constante e genérico, também pode ser avaliada através da equação V.2, reescrita a seguir:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{W_{Fe} + W_{Cu}}{W_{Fepc} + W_{Cupc}} \right)^m$$

As perdas no ferro são compostas pela componente das perdas por corrente de Foucault e pela componente das perdas por histerese conforme já foi visto no Capítulo IV.

Quando está submetido a carregamentos não lineares, deve-se levar em conta a contribuição das harmônicas no cálculo dessas perdas. Assim, a equação V.2 pode ser reescrita como:

$$\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} = \left(\frac{P_{FN} + P_{HN} + P_{JN}}{P_{Fe1} + P_{j1}} \right)^m \quad (V.7)$$

Sendo:

- G_{opc} a elevação da temperatura do topo do óleo sobre a ambiente com carga linear e nominal.
- P_{JN} as perdas totais nos enrolamentos dos transformadores sob sinais distorcidos.
- P_{FN} as perdas totais por correntes parasitas no núcleo sob sinais distorcidos.
- P_{HN} as perdas totais por histerese no núcleo sob sinais distorcidos.
- P_{FE1} as perdas no ferro nominais para condição senoidal.
- P_{j1} as perdas no cobre nominais para condição senoidal.

As perdas no núcleo e nos enrolamentos sob sinais distorcidos são calculadas de acordo com as formulações encontradas no Capítulo IV.

REGIME TRANSITÓRIO

Para alcançar a elevação final da temperatura do óleo, o comportamento transitório térmico também pode ser expresso pela equação V.3. Assim:

$$G_o(t) = [G_{oreg} - G_{oi}] \cdot \left(1 - e^{-t/T_o(t)} \right) + G_{oi} \quad (V.8)$$

V.3 CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE EM RELAÇÃO À TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO (G_{HS})

V.3.1 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO ÓLEO ACIMA DA AMBIENTE - REGIME PERMANENTE

A elevação da temperatura de uma bobina ou de uma série de bobinas, sobre a do óleo não é uniforme, mas varia de ponto a ponto em virtude do estabelecimento de gradientes ao longo dos caminhos do fluxo de calor. Por facilidade e padronização, assume-se que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento exceda a temperatura média do óleo em 10 °C, e de fato, na maioria dos casos ela está entre 5 e 6 °C.

Entretanto, sob condições de sobrecarga ou condições não senoidais de operação, a temperatura do ponto quente aumenta, podendo eventualmente exceder os 10 °C.

De acordo com Augusto Ferreira Brandão Júnior [1] a elevação da temperatura do ponto quente sobre a média do enrolamento obedece a mesma lei que a elevação da temperatura do óleo sobre a ambiente. Assim, a mesma equação pode ser usada:

$$G_{hsreg} = k_4 \cdot W_{Cu}^m$$

Sendo:

- G_{hsreg} a elevação da temperatura do enrolamento acima da temperatura do óleo em regime permanente
- W_{Cu} as perdas no enrolamento em Watts
- m expoente de refrigeração. Para transformadores com resfriamento natural $m=0,8$.

Analogamente ao cálculo do aumento da temperatura do óleo acima da ambiente, dividindo-se a expressão do aumento da temperatura do enrolamento G_{hsreg} para um carregamento qualquer, pela expressão do aumento da temperatura do enrolamento para carregamento nominal G_{hsnc} , tem-se:

$$\frac{G_{hsreg}}{G_{hsnc}} = \left(\frac{W_{Cu}}{W_{Cu nc}} \right)^m \quad (V.9)$$

V.3.2 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO ÓLEO ACIMA DA AMBIENTE – TRANSITÓRIO

Analogamente ao aumento da temperatura do óleo, o valor final do aumento da temperatura do enrolamento é dado por:

$$G_{hs}(t) = [G_{hsreg} - G_{hs}(H_i)] \cdot \left(1 - e^{-t/T_e} \right) + G_{hs}(H_i) \quad (V.10)$$

Sendo:

- $G_{hs}(t)$ valor final da elevação da temperatura do enrolamento acima da do óleo no instante t em °C.
- G_{hsreg} elevação da temperatura do enrolamento acima da do óleo em regime no instante t em °C.
- G_{hsi} a elevação da temperatura do enrolamento acima da do óleo inicial em °C.
- $T_e(t)$ a constante de tempo de aquecimento do enrolamento no instante t em horas.

V.3.3 TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ONDAS PURAMENTE SENOIDAIS

Admite-se que não existe inércia térmica no enrolamento do transformador, ou seja, as variações de carga refletem na variação praticamente instantânea da temperatura do enrolamento. Assim, analogamente ao aumento da temperatura do óleo para cada instante t o aumento da temperatura do enrolamento para condições senoidais de operação é dado por:

$$G_{hs}(t) = G_{hspc} [C(t) \cdot K(t)^2]^n \quad (V.11)$$

V.3.4 TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A ONDAS DISTORCIDAS

REGIME PERMANENTE

A elevação da temperatura final do enrolamento no seu ponto mais quente em relação à temperatura do óleo será dada pela expressão V.9, levando-se em consideração que as perdas no cobre possuem contribuição harmônica. Assim:

$$G_{hsreg} = G_{hspc} \left[\frac{P_{JN}}{P_{J1}} \right]^m \quad (V.12)$$

Sendo:

- G_{hspc} a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento em relação ao topo do óleo com carga linear e nominal.
- P_{JN} as perdas totais nos enrolamentos dos transformadores sob sinais distorcidos.
- P_{J1} as perdas totais nos enrolamentos dos transformadores para a frequência fundamental.
- m expoente que varia de 0,8 à 1,0 de acordo com o sistema de resfriamento. (Por exemplo, para refrigeração natural $n=0,8$; para refrigeração com circulação forçada $n=1,0$).

REGIME TRANSITÓRIO

Analogamente ao caso do óleo, para alcançar a temperatura final do enrolamento, o seu comportamento transitório térmico pode ser calculado pela equação V.10. Assim

$$G_{hs}(t) = [G_{hsreg} - G_{hsi}] \cdot \left(1 - e^{-t/T_{\bullet}(t)} \right) + G_{hsi} \quad (V.13)$$

Sendo:

- T_e a constante térmica do enrolamento do transformador.
- G_{iht} a elevação de temperatura da temperatura do enrolamento no início de Δt .

V.4 TEMPERATURA AMBIENTE

As normas recomendam que, para o cálculo da perda de vida, a temperatura ambiente deve ser tomada pela temperatura média mensal obtida no decorrer de vários anos. Assim, é possível obter a temperatura ambiente provável para determinado mês através de relatórios preparados pelo serviço de meteorologia do Ministério da Agricultura, por exemplo, os quais fornecem a temperatura média a partir das máximas diárias para várias regiões do país.

Considerando-se que um dia qualquer a média e/ou a máxima podem ser superiores que as estimadas pelo IBGE, recomenda-se, que essas temperaturas sejam acrescidas de 5°C , uma vez que o envelhecimento em temperaturas mais altas que a média nem sempre é compensado pelo envelhecimento em patamares menores. Assim, a temperatura obtida não será excedida em alguns dias do mês, e onde isso ocorrer, a perda de vida útil não será significativa.

A título de ilustração a figura V.1 mostra a variação da temperatura média ao longo do dia para os doze meses do ano.

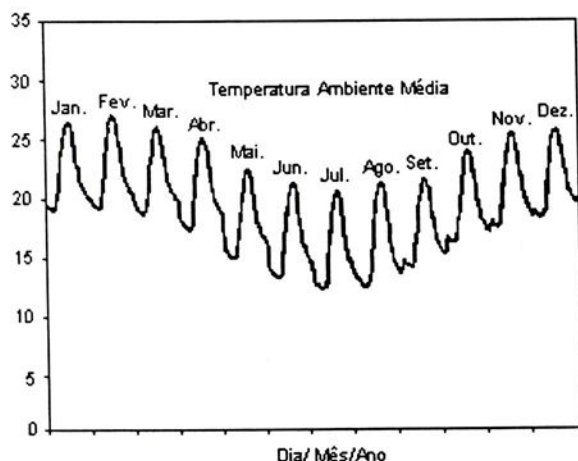


Figura V.1 Temperatura média ambiente dos doze meses do ano.

V.5 CONSTANTES TÉRMICAS DO TRANSFORMADOR

Uma constante de tempo térmica σ pode ser definida como o tempo necessário para uma temperatura θ passar de θ_i a θ_f , se a taxa de mudança for mantida no valor inicial. (Ver figura V.2.)

Se a elevação da temperatura inicial θ_i for zero, e a potência aplicada ao transformador for a nominal, a constante térmica será σ_r . Nesse caso, sendo W_{f1} o calor gerado à potência nominal, inicialmente, não haverá dissipação e, esse calor será totalmente utilizado para elevar a temperatura do transformador. Em um intervalo de tempo Δt teremos $W_{f1} \cdot \Delta t$ Watt-horas gerados. Mantida a taxa inicial, para atingir θ_f serão necessários $\theta_f \cdot H$ Watt-horas, sendo H a capacidade térmica do transformador.

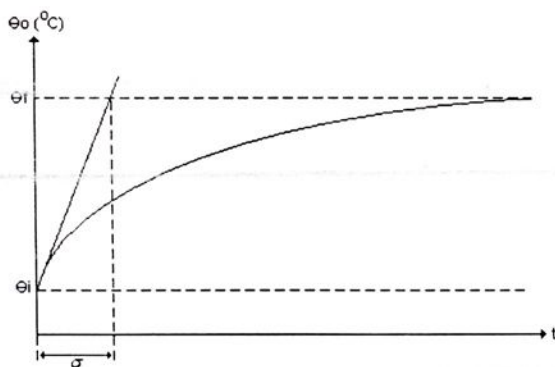


Figura V.2 – Variação de temperatura, σ é a constante térmica.

Assim:

$$W_{f1} \cdot \sigma_r = \theta_f \cdot H$$

e

$$\sigma_r = \frac{\theta_f \cdot H}{W_{f1}} \quad (V.14)$$

Com referência ao cálculo de H existem muitas formulações utilizáveis, mas todas elas consideram características construtivas do transformador, como pesos do tanque e do núcleo e volume de óleo.

Quando o intervalo de temperaturas for diferente do especificado para σ_r e a carga aplicada ao transformador for diferente da nominal, deve-se fazer uma correção de σ_r para obter σ .

Assim, a equação do sistema térmico é:

$$\sigma = \left[\frac{\frac{\theta_f}{W_f} - \frac{\theta_i}{W_i}}{\frac{\theta_f}{W_{f1}} - \frac{\theta_i}{W_{f1}}} \right] \cdot \sigma_r \quad (V.15)$$

Lembrando que os calores dissipados (W_t , W_i , W_{f1}) podem ser escritos em função das temperaturas, chega-se finalmente à seguinte expressão.

$$\sigma = \left[\frac{\frac{\theta_f}{\theta_{f1}} - \frac{\theta_i}{\theta_{f1}}}{\left(\frac{\theta_f}{\theta_{f1}}\right)^{1/m} - \left(\frac{\theta_i}{\theta_{f1}}\right)^{1/m}} \right] \cdot \sigma_r \quad (V.16)$$

Sendo:

- σ a constante térmica para o intervalo θ_i a θ_f .
- σ_r a constante térmica para o intervalo 0 a θ_{f1} .

Dessa forma, as duas constantes de tempo de aquecimento utilizadas nas formulações anteriores, ou seja, a constante de tempo de aquecimento do óleo (T_o) e a constante de tempo de aquecimento do enrolamento (T_e), variam de acordo com o estado térmico do transformador, sendo calculadas de acordo com as expressões V.14 e V.15 a seguir.

$$T_o = \left[\frac{\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} - \frac{G_{oi}}{G_{opc}}}{\left(\frac{G_{oreg}}{G_{opc}}\right)^{1/m} - \left(\frac{G_{oi}}{G_{opc}}\right)^{1/m}} \right] \cdot T_{opc} \quad (V.17)$$

$$T_e = \left[\frac{\frac{G_{hsreg}}{G_{hspc}} - \frac{G_{hsi}}{G_{hspc}}}{\left(\frac{G_{hsreg}}{G_{hspc}}\right)^{1/m} - \left(\frac{G_{hsi}}{G_{hspc}}\right)^{1/m}} \right] \cdot T_{epc} \quad (V.18)$$

Os parâmetros T_{opc} e T_{epc} dependem de características construtivas do transformador, e são fornecidos pelos fabricantes.

V.6 FATOR DE CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA

A elevação da temperatura acima dos valores padrões para os quais as características dos transformadores foram medidas, pode causar variação de alguns parâmetros, entre os quais estão as resistências ôhmicas dos circuitos primário e secundário.

O aumento das resistências dos enrolamentos causará um aumento direto das perdas no cobre, pois, mantida a tensão constante, a corrente circulante é dada pela potência fornecida pelo transformador e independente da resistência do cobre.

A equação que permite o cálculo da variação da resistência de um fio metálico com a temperatura é:

$$r = r_o [1 + \alpha(T - T_o)]$$

Sendo:

- r a resistência em ohms à temperatura T °C.
- r_o a resistência em ohms à temperatura T_o °C.
- α o coeficiente de variação da resistência com a temperatura.

Para uma temperatura T qualquer:

$$\alpha = \frac{1}{234,5 + T}$$

O fator de correção da resistência é definido como:

$$C = \frac{r}{r_o} = 1 + \alpha(T - T_o)$$

Sendo calculado para a temperatura T_o e substituindo-se o valor de α , tem-se:

$$C = \frac{234,5 + T}{234,5 + T_o}$$

Tomando-se a temperatura $T_o = T_{hspc}$, sendo T_{hspc} a temperatura do ponto mais quente do enrolamento à plena carga senoidal (95 °C para transformadores com isolamento 55 °C e 110 °C para transformadores com isolamento de 65 °C), o fator de correção da resistência para uma temperatura T_{hs} em um instante qualquer é dado por:

$$C(t) = \frac{234,5 + T_{hs}(t)}{234,5 + T_{hspc}} \quad (V.19)$$



CAPÍTULO VI - PERDA DE VIDA ÚTIL

VI.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A aplicação de carga em um transformador provoca neste um aquecimento, que por sua vez gera uma degradação no material isolante utilizado em sua construção. Quantificar o nível de degradação deste material é justamente calcular a taxa de perda de vida do transformador.

Este capítulo destina-se ao estudo de como é realizado o cálculo da perda de vida de um transformador quando operando sob condições senoidais e não senoidais.

VI.2 DADOS NECESSÁRIOS

Os dados necessários ao cálculo da perda de vida dos transformadores sob condições senoidais de operação estão relacionados na tabela VI.1.

Tabela VI.1- Dados necessários para o cálculo da perda de vida de transformadores operando sob condições senoidais

Potência Nominal do Transformador	S_{nom} [KVA]
Frequência Nominal do Sistema	f_{nom} [Hz]
Temperatura Ambiente	T_a [°C]
Temperatura de fulgor do óleo	T_f [°C]
Elevação da temperatura nominal no óleo acima da ambiente	G_{opc} [°C]
Elevação da temperatura nominal no enrolamento acima do óleo	G_{hspc} [° C]
Perdas no ferro nominais	P_{Fe} [KW]
Perdas no cobre nominais	P_{Cu} [KW]
Expoente de refrigeração	m
Constante de tempo de aquecimento do óleo nominal	T_{opc} [horas]
Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal	T_{epc} [horas]
Dados da curva diária de carga	$K(t)$ [pu]
Dados da curva diária de temperatura ambiente	$T_a(t)$ [°C]

Para o cálculo da perda de vida sob condições não senoidais de operação, são necessários, além dos dados contidos na tabela VI.1, os dados citados na tabelaVI.2.



Tabela VI.2 – Parâmetros característicos do transformador utilizados para o cálculo da perda de vida em transformadores operando sob condições não senoidais (além daqueles contidos na tabela V.1)

Tensão Nominal no lado de Alta Tensão	$V_1(p)$ [KV]
Tensão Nominal no lado de Baixa Tensão	$V_1(s)$ [KV]
Corrente Nominal no lado de Alta Tensão	$I_1(p)$ [A]
Corrente Nominal no lado de Baixa Tensão	$I_1(s)$ [A]
Resistência equivalente	R_{eqcc} [%]
Espessura da chapa do núcleo	Δ [m]
Permeabilidade magnética do núcleo	μ [H/m]
Condutividade térmica do núcleo	γ [$\Omega \cdot m$]
Ordem harmônica máxima considerada	N
Expoente de Steimmetz	S
Amplitude das tensões harmônicas no primário	$V_p(n)$ [pu]
Amplitude das tensões harmônicas no secundário	$V_s(n)$ [pu]
Fase das tensões harmônicas no primário	φ_p [rad]
Fase das tensões harmônicas no secundário	φ_s [rad]
Amplitude das correntes harmônicas no primário	$I_p(n)$ [pu]
Amplitude das correntes harmônicas no secundário	$I_s(n)$ [pu]

Para calcular a perda de vida em função da temperatura do enrolamento o primeiro passo é encontrar a curva diária de carga média do transformador em questão em p.u, e em seguida calcular as curvas de carga estratificadas.

Entretanto, essas curvas ainda devem ser divididas em intervalos onde o carregamento seja constante, de modo que possam ser calculados os valores referidos de temperatura e, consequentemente os valores de perda de vida.

Para isso, primeiro converte-se os dados para intervalos maiores, de uma hora, utilizando-se da média quadrática. Em seguida representa-se a curva por nove segmentos de reta, sendo que para os períodos de menor carga utilizam-se três segmentos e no período de ponta 6 segmentos, de hora em hora. Utiliza-se a média quadrática novamente para obter a curva de 9 segmentos.

Analogamente, a curva de temperatura ambiente média também deverá ser reduzida para uma curva de nove segmentos, nestas porém pela média aritmética dos pontos nos intervalos.

Somando-se os valores da perda de vida calculados em cada intervalo, obtém-se a perda de vida diária do transformador, bem como o perfil de sua temperatura interna.

A figura VI.1 ilustra o descrito acima para um ciclo genérico de vários níveis de carga linear e/ou não linear.

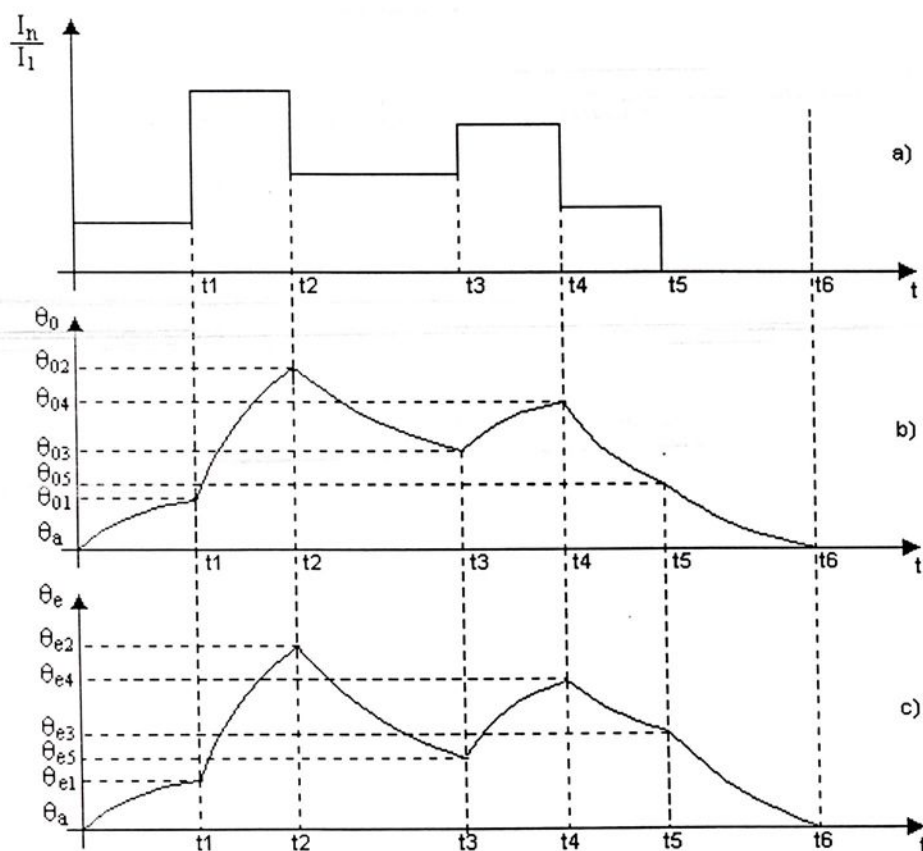


Figura VI.1 – Ciclo de Carga e as elevações de Temperatura Ciclo Genérico de Carga;

(a) Elevação de Temperatura do topo do óleo sobre a ambiente;

(b) Elevação da temperatura do enrolamento sobre a do topo do óleo.

VI.3 PERDA DE VIDA ÚTIL

O cálculo da perda de vida em transformadores, conforme já foi dito, é essencialmente uma função do envelhecimento do seu material isolante, o qual por sua vez depende da temperatura do enrolamento do transformador. Por esta razão, foram desenvolvidas fórmulas que relacionam a perda de vida com a temperatura do ponto quente do óleo.

A expectativa de vida de um transformador é estimada com base na “Lei de Arrhenius”, que relaciona a taxa de envelhecimento do material isolante com o tempo e a temperatura a que é submetido o transformador. Tem-se:

$$EV_u = K \times a^{\left(a + \frac{b}{T_{hs} + 273}\right)} \tag{VI.1}$$

Sendo:

- A e B constantes do material
- T a temperatura do ponto mais quente do material, em °C
- K uma constante que depende da formulação.
- a = 10 ou e (=2,71828)

Para a aplicação desta fórmula, utilizam-se valores de a e b característicos do material isolante empregado, e a temperatura T_{hs} é a temperatura do ponto mais quente (hottest spot). Entretanto, dependendo do autor, os valores dessas constantes são diferentes. Os equacionamentos mais utilizados entre as várias formulações de cálculo da expectativa de vida para transformador são dados na tabela VI.3.

Tabela V.3– Formulações para o cálculo da expectativa de vida de um transformador para alguns dos equacionamentos mais comumente utilizados.

NBR 5416	$EV_{NBR}(t) = 10^{\left(\frac{6972,15}{t+273} - 14,133\right)}$
ANSI C57.91	$EV_{ANSI}(t) = 10^{\left(\frac{6328,8}{t+273} - 11,968\right)}$
PECO	$EV_{PECO}(t) = 10^{\left(\frac{15457,225}{t+273} - 34,129\right)}$
MONTINGER	$EV_{MONTINGER}(t) = 7,15 \cdot 10^4 \cdot e^{-0,088t} \cdot 8760$

Na figura VI.2, apresenta-se a estimativa de vida do transformador em função da sua temperatura de ponto quente.

Verifica-se pela ANSI que, se o transformador trabalha com temperatura nominal ($T_N=95^{\circ}\text{C}$) continuamente a sua vida será $V_N = 169750$ horas (de ordem de 20 anos).

Assim, a cada hora que ele trabalha com 95°C ele perde uma hora de vida. Se trabalhar com temperatura $T_i > T_N$, conforme ilustrado na figura VI.3, sua vida será V_i horas menor que V_N .



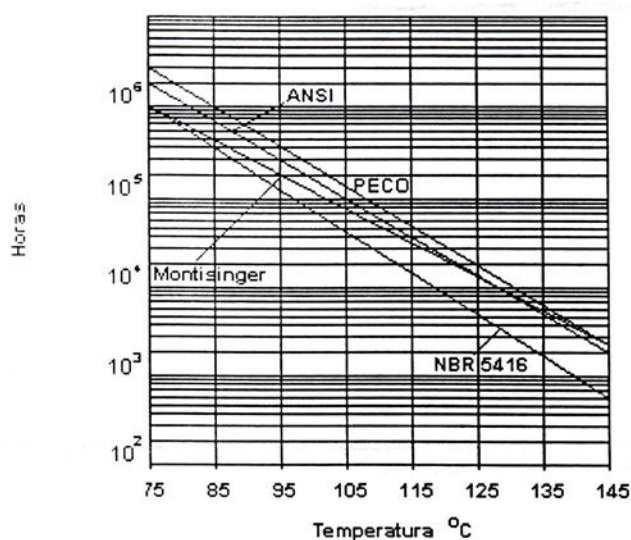


Figura VI.2 – Expectativa de Vida x Temperatura de ponto quente.

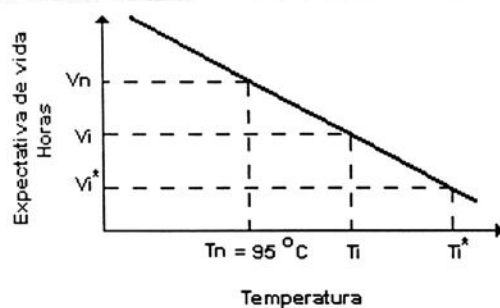


Figura VI.3 – Vida x Temperatura de ponto quente

Segue-se que numa hora que ele trabalhar com T_i ele perderá:

$$\frac{V_N}{V_i} \text{ horas de vida}$$

Se na hora seguinte ele trabalhar com temperatura T_i^* :

$$\frac{V_N}{V_i^*} \text{ pu}$$

E portanto nas duas horas consecutivas perderá:

$$\frac{V_N}{V_i} + \frac{V_N}{V_i} = V_N \cdot \left(\frac{1}{V_i} + \frac{1}{V_i} \right)$$

Quando a soma atingir o valor 1,0 exauriu a vida do transformador.

VI.4 CÁLCULO DA PERDA DE VIDA ÚTIL

O presente trabalho utiliza a formulação da NBR 5416 [12] para o cálculo da perda de vida útil nos transformadores de distribuição, estejam eles funcionando sob condições senoidais ou não senoidais.

VI.4.1 TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES SENOIDAIS DE OPERAÇÃO

Com os dados contidos na tabela VI.1 e calculadas as curvas de carga e de temperatura de nove segmentos, o perfil de temperaturas do transformador para condições senoidais de operação pode ser encontrado através do seguinte algoritmo, resumido no fluxograma mostrado na figura VI.4.a.

1. Atribui-se um valor para a elevação da temperatura do óleo acima da ambiente inicial G_{oi} , geralmente Atribui-se o valor da elevação da temperatura nominal do óleo acima da ambiente G_{opc} .

2. Para cada hora:

2.1 Atribui-se um valor para a temperatura de hottest spot.

2.2 Calcula-se o fator de correção da resistência $C(t)$.

$$C(t) = \frac{234,5 + T_{hs}(t)}{234,5 + T_{hspc}}$$

2.3 Calcula-se a elevação da temperatura do óleo acima da ambiente em regime G_{oreg} .

$$G_{oreg}(t) = G_{opc} \cdot \left[\frac{1 + C(t) \cdot K(t)^2 \cdot R}{1 + R} \right]^m$$

2.4 Calcula-se a constante de tempo de aquecimento do óleo T_o .

$$T_o(t) = \left[\frac{\frac{G_{oreg}(t)}{G_{opc}} - \frac{G_{oi}}{G_{opc}}}{\left(\frac{G_{oreg}(t)}{G_{opc}} \right)^{1/m} - \left(\frac{G_{oi}}{G_{opc}} \right)^{1/m}} \right] \cdot T_{opc}$$

2.5 Calcula-se a elevação da temperatura do topo do óleo acima da ambiente G_o .

$$G_o(t) = [G_{oreg}(t) - G_{oi}] \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_o(t)} \right) + G_{oi}$$

2.6 Calcula-se a elevação da temperatura do ponto mais quente acima da temperatura do topo do óleo G_{hs} .

$$G_{hs}(t) = G_{hspc} [C(t) \cdot K(t)^2]^m$$

2.7 Calcula-se a temperatura de hottest spot T_{hs} .

$$T_{hs}(t) = G_{hs}(t) + G_o(t) + T_a(t)$$

2.8 Compara-se a temperatura de hottest spot calculada com aquela que foi chutada. Se a diferença for menor que uma precisão pré estabelecida, a temperatura encontrada é a temperatura real; senão volta-se ao passo 2.2 sendo que a temperatura de hottest spot utilizada agora é aquela encontrada na iteração anterior.

Obs – Na primeira hora a temperatura de hottest spot chutada é a nominal, dada por $T_{hspc} = G_{opc} + G_{hspc} + T_a$. À partir da segunda hora a temperatura da primeira iteração é aquela resultante da hora anterior.

3. Compara-se o valor da elevação da temperatura do óleo acima da ambiente G_o da hora 24 com aquela chutada. Se a diferença for menor que uma precisão pré estabelecida todos os valores estão corretos. Caso contrário, faz-se o chute igual ao valor encontrado e volta-se ao passo 2.

Realizadas todas as iterações necessárias, tem-se todos os valores de temperatura de hottest spot para todos os 24 pontos de cada uma das curvas diárias de carga estratificadas. Assim, é só calcular os valores de perda de vida anual. Isso é feito da seguinte forma:

1. Calcula-se os valores da perda de vida em p.u. para os 24 pontos de cada uma das curvas estratificadas das temperaturas de hottest spot.

2. Para cada curva somam-se os valores encontrados em cada hora e encontra-se a perda de vida em pu do transformador.

Com o valor da perda de vida em pu é possível saber quando se extinguirá a vida do transformador acumulando-se os valores encontrados ano a ano. Quando o valor acumulado for 1,0 extinguiu-se a vida útil do equipamento.

VI.4.2 TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS DE OPERAÇÃO

Com os dados contidos nas tabelas VI.1 e VI.2 e calculadas as curvas de carga e de temperatura de nove segmentos, o perfil de temperaturas do transformador para condições não senoidais de operação pode ser encontrado através do seguinte algoritmo, resumido no fluxograma mostrado na figura VI.4.b.

1. Calculam-se os valores das perdas totais no ferro e no cobre.

2. Atribui-se um valor para a elevação da temperatura do óleo acima da ambiente inicial G_{oi} , e outro para a elevação da temperatura do enrolamento acima da do óleo inicial G_{hsi} , geralmente chutam-se os valores de elevação da temperatura nominais.

3. Para cada hora:

3.1 Atribui-se um valor para a temperatura de hottest spot.

3.2 Calcula-se o fator de correção da resistência $C(t)$.

$$C(t) = \frac{234,5 + T_{hs}(t)}{234,5 + T_{hspc}}$$

$$\text{sendo que } T_{hspc} = G_{opc} + G_{hspc} + T_a$$

3.3 Calculam-se as elevações da temperatura do óleo acima da ambiente e do enrolamento acima do óleo em regime, G_{oreg} e G_{hsreg} .

$$G_{oreg} = G_{opc} \left(\frac{(P_{HN} + P_{FN} + P_{JN})}{P_{FE1} + P_{J1}} \right)^m$$

$$G_{hsreg} = G_{hspc} \left[\frac{P_{jN}}{P_{j1}} \right]^m$$

3.4 Calculam-se as constantes de tempo de aquecimento do óleo T_o e do enrolamento T_e .

$$T_o = \left[\frac{\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} - \frac{G_{oi}}{G_{opc}}}{\left(\frac{G_{oreg}}{G_{opc}} \right)^{1/m} - \left(\frac{G_{oi}}{G_{opc}} \right)^{1/m}} \right] \cdot T_{opc}$$

$$T_e = \left[\frac{\frac{G_{hsreg}}{G_{hspc}} - \frac{G_{hsi}}{G_{hspc}}}{\left(\frac{G_{hsreg}}{G_{hspc}} \right)^{1/m} - \left(\frac{G_{hsi}}{G_{hspc}} \right)^{1/m}} \right] \cdot T_{epc}$$

3.5 Calculam-se as elevações da temperatura do topo do óleo acima da ambiente e do enrolamento acima do óleo, G_o e G_{hs} .

$$G_o(t) = [G_{oreg}(t) - G_{oi}] \cdot \left(1 - e^{-t/T_o(t)} \right) + G_{oi}$$

$$G_{hs}(t) = [G_{hsreg}(t) - G_{hsi}] \cdot \left(1 - e^{-t/T_e(t)} \right) + G_{hsi}$$

3.6 Calcula-se a temperatura de hottest spot T_{hs} .

$$T_{hs}(t) = G_{hs}(t) + G_o(t) + T_a(t)$$

3.7 Compara-se a temperatura de hottest spot calculada com aquela que foi chutada. Se a diferença for menor que uma precisão pré-estabelecida, a temperatura encontrada é a temperatura real; senão volta-se ao passo 3.2 sendo que a temperatura de hottest spot utilizada agora é aquela encontrada na iteração anterior.

Obs – Na primeira hora a temperatura de hottest spot chutada é a nominal, dada por $T_{hspc} = G_{opc} + G_{hspc} + T_a$. À partir da segunda hora a temperatura da primeira iteração é aquela resultante da hora anterior.

4. Comparam-se os valores das elevações da temperatura do óleo acima da ambiente G_o e da temperatura do enrolamento acima da do óleo G_{hs} , encontrados para a hora 24 com aqueles chutados. Se a diferença for menor que uma precisão pré estabelecida todos os valores estão corretos. Caso contrário, faz-se o chute igual ao valor encontrado e volta-se ao passo 3.

Realizadas todas as iterações necessárias, tem-se todos os valores de temperatura de hottest spot para todos os 24 pontos de cada uma das curvas diárias de carga estratificadas.

Assim, é só calcular os valores de perda de vida anual como no caso de ondas puramente senoidais.

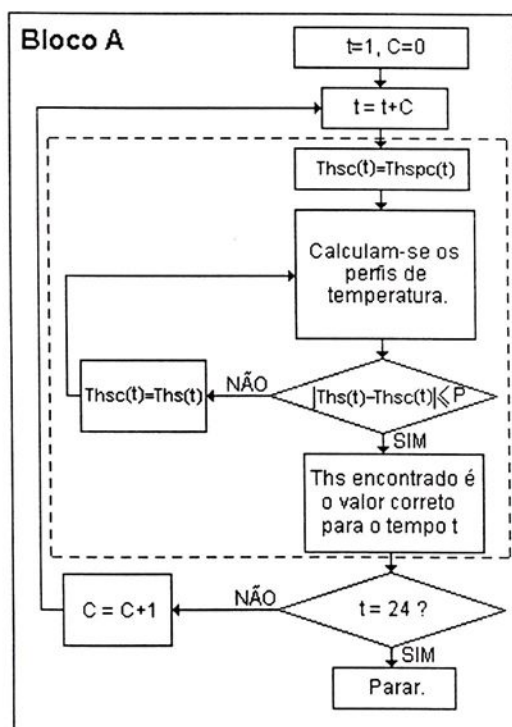
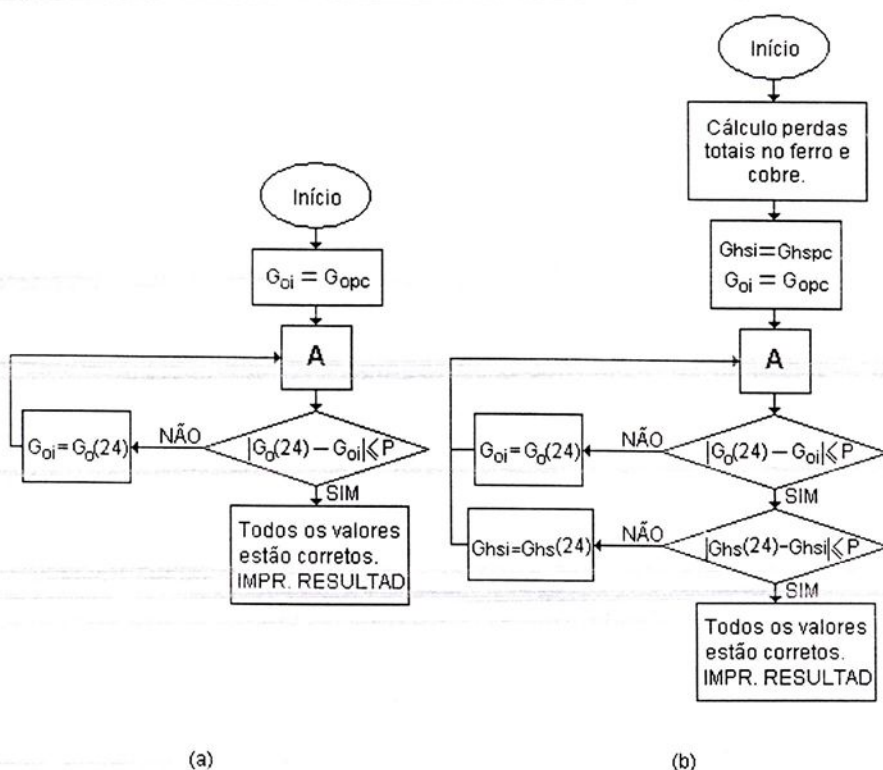


Figura VI.4 – Fluxogramas (a) Cálculo das temperaturas internas de um transformador de distribuição para condições senoidais de operação, (b) Cálculo das temperaturas internas de um transformador de distribuição para condições não senoidais de operação.

CAPÍTULO VII – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

VII.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de lâmpadas de descarga está cada vez mais difundido entre os consumidores de energia elétrica, pois essas lâmpadas possuem uma gama muito grande de potências (de algumas dezenas até milhares de Watts), uma alta eficiência energética e uma vida útil mais longa, se comparadas com as lâmpadas incandescentes comuns.

A iluminação tem experimentado nos últimos anos grande evolução tecnológica, principalmente no que tange às lâmpadas compactas e com reatores eletrônicos, com novas ofertas no mercado de lâmpadas de descarga de baixo consumo de energia e de alta eficiência luminosa. Assim, pode-se concluir que o item iluminação possui um elevado potencial de economia de energia.

Entretanto, devido às características de não-linearidade dos componentes eletrônicos que compõem esses dispositivos, existe uma grande preocupação com os níveis de poluição elétrica causados por esses equipamentos, e com as consequências dessa poluição.

Dessa forma, o presente capítulo apresenta o resultado de testes realizados em laboratório com uma variedade de lâmpadas e reatores de uso residencial e comercial, com o objetivo de fornecer subsídios para a análise da perda de vida útil de transformadores de distribuição quando submetidos às tensões e/ou correntes não senoidais.

Os estudos foram particularmente direcionados para a avaliação das não linearidades apresentadas por diferentes dispositivos de iluminação, através de medidas de *rms* verdadeiro, fator de potência, conteúdo harmônico e distorção harmônica total.

VII.2 ASPECTOS GERAIS

A luz de uma lâmpada de descarga não é, como no caso da lâmpada incandescente, produzida pelo aquecimento de um filamento, mas por uma contínua descarga elétrica em um gás ou vapor ionizado, às vezes em combinação com a luminescência de fósforos, que são excitados pela variação da descarga.

Dependendo da pressão interna dentro do tubo de descarga, que pode variar de menos de um milésimo de atmosfera até várias atmosferas, as lâmpadas de descarga podem ser classificadas como de alta ou baixa pressão.

O tubo no qual a descarga elétrica manifesta-se geralmente possui forma cilíndrica e eletrodos feitos de tungstênio espiralado em forma de colméia, dependendo do tipo de lâmpada, e contém um material emissivo para facilitar a emissão de elétrons.

As lâmpadas de descarga são operadas através de um reator, cuja principal função é limitar a corrente na lâmpada ao valor recomendado. O reator é normalmente uma combinação de elementos não lineares.



Durante a passagem da corrente pelo meio ionizado, os elétrons se chocam com as moléculas e/ou átomos dos gases e metais presentes, e então ocorre a excitação dos elétrons constituintes desses átomos, resultando na emissão de radiações luminosas cujo comprimento de onda depende da natureza do material constituinte do meio e da pressão que se encontra o mesmo, podendo o espectro se situar na região de luz visível ou na região do ultravioleta.

No caso da presença de radiações ultravioletas no espectro gerado, elas podem ser convertidas em luz visível através da excitação de um material fluorescente. Esse material é formado por compostos de fósforo, conhecido como Fósfor. O fenômeno é idêntico ao da descarga no meio gasoso, ao ser excitado por radiações ultravioleta esses compostos emitem radiações em uma frequência diferente. As lâmpadas fluorescentes que emitem exclusivamente radiações ultravioletas produzem luz branca, devido à grande variedade de impurezas que aumentam o espectro. As lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão produzem as cores quentes, especialmente o vermelho, já que essas lâmpadas produzem, além das radiações ultravioletas, as cores frias como o verde, azul e o violeta.

VII.3 TIPOS DE LAMPADAS DE DESCARGA

VII.3.1 LÂMPADAS FLUORESCENTES TUBULARES

A lâmpada fluorescente é uma lâmpada de descarga de baixa pressão, cuja luz é predominantemente produzida por pó fluorescente ativado pela energia ultravioleta da descarga. A lâmpada, geralmente em forma de um bulbo tubular longo, com um eletrodo de cada lado, contém vapor de mercúrio sob baixa pressão, com uma pequena quantidade de gás inerte para facilitar a partida.

A figura VII.1 mostra o aspecto externo de uma lâmpada fluorescente, base bipino.

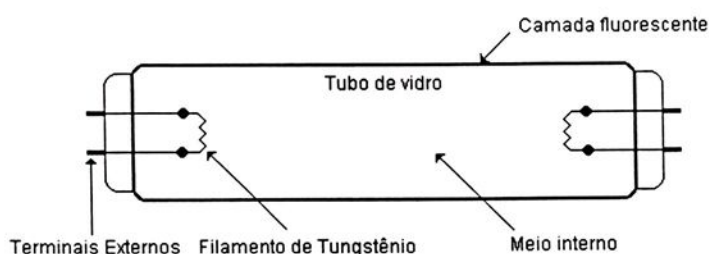


Figura VII.1 – Lâmpada fluorescente bipino

O funcionamento das lâmpadas fluorescentes necessita o uso do “starter”, que não é nada mais que um elemento de partida, e é mostrado nas figura VII.2 (a) e (b).

Ao acionarmos o interruptor *I* da figura VII.2.(a) produz-se um arco no dispositivo de partida *S* (Starter) entre as lâminas *A* e *B* (Veja-se a figura VII.2.(b)), cujo calor provoca a dilatação do material e o estabelecimento do contato elétrico entre as mesmas, fazendo a corrente elétrica percorrer o circuito no qual estão inseridos os eletrodos *E*, que se aquecem e

emitem elétrons. Após um pequeno intervalo de tempo, o contato entre as lâminas se desfaz, pois a corrente elétrica que por ali circula não é mais suficiente para mantê-las em operação. Neste instante, produz-se uma variação de corrente que resulta no aparecimento de uma força eletromotriz de elevado valor na indutância do reator, provocando um arco entre os eletrodos E e, em consequência, o acendimento da lâmpada. Pelo efeito da reatância em série, a tensão entre os eletrodos diminui, extinguindo o arco entre as lâminas do starter, o que faz com que o reator passe a funcionar como um estabilizador de corrente, através de sua impedância própria, limitando a tensão ao valor requerido

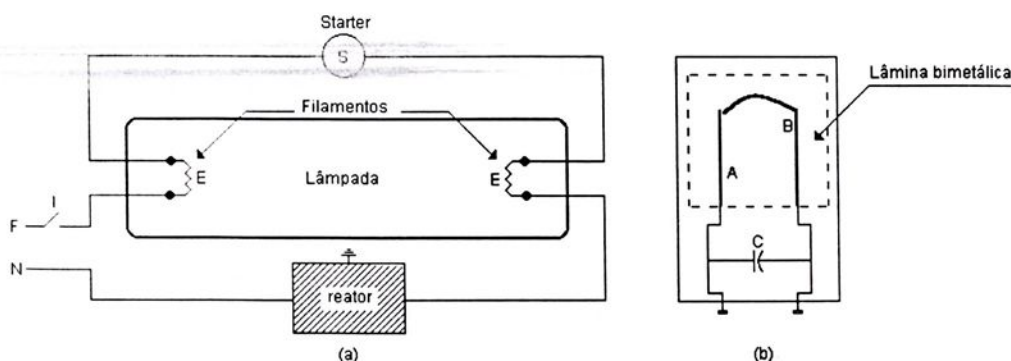


Figura VII.2 – (a) Ligação do starter para a lâmpada fluorescente; (b) Starter

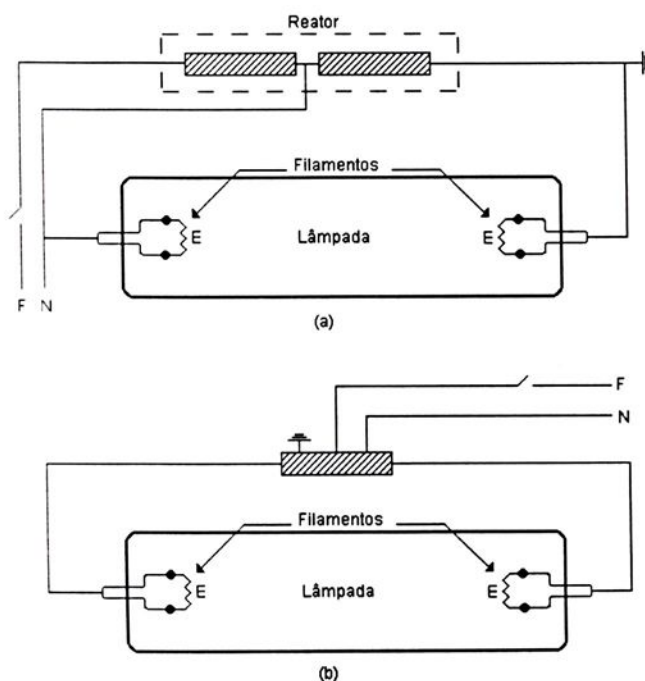


Figura VII.3 – (a) Lâmpada fluorescente de cátodo sem pré-aquecimento; (b) Lâmpada fluorescente a cátodo frio.

O capacitor C , acoplado ao circuito do starter, tem por finalidade diminuir a interferência sobre os aparelhos de rádio e comunicação durante o processo de acendimento da lâmpada.

Não se pode deixar de dizer que existem lâmpadas fluorescentes, cujo acendimento não depende do starter, são as chamadas lâmpadas fluorescentes de cátodo sem pré-aquecimento e de cátodo a frio. A utilização dessas lâmpadas emprega o uso de reatores especiais que provocam uma tensão elevada na partida, iniciando o processo de emissão de elétrons. A figura VII.3 mostra o esquema de ligação desses tipos de lâmpadas.

VII.3.2 LÂMPADAS DE VAPOR DE MERCÚRIO

A lâmpada de vapor de mercúrio é composta por um tubo de material cerâmico, geralmente quartzo, resistente a altas pressões e temperaturas, onde são instalados nas extremidades dois eletrodos principais e um eletrodo auxiliar ligados em série com uma resistência de valor elevado. O interior do tubo é preenchido com um gás inerte (argônio) em pressão muito baixa e mercúrio em estado líquido (pequenas gotas), cuja finalidade é facilitar a formação da descarga inicial. Por outro lado, o mercúrio é vaporizado durante o período de pré-aquecimento da lâmpada.

O tubo de quartzo é colocado dentro de um invólucro de vidro contendo uma certa quantidade de azoto cuja função é a distribuição uniforme da temperatura.

Um esquema de uma lâmpada a vapor de mercúrio é mostrado na figura VII.4.

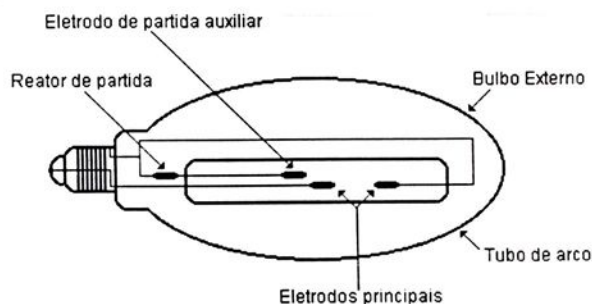


Figura VII.4 – Lâmpada de vapor de mercúrio

Seu funcionamento é baseado na formação de um arco elétrico entre os eletrodos auxiliar e o principal mais próximo, quando é aplicada uma tensão de valor adequado nos terminais da lâmpada. Esse arco aquece as substâncias emissoras de luz na região entre os eletrodos, o que resulta na ionização do gás e conseqüente vaporização do mercúrio. O tempo da partida é de 2 a 10 minutos, dependendo da potência da lâmpada, fabricante, material auxiliar entre outros.

As lâmpadas de vapor de mercúrio não podem ser ligadas diretamente à rede. Após a partida, o tubo de descarga adquire uma impedância muito baixa, exigindo uma tensão inferior à da partida. Esse controle da tensão é feito por um reator, uma indutância colocada em série com a lâmpada. Durante a partida a tensão plena se localiza entre os eletrodos auxiliar e principal, conforme a corrente da lâmpada vai aumentando, aumenta também a queda de tensão sobre o reator, e conseqüentemente diminui a tensão entre esses eletrodos. No final do

processo de partida a queda de tensão do reator somada à do resistor de partida se torna muito alta e cessa o arco formado entre os resistores de partida (auxiliar) e o principal, neste momento a lâmpada entra no estágio final da partida, com a corrente, controlada pelo reator, fluindo entre os eletrodos principais.

VII.3.3 LÂMPADAS DE LUZ MISTA

As lâmpadas de luz mistas empregam os efeitos de incandescência e descarga para produzirem luz. Constam basicamente de uma lâmpada de vapor de mercúrio com um filamento em série com um dos eletrodos principais (oposto ao eletrodo auxiliar). A partida segue o mesmo princípio das lâmpadas de vapor de mercúrio. O arco é criado entre os eletrodos auxiliar e principal mais próximo. Após a ionização do gás no interior do tubo de descarga, a corrente passa a fluir entre os eletrodos principais e pelo filamento resistivo.

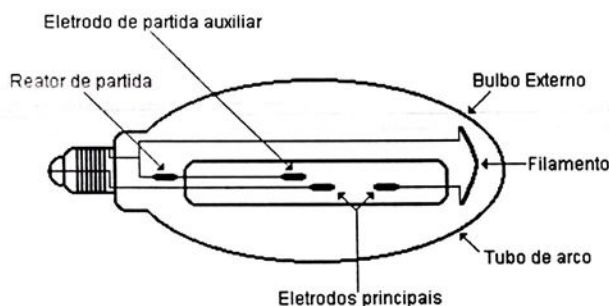


Figura VII.5 – Lâmpada de luz mista

O filamento é dimensionado a limitar a corrente que flui pelo tubo de descarga, assim é dispensado o uso de reator externo. O filamento também emite radiações na faixa do laranja e amarelo, que somadas aos raios frios (azul) do tubo de descarga e os da faixa do vermelho da camada fluorescente produzem um efeito mais natural e agradável que o das lâmpadas de descarga comuns, com índice de reprodução de cores bem superior.

Essas lâmpadas são geralmente de tensão 220V, pois tensões menores não seriam suficientes para formar o arco elétrico. Assim como as lâmpadas incandescentes, o filamento é de baixa eficiência, ele diminui a eficiência do conjunto que é menos de metade de uma lâmpada de vapor de mercúrio comum. As vantagens das lâmpadas de luz mista são baixo custo inicial, pois dispensam o uso de reator e o alto fator de potência (unitário).

VII.3.4 LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO

As lâmpadas de vapor de sódio constam de um tubo de descarga cujo material deve suportar altas temperaturas e ser antiabrasivo, pois o vapor de sódio é altamente abrasivo. Nas extremidades do tubo há um par de eletrodos principais. O interior do tubo consta de gás xenônio, mercúrio e sódio metálico. Não há eletrodo auxiliar. A partida é resultado da ionização do gás no interior do tubo e exige altos picos de tensão, da ordem do 1500V ou mais.

Para produzir o pulso de partida é necessário além do reator, um starter bimetálico ou a estado sólido (transistorizados), que são mais eficientes que os bimetálicos.

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão na verdade trabalham com uma pressão que produz um espectro contínuo e que resulta na cor dourada. As lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão trabalham com uma pressão que produz um espectro monocromático de luz amarela. Algumas lâmpadas possuem uma camada fluorescente para a correção cromática, mas em geral ela não é necessária.

VII.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Com o intuito de analisar as características associadas às não linearidades entre tensão e corrente dos diferentes dispositivos de iluminação, adotou-se, como procedimento padrão nos ensaios realizados, o controle rigoroso da tensão de alimentação, definindo-se para esta, uma forma de onda senoidal, com valor eficaz e frequência constantes, e índice de distorção abaixo de 1%. Desta forma, os desvios observados sobre as formas de onda das correntes de alimentação com relação a uma onda senoidal pura, praticamente estão associados às não-linearidades inerentes aos dispositivos analisados.

Neste sentido, adotou-se a seguinte metodologia:

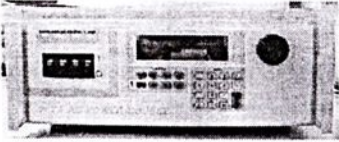
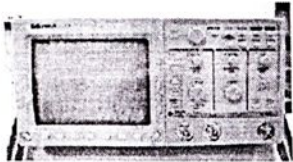
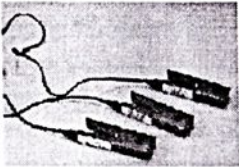
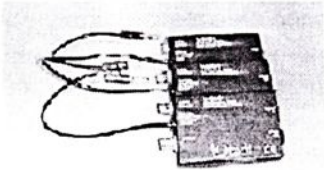
- (i) As medições foram efetuadas a uma temperatura ambiente controlada de 25° C;
- (ii) Os requisitos estabelecidos para a tensão de alimentação foram obtidos com o uso da fonte de alimentação de precisão California Instruments, modelo 5000iL;
- (iii) As medições foram realizadas após cinco minutos de funcionamento ininterrupto dos diferentes dispositivos, para garantir sua estabilidade térmica;
- (iv) As medidas de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência foram obtidas a partir do medidor de potência Yokogawa MW 110 e confirmadas através dos sinais de corrente e tensão obtidos a partir do osciloscópio Tektronics TDS 420 e processados pelo software WaveStar®;
- (v) O conteúdo harmônico e respectivas taxas de distorção foram obtidos a partir do osciloscópio Tektronics TDS 420, processados pelo software WaveStar®;
- (vi) Todas as medidas efetuadas nos equipamentos Yokogawa MW 110 e Osciloscópio Tektronics foram utilizadas para a calibração do sistema de aquisição de dados Wavebook 16 IOtech, bem como para o ajuste numérico das rotinas de processamento de sinais desenvolvidas no ambiente DasyLab® 4.0;

O arranjo experimental utilizado nos ensaios é ilustrado na figura VII.6.

E os equipamentos citados acima e utilizados nos ensaios são mostrados na tabela VII.1.



Tabela VII.1 - Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios dos dispositivos de iluminação monofásicos

	Fonte de Alimentação Monofásica / Simulador de Distúrbios California Instruments / modelo 5000iL 5 kVA; 0-400V; 45Hz a 66Hz Programação via software – interfaces RS232, GPIB Distúrbios: sags, sweels, surges, notching, interruptions
	Medidor Digital de Potência Classe 0,3% - 10Hz a 10KHz Yokogawa – WT 110
	Sistema de Aquisição de Dados Wavebook 16 IOtech Conversão A/D 1.0 MHz em 16 bits 8 canais simultâneos (S&H) Software para Processamentos de Sinais DasyLab 32 - versão 4.01 - IOtech
	Osciloscópio Tektronix TDS 340 A - digital – 100 MHz 2 canais Software para Processamentos de Sinais WaveStar - versão 1. 3 - Tektronix
	Ponteiras de Corrente Classe 2% - 40Hz a 3Khz Probe AC/10 1mA a 10A - sensibilidade 100mV/A Probe AC/100 1A a 100A - sensibilidade 10mV/A Probe ACDC/100 100mA a 100A - sensibilidade 10mV/A
	Transdutores de Tensão Classe 0.1% - 500Khz WBK61 - IOtech - 200:1

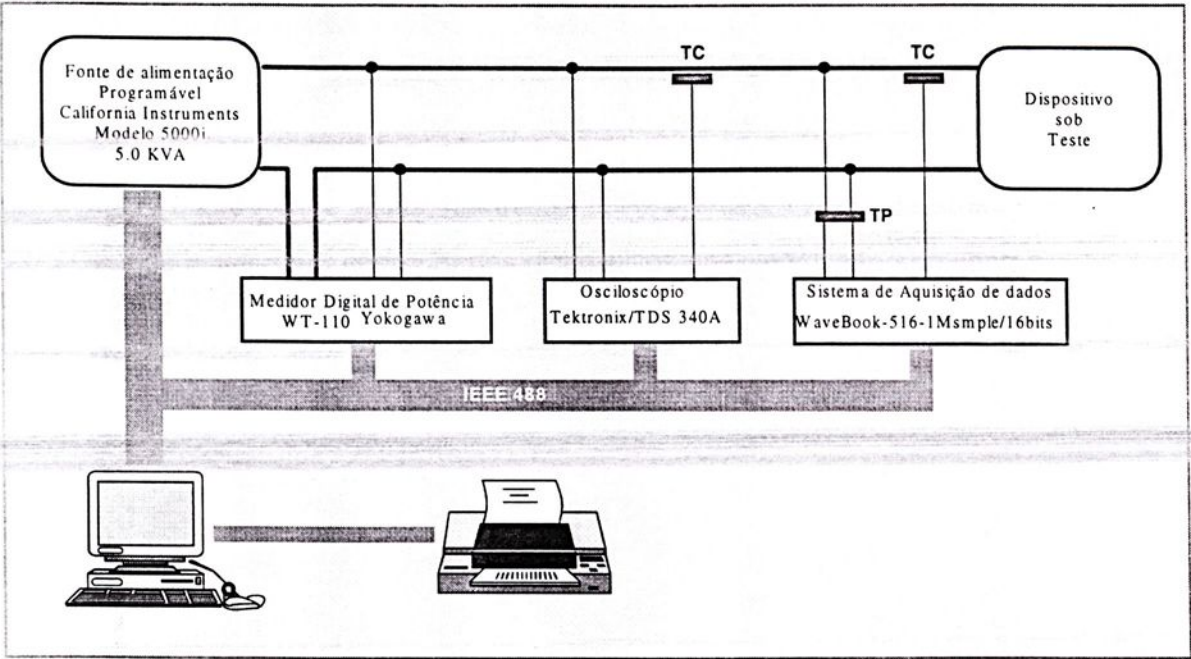


Figura VII.6 – Arranjo experimental utilizado nos ensaios dos dispositivos de iluminação monofásicos.

VII.5 DISPOSITIVOS ANALISADOS NOS ENSAIOS

Tabela VII.2 – Relação dos dispositivos analisados

Item	Descrição	Tensão (V)	Potência (W)
01	Lâmpada fluorescente compacta Lightex	127	27
02	Lâmpada fluorescente circular Philips Ecotone	127	26
03	Lâmpada fluorescente compacta Osram	127	23
04	Lâmpada econômica Philips Ecotone	110 a 120	16
05	Lâmpada fluorescente compacta espiral Golden Plus	110 a 145	15
06	Lâmpada fluorescente compacta Yellowstar	130	11
07	Reator eletrônico Light Now - 2x40W partida ultra-rápida – Margirius	127 / 220	60
08	Reator eletrônico 2x40W - Intral	127 / 220	66



VII.6 RESULTADOS OBSERVADOS

Os resultados experimentais obtidos mostram para cada dispositivo analisado, as principais grandezas elétricas associadas ao seu funcionamento, admitindo-se seu uso a partir de uma rede secundária de distribuição de energia elétrica com tensão nominal de 127 V entre fases e neutro e 220V entre linhas, frequência 60Hz e THD $\leq 1\%$.

Os resultados, para cada um dos dispositivos analisados são apresentados no final do presente texto, no Apêndice I.



CAPÍTULO VIII – SIMULAÇÕES

VIII.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo serão apresentados os procedimentos, os critérios e os dados utilizados, referentes ao cálculo da perda de vida de transformadores de distribuição quando carregados com dispositivos não lineares.

Para definir a perda de vida, necessita-se antes definir as condições em que esta será calculada e em quais critérios se basearão sua análise.

O cálculo da perda de vida, conforme foi visto nos capítulos anteriores, é baseado na temperatura de hottest spot, e este cálculo irá determinar o limite de uso do transformador. Deve-se observar que existem outras limitações ao carregamento de transformadores de distribuição tais como, expansões de óleo, pressão dos elementos seladores e capacidade térmica de componentes externos e internos. Quaisquer desses itens podem ser limitantes e devem ser considerados antes de se sobrecarregar o transformador. Por exemplo, operando acima de 140°C , o transformador pode ter gaseificação do óleo isolante originando bolhas de gás, que podem produzir um grande risco à integridade do transformador. Outro exemplo seria a potência passante momentânea não exceder a 2 pu, o que causaria problemas com conectores e acessórios. Não obstante, como o intuito do presente trabalho é observar o aumento da perda de vida dos transformadores de distribuição quando submetidos a carregamentos não lineares, observou-se apenas situações de funcionamento normais, ou seja, dentro do limite de temperatura e sem sobrecarregar o transformador.

As simulações foram realizadas considerando-se inicialmente um carregamento puramente senoidal e, em seguida, carregamentos não senoidais, de modo que seja possível a comparação da perda de vida do transformador em ambas as situações.

VIII.2 PROCEDIMENTO UTILIZADO

As simulações foram realizadas em forma de programas utilizando-se o software MatLab 6.0.

Foi concebido um programa computacional que calcula as perdas internas, os perfis de temperatura e a perda de vida em pu para um carregamento puramente senoidal e outro não senoidal, mantendo-se a mesma forma para a curva diária de carga em ambos os casos.

O carregamento não senoidal foi simulado considerando-se que o transformador alimenta um circuito composto apenas de equipamentos de iluminação eficiente, tomando-se a composição harmônica desses equipamentos como sendo a do secundário do transformador. Os oito dispositivos ensaiados no Capítulo VII, cujos resultados encontram-se no Apêndice I, foram os equipamentos simulados.

Considerou-se todos os parâmetros nominais internos do transformador simulado referidos ao enrolamento de baixa tensão.

A seguir apresenta-se o programa escrito para realizar as simulações.



VIII.3 LISTAGEM DO PROGRAMA

PROGRAMA PRINCIPAL (PRINCIPAL.M)

```
%PROGRAMA PARA O CALCULO DA PERDA DE VIDA
```

```
%INICIALIZAÇÃO
```

```
INICIO; %Subrotina de inicialização do programa
```

```
%CALCULOS PARA CARREGAMENTO NAO SENOIDAL
```

```
for ano=1:8;
```

```
    TRAFO45; %Arquivo de dados do transformador simulado
```

```
    CARGA1; %Arquivo de dados da curva diaria de carga e de temperatura ambiente
```

```
    LAMPADA8; %Arquivo de dados das componentes harmonicas da carga
```

```
    PARAMETROS; %Subrotina que calcula a variação da resistencia dos enrolamentos do transformador com a frequencia
```

```
    PERDASINTERNAS; %Subrotina que calcula as perdas internas do transformador para carregamento nao senoidal
```

```
    PERFILTEMPERATURA; %Subrotina que calcula os perfis de temperatura interna do transformador para carregamento nao senoidal
```

```
    PERDADEVIDA; %Subrotina que calcula os valores de perda de vida pu do transformador para carregamento nao senoidal
```

```
end
```

```
PVH=PVano;
```

```
THSH=TH+S;
```

```
%Teste para ver se a temperatura de hottest spot ultrapassa a temperatura de fulgor do oleo
```

```
GUI=0;
```

```
for t=1:24
```

```
    if THSH(t)>=Tf
```

```
        GUI=1;
```

```
        clc;
```

```
        disp(sprintf('    Para carregamento nao senoidal.Em t=%d\n',t));
```

```
        disp(' a temperatura de fulgor do oleo foi alcançada. O transformador nao pode');
```

```
        disp('    trabalhar nessa temperatura. Carregamento excessivo.    ');
```

```
        disp(' ');
```

```
        disp('    Presione qq tecla para continuar...    ');
```

```
        disp('');
```

```
        pause;
```

```
    end
```

```
end
```

```
if GUI==1
```

```
    disp(' ');
```

```
    disp(' ');
```

```
    disp('    ABORTANDO CALCULOS    ');
```

```
    disp(' ');
```

```
    disp('    Pressione qualquer tecla para encerrar a programa...    ');
```

```
    disp('');
```

```
    pause;
```



```

clc;

end

%CALCULOS PARA CARREGAMENTO PURAMENTE SENOIDAL

for ano=1:8;

    PERFILTEMPERATURASENOIDAL; %Subrotina que calcula os perfis de temperatura interna do transformador para
    carregamento senoidal

    PERDADEVIDA; %Subrotina que calcula os valores de perda de vida pu do transformador para carregamento senoidal

end

PVSENOIDAL=PVano;

THSENOIDAL=THS;

%Teste para ver se a temperatura de hottest spot ultrapassa a temperatura de fulgor do oleo

GUI=0;

for t=1:24

    if THSENOIDAL(t)>=Tf

        GUI=1;

        clc;

        disp(sprintf('    Para carregamento senoidal.Em t=%d\n',t));

        disp(' a temperatura de fulgor do oleo foi alcançada. O transformador nao pode');

        disp('    trabalhar nessa temperatura. Carregamento excessivo.    ');

        disp('                                ');

        disp('    Presione qq tecla para continuar...    ');

        disp('');

        pause;

    end

end

if GUI==1

    disp('                                ');

    disp('                                ');

    disp('    ABORTANDO CALCULOS                                ');

    disp('                                ');

    disp('    Pressione qualquer tecla para encerrar a programa...    ');

    disp('');

    pause;

    clc;

end

%IMPRESSAO DOS RESULTADOS

IMPRIME; %Subrotina de impressao dos resultados
    
```



SUBROTINA DE INICIALIZAÇÃO (INICIO.M)

```

%INICIALIZAÇÃO
clear;
clc;
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('\n'));
disp('                LABORATORIO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELETRICA');
disp(sprintf('\n'));
disp('                PROGRAMA DE CALCULO DE PERDA DE VIDA EM TRANSFORMADORES');
disp('                DE DISTRIBUIÇÃO');
disp(sprintf('\n'));
disp('                Aluna: Daniella Gonzalez Tinois da Silva');
disp('                Orientador: Jose Carlos Rossi');
disp(sprintf('\n'));
disp('                Maio/2002');
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('\n'));
disp('                Pressione qualquer tecla para continuar...');
disp('');
pause;
clc;

```

ARQUIVO DE DADOS DA CURVA DIÁRIA CARGA E DE TEMPERATURA AMBIENTE (CARGA1.M)

```

%DADOS CURVA DIARIA DE CARGA

%DADOS
K=[0.34 0.4067 0.4627 0.7387 1.0 0.944 0.8613 0.6920 0.48];
Sm=[0.085 0.111 0.138 0.249 0.273 0.208 0.18 0.138 0.098];

Km=((1+0)^ano)*K; %Consideração de aumento de carga anual a uma taxa r

%ESTRATIFICAÇÃO
%IC=2,5% - 24 pontos
K1=Km+(-1.960)*Sm;
%IC=10% - 24 pontos
K2=Km+(-1.280)*Sm;
%IC=20% - 24 pontos

```



K3=Km+(-0.840)*Sm;

%IC=30% - 24 pontos

K4=Km+(-0.525)*Sm;

%IC=40% - 24 pontos

K5=Km+(-0.225)*Sm;

%IC=50% - 24 pontos

K6=Km+(0)*Sm;

%IC=60% - 24 pontos

K7=Km+(0.225)*Sm;

%IC=70% - 24 pontos

K8=Km+(0.525)*Sm;

%IC=80% - 24 pontos

K9=Km+(0.840)*Sm;

%IC=90% - 24 pontos

K10=Km+(1.280)*Sm;

%IC=97,5% - 24 pontos

K11=Km+(1.960)*Sm;

%DADOS TEMPERATURA AMBIENTE

Ta=[16.8 22.2 20.1 19.0 18.2 17.7 17.4 17.0 16.7];

for t=1:10

Tam(t)=Ta(1);

end

for t=11:16

Tam(t)=Ta(2);

end

Tam(17)=Ta(3);

Tam(18)=Ta(4);

Tam(19)=Ta(5);

Tam(20)=Ta(6);

Tam(21)=Ta(7);

Tam(22)=Ta(8);

Tam(23)=Ta(8);

Tam(24)=Ta(9);

%TRANSFORMACAO DA CURVA DE CARGA PARA 24 PONTOS - 9 PATAMARES

for t=1:10;

K1N(t,1)=K1(1);

K2N(t,1)=K2(1);

K3N(t,1)=K3(1);

K4N(t,1)=K4(1);

K5N(t,1)=K5(1);

K6N(t,1)=K6(1);



```

K7N(t,1)=K7(1);
K8N(t,1)=K8(1);
K9N(t,1)=K9(1);
K10N(t,1)=K10(1);
K11N(t,1)=K11(1);
end
for t=11:16;
    K1N(t,1)=K1(2);
    K2N(t,1)=K2(2);
    K3N(t,1)=K3(2);
    K4N(t,1)=K4(2);
    K5N(t,1)=K5(2);
    K6N(t,1)=K6(2);
    K7N(t,1)=K7(2);
    K8N(t,1)=K8(2);
    K9N(t,1)=K9(2);
    K10N(t,1)=K10(2);
    K11N(t,1)=K11(2);
end
K1N(17,1)=K1(3);
K2N(17,1)=K2(3);
K3N(17,1)=K3(3);
K4N(17,1)=K4(3);
K5N(17,1)=K5(3);
K6N(17,1)=K6(3);
K7N(17,1)=K7(3);
K8N(17,1)=K8(3);
K9N(17,1)=K9(3);
K10N(17,1)=K10(3);
K11N(17,1)=K11(3);

K1N(18,1)=K1(4);
K2N(18,1)=K2(4);
K3N(18,1)=K3(4);
K4N(18,1)=K4(4);
K5N(18,1)=K5(4);
K6N(18,1)=K6(4);
K7N(18,1)=K7(4);
K8N(18,1)=K8(4);
K9N(18,1)=K9(4);
K10N(18,1)=K10(4);
K11N(18,1)=K11(4);

K1N(19,1)=K1(5);

```


K2N(19,1)=K2(5);
 K3N(19,1)=K3(5);
 K4N(19,1)=K4(5);
 K5N(19,1)=K5(5);
 K6N(19,1)=K6(5);
 K7N(19,1)=K7(5);
 K8N(19,1)=K8(5);
 K9N(19,1)=K9(5);
 K10N(19,1)=K10(5);
 K11N(19,1)=K11(5);

K1N(20,1)=K1(6);
 K2N(20,1)=K2(6);
 K3N(20,1)=K3(6);
 K4N(20,1)=K4(6);
 K5N(20,1)=K5(6);
 K6N(20,1)=K6(6);
 K7N(20,1)=K7(6);
 K8N(20,1)=K8(6);
 K9N(20,1)=K9(6);
 K10N(20,1)=K10(6);
 K11N(20,1)=K11(6);

K1N(21,1)=K1(7);
 K2N(21,1)=K2(7);
 K3N(21,1)=K3(7);
 K4N(21,1)=K4(7);
 K5N(21,1)=K5(7);
 K6N(21,1)=K6(7);
 K7N(21,1)=K7(7);
 K8N(21,1)=K8(7);
 K9N(21,1)=K9(7);
 K10N(21,1)=K10(7);
 K11N(21,1)=K11(7);

for t=22:23;

K1N(t,1)=K1(8);
 K2N(t,1)=K2(8);
 K3N(t,1)=K3(8);
 K4N(t,1)=K4(8);
 K5N(t,1)=K5(8);
 K6N(t,1)=K6(8);
 K7N(t,1)=K7(8);
 K8N(t,1)=K8(8);



```
K9N(t,1)=K9(8);
K10N(t,1)=K10(8);
K11N(t,1)=K11(8);
end
```

```
K1N(24,1)=K1(9);
K2N(24,1)=K2(9);
K3N(24,1)=K3(9);
K4N(24,1)=K4(9);
K5N(24,1)=K5(9);
K6N(24,1)=K6(9);
K7N(24,1)=K7(9);
K8N(24,1)=K8(9);
K9N(24,1)=K9(9);
K10N(24,1)=K10(9);
K11N(24,1)=K11(9);
```

ARQUIVO DE DADOS DO TRANSFORMADOR (TRAFO45.M)

%Transformador 45 KVA

```
SN=45000; %potencia nominal VA
V1p=13800; %tensao nominal no lado de alta tensao V
V1s=127; %tensao nominal do lado de baixa tensao V
I1p=(SN/V1p); %corrente nominal no lado de alta tensao A
I1s=(SN/V1s); %corrente nominal no lado de baixa tensao A
f=60; %frequencia nominal de funcionamento Hz
Pfe1=189; %perdas totais no ferro na frequencia fundamental em W
Pf1=(20/100)*Pfe1; %perdas por corrente de foucalt na frequencia fundamental em W
Ph1=Pfe1-Pf1; %perdas por histerese na frequencia fundamental em W
Pcu1=827; %perdas no cobre na frequencia fundamental em W
Pec1=(0.46/100)*Pcu1; %perdas suplementares na frequencia fundamental em W
Pj1=Pcu1-Pec1; %perdas nos enrolamentos na frequencia fundamental em W
Rccper=1.84; %resistencia percentual %
Xccper=2.95; %reatancia percentual %
Zccper=3.48; %impedancia percentual %
Rcceq=((V1s/I1s)*(Rccper/100))*1.673e3; %Resistencia equivalente a corrente continua ohm
Gopc=50; % elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal oC
Ghspe=10; %elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento acima da do oleo nominal oC
Thspe=95;%temperatura nominal de hottest spot para transformadores classe 65 oC
Topc=2.6; %constante de tempo de aquecimento do oleo - horas
Tepc=0.08; %constante de tempo de aquecimento do enrolamento - horas
Tf=250; %temperatura de fulgor do oleo oC
delta=0.0027; %espessura da chapa do nucleo em metros
```



mi=0.0063; %permeabilidade magnetica do nucleo - H/m
 gama=10e7; %condutividade eletrica do nucleo - ohm/m
 m=0.8; %expoente de refrigeração
 s=2; %expoente de Steimmetz
 EVnom=70000; %Expectativa de vida minima nominal para Ths=95 oC - horas
 r=0.05; %Taxa de crescimento de carga

ARQUIVOS DE DADOS DAS COMPONENTES HARMONICAS DA CARGA (LAMPADAX.M – X=1,2...9)

LAMPADA1.M

%DADOS REFERENTES A LAMPADA LIGHTEX 27 W

%Dados de tensao

Vs=(1/100)*[100 0.19 0.37 0.15 0.11 0.15 0.11 0.09 0.04 0.19 0.12 0.06 0.03 0.01 0.06 0.08 0.02 0.06 0.07 0.11]; %Tensoes pu da nominal

Fivs=[0 165 -123 -149 -165 -108 123 -152 -147 -166 165 179 -50 66.8 -145 -178 -161 -112 131 146]; %Fases da tensao graus

Fivsrads=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente

Is=(1/100)*[100 0.22 84.61 1.13 60.04 0.07 37.03 0.58 24.14 0.25 25.13 0.45 24.09 1.44 20.68 0.46 17.4 0.23 18.67 0.77]; %Correntes pu da nominal

Fias=[0 171 159 -35.4 -19.3 91.8 150 -104 -63 -143 87.3 -7.31 -107 69.7 53.7 -179 -153 83.5 4.84 172]; %Fases da Corrente graus

Fiasrads=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;

for n=1:20

I1(p,n)=K1(p)*Is(n);

I2(p,n)=K2(p)*Is(n);

I2(p,n)=K2(p)*Is(n);

I3(p,n)=K3(p)*Is(n);

I4(p,n)=K4(p)*Is(n);

I5(p,n)=K5(p)*Is(n);

I6(p,n)=K6(p)*Is(n);

I7(p,n)=K7(p)*Is(n);

I8(p,n)=K8(p)*Is(n);

I9(p,n)=K9(p)*Is(n);

I10(p,n)=K10(p)*Is(n);

I11(p,n)=K11(p)*Is(n);

end

end

LAMPADA2.M

%DADOS REFERENTES A LAMPADA ECOTONE FLUORESCENTE CIRCULAR PHILIPS

%Dados de tensao

Vs=(1/100)*[100 0.25 0.28 0.05 0.14 0.07 0.10 0.09 0.04 0.09 0.09 0.09 0.01 0.12 0.11 0.06 0.06 0.08 0.1 0.11]; %Tensoes pu da nominal

Fivs=[0 -172 -114 -95 152 155 -160 -139 -143 -14.5 -171 132 118 142 -179 -119 97.2 141 -153 -130]; %Fases da tensao graus




```

ivsrad=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente
Is=(1/100)*[100 0.45 9.72 0.50 1.28 0.53 1.18 0.60 0.62 0.49 0.27 0.44 0.42 0.42 0.35 0.39 0.62 0.11 0.63 0.37]; %Correntes pu da nominal
Fias=[0 1.96 -76.1 28.3 -41.4 -8.83 -53.8 -127 -129 74.3 -85.5 -148 -29.4 113 -12.7 -92.7 -140 52.9 -109 75.5]; %Fases da Corrente graus
Fiasrad=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;
    for n=1:20
        I1(p,n)=K1(p)*Is(n);
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
        I3(p,n)=K3(p)*Is(n);
        I4(p,n)=K4(p)*Is(n);
        I5(p,n)=K5(p)*Is(n);
        I6(p,n)=K6(p)*Is(n);
        I7(p,n)=K7(p)*Is(n);
        I8(p,n)=K8(p)*Is(n);
        I9(p,n)=K9(p)*Is(n);
        I10(p,n)=K10(p)*Is(n);
        I11(p,n)=K11(p)*Is(n);
    end
end

LAMPADA3.M

%DADOS REFERENTES A LAMPADA FLUORESCENTE COMPACTA OSRAM

%Dados de tensao
Vs=(1/100)*[100 0.26 0.42 0.10 0.05 0.06 0.22 0.05 0.09 0.07 0.09 0.02 0.08 0.07 0.02 0.06 0.08 0.07 0.03 0.04]; %Tensoes pu da nominal
Fivs=[0 -176 -102 -169 161 -129 -164 132 -41 -81 106 82.1 135 160 134 125 115 -133 -90.2 157]; %Fases da tensao graus
Fivsrad=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente
Is=(1/100)*[100 0.54 93.41 1.42 82 2.16 67.19 1.48 50.98 2.08 36.77 1.31 27.39 0.84 23.03 0.44 22.45 1.22 21.78 1.01]; %Correntes pu da nominal
Fias=[0 98.9 169 -32.4 -5.82 -174 177 16.4 -2.85 151 170 -15.2 -23.7 -165 138 -95.9 -59 114 112 -102]; %Fases da Corrente graus
Fiasrad=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;
    for n=1:20
        I1(p,n)=K1(p)*Is(n);
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
    end
end
    
```



```

I3(p,n)=K3(p)*Is(n);
I4(p,n)=K4(p)*Is(n);
I5(p,n)=K5(p)*Is(n);
I6(p,n)=K6(p)*Is(n);
I7(p,n)=K7(p)*Is(n);
I8(p,n)=K8(p)*Is(n);
I9(p,n)=K9(p)*Is(n);
I10(p,n)=K10(p)*Is(n);
I11(p,n)=K11(p)*Is(n);
end
end

LAMPADA4.M

%DADOS REFERENTES A LAMPADA ECONOMICA PHILIPS ECOTONE

%Dados de tensao
Vs=(1/100)*[100 0.06 0.25 0.17 0.09 0.02 0.06 0.05 0.04 0.1 0.06 0.09 0.09 0.02 0.08 0.04 0.02 0.15 0.12 0.13]; %Tensoes pu da nominal
Fivs=[0 88 -99.5 -120 -104 -155 151 110 -55 120 116 128 -168 88.8 -121 -115 -43.5 -81.9 157 95.9]; %Fases da tensao graus
Fivsrads=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente
Is=(1/100)*[100 1.1 89.29 0.5 70.77 1.25 50.05 0.41 29.51 0.8 20.75 1.27 17.14 0.92 16.39 0.44 14.12 1.43 11.38 1.71];
%Correntes pu da nominal
Fias=[0 171 164 85.2 -12.1 158 167 177 -21.2 70.8 129 147 -81.1 74.8 84.3 -30.1 111 56.8 47.2 -53.3]; %Fases da Corrente graus
Fiasrads=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;
    for n=1:20
        I1(p,n)=K1(p)*Is(n);
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
        I3(p,n)=K3(p)*Is(n);
        I4(p,n)=K4(p)*Is(n);
        I5(p,n)=K5(p)*Is(n);
        I6(p,n)=K6(p)*Is(n);
        I7(p,n)=K7(p)*Is(n);
        I8(p,n)=K8(p)*Is(n);
        I9(p,n)=K9(p)*Is(n);
        I10(p,n)=K10(p)*Is(n);
        I11(p,n)=K11(p)*Is(n);
    end
end

LAMPADA5.M

%DADOS REFERENTES A LAMPADA COMPACTA FLUORESCENTE ESPIRAL GOLDEN PLUS

```



%Dados de tensao

Vs=(1/100)*[100 0.08 0.27 0.12 0.01 0.04 0.09 0.04 0.09 0.17 0.02 0.04 0.12 0.11 0.09 0.03 0.05 0.03 0.03 0.04]; %Tensoes pu da nominal

Fivs=[0 -176 -87 -88.2 -51.6 116 126 -174 105 -19.1 -105 -19.9 -112 -175 -125 -52.4 128 167 172 -136]; %Fases da tensao graus

Fivsrad=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente

Is=(1/100)*[100 1.29 88.29 1.21 68.25 0.62 43.98 0.45 27.29 1.44 22.76 1.04 22.94 1.06 23.78 2.32 2.6 1.93 18.75 1.78]; %Correntes pu da nominal

Fias=[0 -65.4 167 41.2 -4.24 118 174 -85.7 -24.4 94.3 130 -76.3 -68 -50.7 100 -65.4 -93.2 127 66.6 -66.4]; %Fases da Corrente graus

Fiasrad=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;

for n=1:20

I1(p,n)=K1(p)*Is(n);

I2(p,n)=K2(p)*Is(n);

I2(p,n)=K2(p)*Is(n);

I3(p,n)=K3(p)*Is(n);

I4(p,n)=K4(p)*Is(n);

I5(p,n)=K5(p)*Is(n);

I6(p,n)=K6(p)*Is(n);

I7(p,n)=K7(p)*Is(n);

I8(p,n)=K8(p)*Is(n);

I9(p,n)=K9(p)*Is(n);

I10(p,n)=K10(p)*Is(n);

I11(p,n)=K11(p)*Is(n);

end

end

LAMPADA6.M

%DADOS REFERENTES A LAMPADA COMPACTA FLUORESCENTE YELLOWSTAR

%Dados de tensao

Vs=(1/100)*[100 0.29 0.34 0.12 0.13 0.04 0.09 0.08 0.1 0.04 0.09 0.09 0.04 0.13 0.07 0.06 0.04 0.12 0.01 0.11]; %Tensoes pu da nominal

Fivs=[0 170 -106 -126 -159 91.8 -149 -98.8 -179 -157 106 -113 142 38.7 161 -84.5 -166 -144 -153 -38.9]; %Fases da tensao graus

Fivsrad=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente

Is=(1/100)*[100 1.47 90.32 1.22 72.52 1.57 48.28 0.79 32.1 2.19 23.71 1.68 23.2 1.27 20.46 0.92 16.33 1.51 15.98 1.02]; %Correntes pu da nominal

Fias=[0 149 159 -79.9 -17 90.4 159 -101 -34 -45.3 116 -31.3 -88.9 1.66 82.6 -82 -121 4.21 46.9 -175]; %Fases da Corrente graus

Fiasrad=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;


```
for n=1:20
```

```
    I1(p,n)=K1(p)*Is(n);
```

```
    I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
```

```
    I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
```

```
    I3(p,n)=K3(p)*Is(n);
```

```
    I4(p,n)=K4(p)*Is(n);
```

```
    I5(p,n)=K5(p)*Is(n);
```

```
    I6(p,n)=K6(p)*Is(n);
```

```
    I7(p,n)=K7(p)*Is(n);
```

```
    I8(p,n)=K8(p)*Is(n);
```

```
    I9(p,n)=K9(p)*Is(n);
```

```
    I10(p,n)=K10(p)*Is(n);
```

```
    I11(p,n)=K11(p)*Is(n);
```

```
end
```

```
end
```

LAMPADA7.M

```
%DADOS REFERENTES A REATOR ELETRONICO LIGHTNOW 2X40 MAGIRUS
```

```
%Dados de tensao
```

```
Vs=(1/100)*[100 0.31 0.51 0.21 0.07 0.11 0.07 0.11 0.08 0.08 0.16 0.1 0.04 0.04 0.17 0.08 0.05 0.09 0.18 0.18]; %Tensoes pu da nominal
```

```
Fivs=[0 164 -115 -143 -112 -87.5 107 126 166 -158 165 -170 175 55.8 113 -53.3 -92.6 110 -176 133]; %Fases da tensao graus
```

```
Fivsrad=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos
```

```
%Dados de Corrente
```

```
Is=(1/100)*[100 0.76 82.97 1.64 54.59 1.01 29.58 0.95 21.5 1.17 21.6 1.05 18.26 1.35 14.06 1.78 13.43 1.32 13.38 0.93]; %Correntes pu da nominal
```

```
Fias=[0 163 153 -50.7 -27.8 136 134 -79 -90.3 66.6 60.1 -143 -140 21.6 10.5 172 156 -11 -48.8 138]; %Fases da Corrente graus
```

```
Fiasrad=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos
```

```
for p=1:9;
```

```
    for n=1:20
```

```
        I1(p,n)=K1(p)*Is(n);
```

```
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
```

```
        I2(p,n)=K2(p)*Is(n);
```

```
        I3(p,n)=K3(p)*Is(n);
```

```
        I4(p,n)=K4(p)*Is(n);
```

```
        I5(p,n)=K5(p)*Is(n);
```

```
        I6(p,n)=K6(p)*Is(n);
```

```
        I7(p,n)=K7(p)*Is(n);
```

```
        I8(p,n)=K8(p)*Is(n);
```

```
        I9(p,n)=K9(p)*Is(n);
```

```
        I10(p,n)=K10(p)*Is(n);
```

```
        I11(p,n)=K11(p)*Is(n);
```

```
    end
```

end

LAMPADA8.M

%DADOS REFERENTES A REATOR ELETRONICO 2X40 INTRAL

%Dados de tensao

Vs=(1/100)*[100 0.21 0.33 0.1 0.07 0.09 0.09 0.05 0.09 0.07 0.10 0.03 0.04 0.07 0.07 0.05 0.03 0.08 0.03 0.06]; %Tensoes pu da nominal

Fivs=[0 157 -106 -66.6 -173 -163 170 -127 -34.4 173 172 54.1 -17.7 157 -117 -162 -109 165 12.8 -33.1]; %Fases da tensao graus

Fivsrad=(Fivs*2*pi)/360; %Fases da tensao em radianos

%Dados de Corrente

Is=(1/100)*[100 2.19 25.41 2.73 19.56 3.64 18.89 2.87 11.96 1.84 10.29 3.33 8.41 2.77 5.82 2.18 5.25 2.46 4.57 1.94]; %Correntes pu da nominal

Fias=[0 78.7 160 -163 -22.3 26.9 138 -157 -40.1 -8.79 130 176 -59.2 -2.44 110 129 -76.3 -31.3 93.8 155]; %Fases da Corrente graus

Fiasrad=(Fias*2*pi)/360; %Fases da corrente em radianos

for p=1:9;

for n=1:20

I1(p,n)=K1(p)*Is(n);

I2(p,n)=K2(p)*Is(n);

I2'(p,n)=K2(p)*Is(n);

I3(p,n)=K3(p)*Is(n);

I4(p,n)=K4(p)*Is(n);

I5(p,n)=K5(p)*Is(n);

I6(p,n)=K6(p)*Is(n);

I7(p,n)=K7(p)*Is(n);

I8(p,n)=K8(p)*Is(n);

I9(p,n)=K9(p)*Is(n);

I10(p,n)=K10(p)*Is(n);

I11(p,n)=K11(p)*Is(n);

end

end

SUBROTINA QUE CALCULA A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A FREQUÊNCIA (PARAMETROS.M)

%CALCULO DA VARIAÇÃO DA RESISTENCIA COM A FREQUENCIA

for n = 1:20,

aux(n)=n*f/Rcceq;

if aux(n)>1350

Req(n)=0.25+0.255*sqrt(aux(n))+2.0846*(1/(sqrt(aux(n))));

else

Req(n)=1+(8.522*10^-8*aux(n)^2)-(5.81*10^-15*aux(n));

end



end

SUBROTINA QUE CALCULA A VARIAÇÃO DAS PERDAS INTERNAS DO TRANSFORMADOR PARA CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL (PERDASINTERNAS)

```
%CALCULO DAS PERDAS INTERNAS DO TRANSFORMADOR
```

```
%CALCULO DAS PERDAS NO FERRO
```

```
for n=2:20
```

```
    Ph(n)=((1/n)*Vs(n)*cos(Fivrad(n)))^s;
```

```
    Pf(n)=(Vs(n)*cos(Fivrad(n)))^2;
```

```
    psi=delta*sqrt(pi*mi*gama*n*f);
```

```
    if psi>9.6
```

```
        Cen(n,1)=3/psi;
```

```
    else
```

```
        Cen(n,1)=1-(0.0017*(psi^3.61));
```

```
    end
```

```
end
```

```
Phn=(1+sum(Ph))*Ph1;
```

```
Pfn=(1+sum(Pf*Cen))*Pf1;
```

```
%CALCULO DAS PERDAS NO COBRE
```

```
for p=1:9;
```

```
    PJ1(p,1)=0;
```

```
    PJ2(p,1)=0;
```

```
    PJ3(p,1)=0;
```

```
    PJ4(p,1)=0;
```

```
    PJ5(p,1)=0;
```

```
    PJ6(p,1)=0;
```

```
    PJ7(p,1)=0;
```

```
    PJ8(p,1)=0;
```

```
    PJ9(p,1)=0;
```

```
    PJ10(p,1)=0;
```

```
    PJ11(p,1)=0;
```

```
for n=1:20;
```

```
    PJ1(p,1)=PJ1(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I1(p,n)^2))+Pec1*(I1(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ2(p,1)=PJ2(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I2(p,n)^2))+Pec1*(I2(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ3(p,1)=PJ3(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I3(p,n)^2))+Pec1*(I3(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ4(p,1)=PJ4(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I4(p,n)^2))+Pec1*(I4(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ5(p,1)=PJ5(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I5(p,n)^2))+Pec1*(I5(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ6(p,1)=PJ6(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I6(p,n)^2))+Pec1*(I6(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ7(p,1)=PJ7(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I7(p,n)^2))+Pec1*(I7(n)^2)*(n^2);
```

```
    PJ8(p,1)=PJ8(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I8(p,n)^2))+Pec1*(I8(n)^2)*(n^2);
```



```

PJ9(p,1)=PJ9(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I9(p,n)^2))+Pec1*(I9(n)^2)*(n^2);
PJ10(p,1)=PJ10(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I10(p,n)^2))+Pec1*(I10(n)^2)*(n^2);
PJ11(p,1)=PJ11(p,1)+Pj1*(Req(n)*(I11(p,n)^2))+Pec1*(I11(n)^2)*(n^2);
end
end

%TRANSFORMACAO PARA 24 PONTOS

for t=1:10;
    PJ1N(t,1)=PJ1(1,1);
    PJ2N(t,1)=PJ2(1,1);
    PJ3N(t,1)=PJ3(1,1);
    PJ4N(t,1)=PJ4(1,1);
    PJ5N(t,1)=PJ5(1,1);
    PJ6N(t,1)=PJ6(1,1);
    PJ7N(t,1)=PJ7(1,1);
    PJ8N(t,1)=PJ8(1,1);
    PJ9N(t,1)=PJ9(1,1);
    PJ10N(t,1)=PJ10(1,1);
    PJ11N(t,1)=PJ11(1,1);
end
for t=11:16,
    PJ1N(t,1)=PJ1(2,1);
    PJ2N(t,1)=PJ2(2,1);
    PJ3N(t,1)=PJ3(2,1);
    PJ4N(t,1)=PJ4(2,1);
    PJ5N(t,1)=PJ5(2,1);
    PJ6N(t,1)=PJ6(2,1);
    PJ7N(t,1)=PJ7(2,1);
    PJ8N(t,1)=PJ8(2,1);
    PJ9N(t,1)=PJ9(2,1);
    PJ10N(t,1)=PJ10(2,1);
    PJ11N(t,1)=PJ11(2,1);
end

PJ1N(17,1)=PJ1(3,1);
PJ2N(17,1)=PJ2(3,1);
PJ3N(17,1)=PJ3(3,1);
PJ4N(17,1)=PJ4(3,1);
PJ5N(17,1)=PJ5(3,1);
PJ6N(17,1)=PJ6(3,1);
PJ7N(17,1)=PJ7(3,1);
PJ8N(17,1)=PJ8(3,1);
PJ9N(17,1)=PJ9(3,1);

```



PJ10N(17,1)=PJ10(3,1);

PJ11N(17,1)=PJ11(3,1);

PJ1N(18,1)=PJ1(4,1);

PJ2N(18,1)=PJ2(4,1);

PJ3N(18,1)=PJ3(4,1);

PJ4N(18,1)=PJ4(4,1);

PJ5N(18,1)=PJ5(4,1);

PJ6N(18,1)=PJ6(4,1);

PJ7N(18,1)=PJ7(4,1);

PJ8N(18,1)=PJ8(4,1);

PJ9N(18,1)=PJ9(4,1);

PJ10N(18,1)=PJ10(4,1);

PJ11N(18,1)=PJ11(4,1);

PJ1N(19,1)=PJ1(5,1);

PJ2N(19,1)=PJ2(5,1);

PJ3N(19,1)=PJ3(5,1);

PJ4N(19,1)=PJ4(5,1);

PJ5N(19,1)=PJ5(5,1);

PJ6N(19,1)=PJ6(5,1);

PJ7N(19,1)=PJ7(5,1);

PJ8N(19,1)=PJ8(5,1);

PJ9N(19,1)=PJ9(5,1);

PJ10N(19,1)=PJ10(5,1);

PJ11N(19,1)=PJ11(5,1);

PJ1N(20,1)=PJ1(6,1);

PJ2N(20,1)=PJ2(6,1);

PJ3N(20,1)=PJ3(6,1);

PJ4N(20,1)=PJ4(6,1);

PJ5N(20,1)=PJ5(6,1);

PJ6N(20,1)=PJ6(6,1);

PJ7N(20,1)=PJ7(6,1);

PJ8N(20,1)=PJ8(6,1);

PJ9N(20,1)=PJ9(6,1);

PJ10N(20,1)=PJ10(6,1);

PJ11N(20,1)=PJ11(6,1);

PJ1N(21,1)=PJ1(7,1);

PJ2N(21,1)=PJ2(7,1);

PJ3N(21,1)=PJ3(7,1);

PJ4N(21,1)=PJ4(7,1);

PJ5N(21,1)=PJ5(7,1);



```
PJ6N(21,1)=PJ6(7,1);
PJ7N(21,1)=PJ7(7,1);
PJ8N(21,1)=PJ8(7,1);
PJ9N(21,1)=PJ9(7,1);
PJ10N(21,1)=PJ10(7,1);
PJ11N(21,1)=PJ11(7,1);
```

```
for t=22:23;
```

```
    PJ1N(t,1)=PJ1(8,1);
    PJ2N(t,1)=PJ2(8,1);
    PJ3N(t,1)=PJ3(8,1);
    PJ4N(t,1)=PJ4(8,1);
    PJ5N(t,1)=PJ5(8,1);
    PJ6N(t,1)=PJ6(8,1);
    PJ7N(t,1)=PJ7(8,1);
    PJ8N(t,1)=PJ8(8,1);
    PJ9N(t,1)=PJ9(8,1);
    PJ10N(t,1)=PJ10(8,1);
    PJ11N(t,1)=PJ11(8,1);
```

```
end
```

```
PJ1N(24,1)=PJ1(9,1);
PJ2N(24,1)=PJ2(9,1);
PJ3N(24,1)=PJ3(9,1);
PJ4N(24,1)=PJ4(9,1);
PJ5N(24,1)=PJ5(9,1);
PJ6N(24,1)=PJ6(9,1);
PJ7N(24,1)=PJ7(9,1);
PJ8N(24,1)=PJ8(9,1);
PJ9N(24,1)=PJ9(9,1);
PJ10N(24,1)=PJ10(9,1);
PJ11N(24,1)=PJ11(9,1);
```

SUBROTINA QUE CALCULA OS PERFIS DE TEMPERATURA INTERNA DO TRANSFORMADOR PARA CARREGAMENTO NÃO SENOIDAL (PERFILTEMPERATURA.M)

```
% CALCULO DO PERFIL DE TEMPERATURA INTERNA DO TRANSFORMADOR
```

```
%EXTRATO 1
```

```
N=1;
```

```
Thsi(1)=Thspc;
```

```
Ghsi(1)=Ghspc;
```

```
Goi(1)=Gopc;
```

```
while N==1;
```



```

for t=1:24;
M=1;
while M==1;
    C1(t)=(234.5+Thsi1(t))/(234.5+Thspc);
    Goreg1(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ1N(t)*C1(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
    Ghsreg1(t)=Ghspc*(PJ1N(t)*C1(t)/Pj1)^m;
    To1(t)=Topc*((Goreg1(t)/Gopc)-(Goi1(t)/Gopc))/((Goreg1(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi1(t)/Gopc)^(1/m));
    Te1(t)=Tepc*((Ghsreg1(t)/Ghspc)-(Ghsi1(t)/Ghspc))/((Ghsreg1(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi1(t)/Ghspc)^(1/m));
    Go1(t)=(Goreg1(t)-Goi1(t))*(1-exp(-1/To1(t)))+Goi1(t);
    Ghs1(t)=(Ghsreg1(t)-Ghsi1(t))*(1-exp(-1/Te1(t)))+Ghsi1(t);
    Ths1(t)=Go1(t)+Ghs1(t)+Tam(t);
    if abs(Thsi1(t)-Ths1(t))>0.0001;
        M=1;
        Thsi1(t)=Ths1(t);
    else
        M=0;
        if t<24;
            Thsi1(t+1)=Ths1(t);
            Ghsi1(t+1)=Ghs1(t);
            Go1(t+1)=Go1(t);
        end
    end
end
if abs(Goi1(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi1(1)-Ghs1(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi1(1)=Go1(24);
    Ghsi1(1)=Ghs1(24);
    Thsi1(1)=Ths1(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 2
N=1;
Thsi2(1)=Thspc;
Ghsi2(1)=Ghspc;
Goi2(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C2(t)=(234.5+Thsi2(t))/(234.5+Thspc);

```

```

Goreg2(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ2N(t)*C2(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
Ghsreg2(t)=Ghspc*(PJ2N(t)*C2(t)/Pj1)^m;
To2(t)=Topc*((Goreg2(t)/Gopc)-(Goi2(t)/Gopc))/((Goreg2(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi2(t)/Gopc)^(1/m));
Te2(t)=Tepc*((Ghsreg2(t)/Ghspc)-(Ghsi2(t)/Ghspc))/((Ghsreg2(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi2(t)/Ghspc)^(1/m));
Go2(t)=(Goreg2(t)-Goi2(t))*(1-exp(-1/To2(t)))+Goi2(t);
Ghs2(t)=(Ghsreg2(t)-Ghsi2(t))*(1-exp(-1/Te2(t)))+Ghsi2(t);
Ths2(t)=Go2(t)+Ghs2(t)+Tam(t);
if abs(Thsi2(t)-Ths2(t))>0.0001;
    M=1;
    Thsi2(t)=Ths2(t);
else
    M=0;
    if t<24;
        Thsi2(t+1)=Ths2(t);
        Ghsi2(t+1)=Ghs2(t);
        Goi2(t+1)=Go2(t);
    end
end
end
if abs(Goi2(1)-Goi2(24))>0.0001 & abs(Ghsi2(1)-Ghsi2(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi2(1)=Go2(24);
    Ghsi2(1)=Ghs2(24);
    Thsi2(1)=Ths2(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 3
N=1;
Thsi3(1)=Thspc;
Ghsi3(1)=Ghspc;
Goi3(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C3(t)=(234.5+Thsi3(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg3(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ3N(t)*C3(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg3(t)=Ghspc*(PJ3N(t)*C3(t)/Pj1)^m;
            To3(t)=Topc*((Goreg3(t)/Gopc)-(Goi3(t)/Gopc))/((Goreg3(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi3(t)/Gopc)^(1/m));
            Te3(t)=Tepc*((Ghsreg3(t)/Ghspc)-(Ghsi3(t)/Ghspc))/((Ghsreg3(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi3(t)/Ghspc)^(1/m));

```

```

Go3(t)=(Goreg3(t)-Goi3(t))*(1-exp(-1/To3(t)))+Goi3(t);
Ghs3(t)=(Ghsreg3(t)-Ghsi3(t))*(1-exp(-1/Te3(t)))+Ghsi3(t);
Ths3(t)=Go3(t)+Ghs3(t)+Tam(t);
if abs(Thsi3(t)-Ths3(t))>0.0001;
    M=1;
    Thsi3(t)=Ths3(t);
else
    M=0;
    if t<24;
        Thsi3(t+1)=Ths3(t);
        Ghsi3(t+1)=Ghs3(t);
        Goi3(t+1)=Go3(t);
    end
end
end
end
if abs(Goi3(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi3(1)-Ghs3(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi3(1)=Go3(24);
    Ghsi3(1)=Ghs3(24);
    Thsi3(1)=Ths3(1);
else
    N=0;
end
end
end

%EXTRATO 4
N=1;
Thsi4(1)=Thspc;
Ghsi4(1)=Ghspc;
Goi4(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C4(t)=(234.5+Thsi4(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg4(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ4N(t)*C4(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg4(t)=Ghspc*(PJ4N(t)*C4(t)/Pj1)^m;
            To4(t)=Topc*((Goreg4(t)/Gopc)-(Goi4(t)/Gopc))/((Goreg4(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi4(t)/Gopc)^(1/m));
            Te4(t)=Tepc*((Ghsreg4(t)/Ghspc)-(Ghsi4(t)/Ghspc))/((Ghsreg4(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi4(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go4(t)=(Goreg4(t)-Goi4(t))*(1-exp(-1/To4(t)))+Goi4(t);
            Ghs4(t)=(Ghsreg4(t)-Ghsi4(t))*(1-exp(-1/Te4(t)))+Ghsi4(t);
            Ths4(t)=Go4(t)+Ghs4(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi4(t)-Ths4(t))>0.0001;

```



```

M=1;
Thsi4(t)=Ths4(t);
else
M=0;
if t<24;
Thsi4(t+1)=Ths4(t);
Ghsi4(t+1)=Ghs4(t);
Goi4(t+1)=Go4(t);
end
end
end
if abs(Goi4(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi4(1)-Ghs4(24))>0.0001;
N=1;
Goi4(1)=Go4(24);
Ghsi4(1)=Ghs4(24);
Thsi4(1)=Ths4(1);
else
N=0;
end
end
end

%EXTRATO 5
N=1;
Thsi5(1)=Thspc;
Ghsi5(1)=Ghspc;
Goi5(1)=Gopc;
while N==1;
for t=1:24;
M=1;
while M==1;
C5(t)=(234.5+Thsi5(t))/(234.5+Thspc);
Goreg5(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ5N(t)*C5(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
Ghsreg5(t)=Ghspc*(PJ5N(t)*C5(t)/Pj1)^m;
To5(t)=Topc*((Goreg5(t)/Gopc)-(Goi5(t)/Gopc))/((Goreg5(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi5(t)/Gopc)^(1/m));
Te5(t)=Tepc*((Ghsreg5(t)/Ghspc)-(Ghsi5(t)/Ghspc))/((Ghsreg5(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi5(t)/Ghspc)^(1/m));
Go5(t)=(Goreg5(t)-Goi5(t))*(1-exp(-1/To5(t)))+Goi5(t);
Ghs5(t)=(Ghsreg5(t)-Ghsi5(t))*(1-exp(-1/Te5(t)))+Ghsi5(t);
Ths5(t)=Go5(t)+Ghs5(t)+Tam(t);
if abs(Thsi5(t)-Ths5(t))>0.0001;
M=1;
Thsi5(t)=Ths5(t);
else
M=0;

```



```

if t<24;
    Thsi5(t+1)=Ths5(t);
    Ghsi5(t+1)=Ghs5(t);
    Goi5(t+1)=Go5(t);
end
end
end
end

if abs(Goi5(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi5(1)-Ghs5(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi5(1)=Go5(24);
    Ghsi5(1)=Ghs5(24);
    Thsi5(1)=Ths5(1);
else
    N=0;
end
end

end

%EXTRATO 6
N=1;
Thsi6(1)=Ths6;
Ghsi6(1)=Ghs6;
Goi6(1)=Gop6;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C6(t)=(234.5+Thsi6(t))/(234.5+Ths6);
            Goreg6(t)=Gop6*((Pfn+Phn+PJ6N(t)*C6(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg6(t)=Ghs6*(PJ6N(t)*C6(t)/Pj1)^m;
            To6(t)=Topc*((Goreg6(t)/Gop6)-(Goi6(t)/Gop6))/((Goreg6(t)/Gop6)^(1/m)-(Goi6(t)/Gop6)^(1/m));
            Te6(t)=Tepc*((Ghsreg6(t)/Ghs6)-(Ghsi6(t)/Ghs6))/((Ghsreg6(t)/Ghs6)^(1/m)-(Ghsi6(t)/Ghs6)^(1/m));
            Go6(t)=(Goreg6(t)-Goi6(t))*(1-exp(-1/To6(t)))+Goi6(t);
            Ghs6(t)=(Ghsreg6(t)-Ghsi6(t))*(1-exp(-1/Te6(t)))+Ghsi6(t);
            Ths6(t)=Go6(t)+Ghs6(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi6(t)-Ths6(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi6(t)=Ths6(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi6(t+1)=Ths6(t);
                    Ghsi6(t+1)=Ghs6(t);
                    Goi6(t+1)=Go6(t);
                end
            end
        end
    end
end

```



```

        end
    end
end
end
if abs(Goi6(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi6(1)-Ghs6(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi6(1)=Go6(24);
    Ghsi6(1)=Ghs6(24);
    Thsi6(1)=Ths6(1);
else
    N=0;
end
end
end

%EXTRATO 7
N=1;
Thsi7(1)=Thspc;
Ghsi7(1)=Ghspc;
Goi7(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C7(t)=(234.5+Thsi7(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg7(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ7N(t)*C7(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg7(t)=Ghspc*(PJ7N(t)*C7(t)/Pj1)^m;
            To7(t)=Topc*((Goreg7(t)/Gopc)-(Goi7(t)/Gopc))/((Goreg7(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi7(t)/Gopc)^(1/m));
            Te7(t)=Tepc*((Ghsreg7(t)/Ghspc)-(Ghsi7(t)/Ghspc))/((Ghsreg7(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi7(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go7(t)=(Goreg7(t)-Goi7(t))*(1-exp(-1/To7(t)))+Goi7(t);
            Ghs7(t)=(Ghsreg7(t)-Ghsi7(t))*(1-exp(-1/Te7(t)))+Ghsi7(t);
            Ths7(t)=Go7(t)+Ghs7(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi7(t)-Ths7(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi7(t)=Ths7(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi7(t+1)=Ths7(t);
                    Ghsi7(t+1)=Ghs7(t);
                    Goi7(t+1)=Go7(t);
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```




```

if abs(Goi7(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi7(1)-Ghs7(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi7(1)=Go7(24);
    Ghsi7(1)=Ghs7(24);
    Thsi7(1)=Ths7(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 8
N=1;
Thsi8(1)=Thspc;
Ghsi8(1)=Ghspc;
Goi8(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C8(t)=(234.5+Thsi8(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg8(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ8N(t)*C8(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg8(t)=Ghspc*(PJ8N(t)*C8(t)/Pj1)^m;
            To8(t)=Topc*((Goreg8(t)/Gopc)-(Goi8(t)/Gopc))/((Goreg8(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi8(t)/Gopc)^(1/m));
            Te8(t)=Tepc*((Ghsreg8(t)/Ghspc)-(Ghsi8(t)/Ghspc))/((Ghsreg8(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi8(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go8(t)=(Goreg8(t)-Goi8(t))*(1-exp(-1/To8(t)))+Goi8(t);
            Ghs8(t)=(Ghsreg8(t)-Ghsi8(t))*(1-exp(-1/Te8(t)))+Ghsi8(t);
            Ths8(t)=Go8(t)+Ghs8(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi8(t)-Ths8(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi8(t)=Ths8(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi8(t+1)=Ths8(t);
                    Ghsi8(t+1)=Ghs8(t);
                    Goi8(t+1)=Go8(t);
                end
            end
        end
    end
end

if abs(Goi8(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi8(1)-Ghs8(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi8(1)=Go8(24);
    Ghsi8(1)=Ghs8(24);

```



```

Thsi8(1)=Ths8(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 9
N=1;
Thsi9(1)=Thspc;
Ghsi9(1)=Ghspc;
Goi9(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C9(t)=(234.5+Thsi9(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg9(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ9N(t)*C9(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg9(t)=Ghspc*(PJ9N(t)*C9(t)/Pj1)^m;
            To9(t)=Topc*((Goreg9(t)/Gopc)-(Goi9(t)/Gopc))/((Goreg9(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi9(t)/Gopc)^(1/m));
            Te9(t)=Tepc*((Ghsreg9(t)/Ghspc)-(Ghsi9(t)/Ghspc))/((Ghsreg9(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi9(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go9(t)=(Goreg9(t)-Goi9(t))*(1-exp(-1/To9(t)))+Goi9(t);
            Ghs9(t)=(Ghsreg9(t)-Ghsi9(t))*(1-exp(-1/Te9(t)))+Ghsi9(t);
            Ths9(t)=Go9(t)+Ghs9(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi9(t)-Ths9(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi9(t)=Ths9(t);
            else
                M=0;
            end
            if t<24;
                Thsi9(t+1)=Ths9(t);
                Ghsi9(t+1)=Ghs9(t);
                Goi9(t+1)=Go9(t);
            end
        end
    end
end
if abs(Goi9(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi9(1)-Ghs9(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi9(1)=Go9(24);
    Ghsi9(1)=Ghs9(24);
    Thsi9(1)=Ths9(1);
else
    N=0;
end
end

```

```

end

%EXTRATO 10
N=1;
Thsi10(1)=Thspc;
Ghsi10(1)=Ghspc;
Goi10(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C10(t)=(234.5+Thsi10(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg10(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ10N(t)*C10(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg10(t)=Ghspc*(PJ10N(t)*C10(t)/Pj1)^m;
            To10(t)=Topc*((Goreg10(t)/Gopc)-(Goi10(t)/Gopc))/((Goreg10(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi10(t)/Gopc)^(1/m));
            Te10(t)=Tepc*((Ghsreg10(t)/Ghspc)-(Ghsi10(t)/Ghspc))/((Ghsreg10(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi10(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go10(t)=(Goreg10(t)-Goi10(t))*(1-exp(-1/To10(t)))+Goi10(t);
            Ghs10(t)=(Ghsreg10(t)-Ghsi10(t))*(1-exp(-1/Te10(t)))+Ghsi10(t);
            Ths10(t)=Go10(t)+Ghs10(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi10(t)-Ths10(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi10(t)=Ths10(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi10(t+1)=Ths10(t);
                    Ghsi10(t+1)=Ghs10(t);
                    Goi10(t+1)=Go10(t);
                end
            end
        end
    end
end
if abs(Goi10(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi10(1)-Ghs10(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi10(1)=Go10(24);
    Ghsi10(1)=Ghs10(24);
    Thsi10(1)=Ths10(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 11
N=1;

```




```

Thsi11(1)=Thspc;
Ghsi11(1)=Ghspc;
Goi11(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C11(t)=(234.5+Thsi11(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg11(t)=Gopc*((Pfn+Phn+PJ11N(t)*C11(t))/(Pf1+Ph1+Pj1))^m;
            Ghsreg11(t)=Ghspc*(PJ11N(t)*C11(t)/Pj1)^m;
            To11(t)=Topc*((Goreg11(t)/Gopc)-(Goi11(t)/Gopc))/((Goreg11(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi11(t)/Gopc)^(1/m));
            Te11(t)=Tepc*((Ghsreg11(t)/Ghspc)-(Ghsi11(t)/Ghspc))/((Ghsreg11(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi11(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go11(t)=(Goreg11(t)-Goi11(t))*(1-exp(-1/To11(t)))+Goi11(t);
            Ghs11(t)=(Ghsreg11(t)-Ghsi11(t))*(1-exp(-1/Te11(t)))+Ghsi11(t);
            Ths11(t)=Go11(t)+Ghs11(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi11(t)-Ths11(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi11(t)=Ths11(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi11(t+1)=Ths11(t);
                    Ghsi11(t+1)=Ghs11(t);
                    Go11(t+1)=Go11(t);
                end
            end
        end
    end
end
if abs(Goi11(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi11(1)-Ghs11(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi11(1)=Go1(24);
    Ghsi11(1)=Ghs11(24);
    Thsi11(1)=Ths11(1);
else
    N=0;
end
end
end

THS=0.05*Ths1+0.1*Ths2+0.1*Ths3+0.1*Ths4+0.1*Ths5+0.1*Ths6+0.1*Ths7+0.1*Ths8+0.1*Ths9+0.1*Ths10+0.05*Ths11;

```



SUBROTINA QUE CALCULA OS PERFIS DE TEMPERATURA INTERNA DO TRANSFORMADOR PARA CARREGAMENTO (PERFILTEMPERATURASENOIDAL.M)

% CALCULO DO PERFIL DE TEMPERATURA INTERNO DO TRANSFORMADOR

R=Pcu1/Pfe1;

%EXTRATO 1

N=1;

Thsi1(1)=Thspc;

Ghsi1(1)=Ghspc;

Goi1(1)=Gopc;

while N==1;

for t=1:24;

M=1;

while M==1;

C1(t)=(234.5+Thsi1(t))/(234.5+Thspc);

Goreg1(t)=Gopc*((1+C1(t)*(K1N(t)^2)*R)/(1+R))^m;

Ghsreg1(t)=Ghspc*((K1N(t)^2)*C1(t))^m;

To1(t)=Topc*((Goreg1(t)/Gopc)-(Goi1(t)/Gopc))/((Goreg1(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi1(t)/Gopc)^(1/m));

Te1(t)=Tepc*((Ghsreg1(t)/Ghspc)-(Ghsi1(t)/Ghspc))/((Ghsreg1(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi1(t)/Ghspc)^(1/m));

Go1(t)=(Goreg1(t)-Goi1(t))*(1-exp(-1/To1(t)))+Goi1(t);

Ghs1(t)=(Ghsreg1(t)-Ghsi1(t))*(1-exp(-1/Te1(t)))+Ghsi1(t);

Ths1(t)=Go1(t)+Ghs1(t)+Tam(t);

if abs(Thsi1(t)-Ths1(t))>0.0001;

M=1;

Thsi1(t)=Ths1(t);

else

M=0;

if t<24;

Thsi1(t+1)=Ths1(t);

Ghsi1(t+1)=Ghs1(t);

Goi1(t+1)=Go1(t);

end

end

end

end

if abs(Goi1(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi1(1)-Ghs1(24))>0.0001;



```

N=1;
Goi1(1)=Go1(24);
Ghsi1(1)=Ghs1(24);
Thsi1(1)=Ths1(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 2
N=1;
Thsi2(1)=Thspc;
Ghsi2(1)=Ghspsc;
Goi2(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C2(t)=(234.5+Thsi2(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg2(t)=Gopc*((1+C2(t)*(K2N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg2(t)=Ghspsc*((K2N(t)^2)*C2(t))^m;
            To2(t)=Topc*((Goreg2(t)/Gopc)-(Goi2(t)/Gopc))/((Goreg2(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi2(t)/Gopc)^(1/m));
            Te2(t)=Tepc*((Ghsreg2(t)/Ghspsc)-(Ghsi2(t)/Ghspsc))/((Ghsreg2(t)/Ghspsc)^(1/m)-(Ghsi2(t)/Ghspsc)^(1/m));
            Go2(t)=(Goreg2(t)-Goi2(t))*(1-exp(-1/To2(t)))+Goi2(t);
            Ghs2(t)=(Ghsreg2(t)-Ghsi2(t))*(1-exp(-1/Te2(t)))+Ghsi2(t);
            Ths2(t)=Go2(t)+Ghs2(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi2(t)-Ths2(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi2(t)=Ths2(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi2(t+1)=Ths2(t);
                    Ghsi2(t+1)=Ghs2(t);
                    Goi2(t+1)=Go2(t);
                end
            end
        end
    end
end
end

```




```

if abs(Goi2(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi2(1)-Ghs2(24))>0.0001;

    N=1;

    Goi2(1)=Go2(24);

    Ghsi2(1)=Ghs2(24);

    Thsi2(1)=Ths2(1);

else

    N=0;

end

end

%EXTRATO 3

N=1;

Thsi3(1)=Thspc;

Ghsi3(1)=Ghspsc;

Goi3(1)=Gopc;

while N==1;

    for t=1:24;

        M=1;

        while M==1;

            C3(t)=(234.5+Thsi3(t))/(234.5+Thspc);

            Goreg3(t)=Gopc*((1+C3(t)*(K3N(t)^2)*R)/(1+R))^m;

            Ghsreg3(t)=Ghspsc*((K3N(t)^2)*C1(t))^m;

            To3(t)=Topc*((Goreg3(t)/Gopc)-(Goi3(t)/Gopc))/((Goreg3(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi3(t)/Gopc)^(1/m));

            Te3(t)=Tepc*((Ghsreg3(t)/Ghspsc)-(Ghsi3(t)/Ghspsc))/((Ghsreg3(t)/Ghspsc)^(1/m)-(Ghsi3(t)/Ghspsc)^(1/m));

            Go3(t)=(Goreg3(t)-Goi3(t))*(1-exp(-1/To3(t)))+Goi3(t);

            Ghs3(t)=(Ghsreg3(t)-Ghsi3(t))*(1-exp(-1/Te3(t)))+Ghsi3(t);

            Ths3(t)=Go3(t)+Ghs3(t)+Tam(t);

            if abs(Thsi3(t)-Ths3(t))>0.0001;

                M=1;

                Thsi3(t)=Ths3(t);

            else

                M=0;

                if t<24;

                    Thsi3(t+1)=Ths3(t);

                    Ghsi3(t+1)=Ghs3(t);

                    Goi3(t+1)=Go3(t);

                end

            end

        end

    end

end
    
```



```

end
if abs(Goi3(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi3(1)-Ghs3(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi3(1)=Go3(24);
    Ghsi3(1)=Ghs3(24);
    Thsi3(1)=Ths3(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 4
N=1;
Thsi4(1)=Thspc;
Ghsi4(1)=Ghspc;
Goi4(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C4(t)=(234.5+Thsi4(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg4(t)=Gopc*((1+C4(t)*(K4N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg4(t)=Ghspc*((K4N(t)^2)*C1(t))^m;
            To4(t)=Topc*((Goreg4(t)/Gopc)-(Goi4(t)/Gopc))/((Goreg4(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi4(t)/Gopc)^(1/m));
            Te4(t)=Tepc*((Ghsreg4(t)/Ghspc)-(Ghsi4(t)/Ghspc))/((Ghsreg4(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi4(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go4(t)=(Goreg4(t)-Goi4(t))*(1-exp(-1/To4(t)))+Goi4(t);
            Ghs4(t)=(Ghsreg4(t)-Ghsi4(t))*(1-exp(-1/Te4(t)))+Ghsi4(t);
            Ths4(t)=Go4(t)+Ghs4(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi4(t)-Ths4(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi4(t)=Ths4(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi4(t+1)=Ths4(t);
                    Ghsi4(t+1)=Ghs4(t);
                    Goi4(t+1)=Go4(t);
                end
            end
        end
    end
end

```



```

end
end
if abs(Goi4(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi4(1)-Ghs4(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi4(1)=Go4(24);
    Ghsi4(1)=Ghs4(24);
    Thsi4(1)=Ths4(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 5
N=1;
Thsi5(1)=Thspc;
Ghsi5(1)=Ghspc;
Goi5(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C5(t)=(234.5+Thsi5(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg5(t)=Gopc*((1+C5(t)*(K5N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg5(t)=Ghspc*((K5N(t)^2)*C5(t))^m;
            To5(t)=Topc*((Goreg5(t)/Gopc)-(Goi5(t)/Gopc))/((Goreg5(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi5(t)/Gopc)^(1/m));
            Te5(t)=Tepc*((Ghsreg5(t)/Ghspc)-(Ghsi5(t)/Ghspc))/((Ghsreg5(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi5(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go5(t)=(Goreg5(t)-Goi5(t))*(1-exp(-1/To5(t)))+Goi5(t);
            Ghs5(t)=(Ghsreg5(t)-Ghsi5(t))*(1-exp(-1/Te5(t)))+Ghsi5(t);
            Ths5(t)=Go5(t)+Ghs5(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi5(t)-Ths5(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi5(t)=Ths5(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi5(t+1)=Ths5(t);
                    Ghsi5(t+1)=Ghs5(t);
                    Goi5(t+1)=Go5(t);
                end
            end
        end
    end
end

```



```

end
end
end
if abs(Goi5(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi5(1)-Ghs5(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi5(1)=Go5(24);
    Ghsi5(1)=Ghs5(24);
    Thsi5(1)=Ths5(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 6
N=1;
Thsi6(1)=Thspc;
Ghsi6(1)=Ghspsc;
Goi6(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C6(t)=(234.5+Thsi6(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg6(t)=Gopc*((1+C6(t)*(K6N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg6(t)=Ghspsc*((K6N(t)^2)*C6(t))^m;
            To6(t)=Topc*((Goreg6(t)/Gopc)-(Goi6(t)/Gopc))/((Goreg6(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi6(t)/Gopc)^(1/m));
            Te6(t)=Tepc*((Ghsreg6(t)/Ghspsc)-(Ghsi6(t)/Ghspsc))/((Ghsreg6(t)/Ghspsc)^(1/m)-(Ghsi6(t)/Ghspsc)^(1/m));
            Go6(t)=(Goreg6(t)-Goi6(t))*(1-exp(-1/To6(t)))+Goi6(t);
            Ghs6(t)=(Ghsreg6(t)-Ghsi6(t))*(1-exp(-1/Te6(t)))+Ghsi6(t);
            Ths6(t)=Go6(t)+Ghs6(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi6(t)-Ths6(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi6(t)=Ths6(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi6(t+1)=Ths6(t);
                    Ghsi6(t+1)=Ghs6(t);
                    Goi6(t+1)=Go6(t);
                end
            end
        end
    end
end

```



```

end
end
end
end
if abs(Goi6(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi6(1)-Ghs6(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi6(1)=Go6(24);
    Ghsi6(1)=Ghs6(24);
    Thsi6(1)=Ths6(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 7
N=1;
Thsi7(1)=Thspc;
Ghsi7(1)=Ghspc;
Goi7(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C7(t)=(234.5+Thsi7(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg7(t)=Gopc*((1+C7(t)*(K7N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg7(t)=Ghspc*((K7N(t)^2)*C7(t))^m;
            To7(t)=Topc*((Goreg7(t)/Gopc)-(Goi7(t)/Gopc))/((Goreg7(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi7(t)/Gopc)^(1/m));
            Te7(t)=Tepc*((Ghsreg7(t)/Ghspc)-(Ghsi7(t)/Ghspc))/((Ghsreg7(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi7(t)/Ghspc)^(1/m));
            Go7(t)=(Goreg7(t)-Goi7(t))*(1-exp(-1/To7(t)))+Goi7(t);
            Ghs7(t)=(Ghsreg7(t)-Ghsi7(t))*(1-exp(-1/Te7(t)))+Ghsi7(t);
            Ths7(t)=Go7(t)+Ghs7(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi7(t)-Ths7(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi7(t)=Ths7(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi7(t+1)=Ths7(t);
                    Ghsi7(t+1)=Ghs7(t);

```



```

        Goi7(t+1)=Go7(t);
    end
end
end
end
if abs(Goi7(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi7(1)-Ghs7(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi7(1)=Go7(24);
    Ghsi7(1)=Ghs7(24);
    Thsi7(1)=Ths7(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 8
N=1;
Thsi8(1)=Thspc;
Ghsi8(1)=Ghspsc;
Goi8(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C8(t)=(234.5+Thsi8(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg8(t)=Gopc*((1+C8(t)*(K8N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg8(t)=Ghspsc*((K8N(t)^2)*C8(t))^m;
            To8(t)=Topc*((Goreg8(t)/Gopc)-(Goi8(t)/Gopc))/((Goreg8(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi8(t)/Gopc)^(1/m));
            Te8(t)=Tepc*((Ghsreg8(t)/Ghspsc)-(Ghsi8(t)/Ghspsc))/((Ghsreg8(t)/Ghspsc)^(1/m)-(Ghsi8(t)/Ghspsc)^(1/m));
            Go8(t)=(Goreg8(t)-Goi8(t))*(1-exp(-1/To8(t)))+Goi8(t);
            Ghs8(t)=(Ghsreg8(t)-Ghsi8(t))*(1-exp(-1/Te8(t)))+Ghsi8(t);
            Ths8(t)=Go8(t)+Ghs8(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi8(t)-Ths8(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi8(t)=Ths8(t);
            else
                M=0;
                if t<24;
                    Thsi8(t+1)=Ths8(t);

```




```

    Ghsi8(t+1)=Ghs8(t);
    Goi8(t+1)=Go8(t);
end
end
end
end
if abs(Goi8(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi8(1)-Ghs8(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi8(1)=Go8(24);
    Ghsi8(1)=Ghs8(24);
    Thsi8(1)=Ths8(1);
else
    N=0;
end
end

%EXTRATO 9
N=1;
Thsi9(1)=Thspc;
Ghsi9(1)=Ghspsc;
Goi9(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C9(t)=(234.5+Thsi9(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg9(t)=Gopc*((1+C9(t)*(K9N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg9(t)=Ghspsc*((K9N(t)^2)*C9(t))^m;
            To9(t)=Topc*((Goreg9(t)/Gopc)-(Goi9(t)/Gopc))/((Goreg9(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi9(t)/Gopc)^(1/m));
            Te9(t)=Tepc*((Ghsreg9(t)/Ghspsc)-(Ghsi9(t)/Ghspsc))/((Ghsreg9(t)/Ghspsc)^(1/m)-(Ghsi9(t)/Ghspsc)^(1/m));
            Go9(t)=(Goreg9(t)-Goi9(t))*(1-exp(-1/To9(t)))+Goi9(t);
            Ghs9(t)=(Ghsreg9(t)-Ghsi9(t))*(1-exp(-1/Te9(t)))+Ghsi9(t);
            Ths9(t)=Go9(t)+Ghs9(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi9(t)-Ths9(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi9(t)=Ths9(t);
            else
                M=0;
            end
        end
    end
end

```



```

    Thsi9(t+1)=Ths9(t);
    Ghsi9(t+1)=Ghs9(t);
    Goi9(t+1)=Go9(t);
end
end
end
end
if abs(Goi9(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi9(1)-Ghs9(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi9(1)=Go9(24);
    Ghsi9(1)=Ghs9(24);
    Thsi9(1)=Ths9(1);
else
    N=0;
end
end
end

%EXTRATO 10
N=1;
Thsi10(1)=Thspc;
Ghsi10(1)=Ghspsc;
Goi10(1)=Gopc;
while N==1;
    for t=1:24;
        M=1;
        while M==1;
            C10(t)=(234.5+Thsi10(t))/(234.5+Thspc);
            Goreg10(t)=Gopc*((1+C10(t)*(K10N(t)^2)*R)/(1+R))^m;
            Ghsreg10(t)=Ghspsc*((K10N(t)^2)*C10(t))^m;
            To10(t)=Topc*((Goreg10(t)/Gopc)-(Goi10(t)/Gopc))/((Goreg10(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi10(t)/Gopc)^(1/m));
            Te10(t)=Tepc*((Ghsreg10(t)/Ghspsc)-(Ghsi10(t)/Ghspsc))/((Ghsreg10(t)/Ghspsc)^(1/m)-(Ghsi10(t)/Ghspsc)^(1/m));
            Go10(t)=(Goreg10(t)-Goi10(t))*(1-exp(-1/To10(t)))+Goi10(t);
            Ghs10(t)=(Ghsreg10(t)-Ghsi10(t))*(1-exp(-1/Te10(t)))+Ghsi10(t);
            Ths10(t)=Go10(t)+Ghs10(t)+Tam(t);
            if abs(Thsi10(t)-Ths10(t))>0.0001;
                M=1;
                Thsi10(t)=Ths10(t);
            else
                M=0;
            end
        end
    end
end

```



```

if t<24;

    Thsi10(t+1)=Ths10(t);

    Ghsi10(t+1)=Ghs10(t);

    Goi10(t+1)=Go10(t);

end

end

end

end

if abs(Goi10(1)-Go1(24))>0.0001 & abs(Ghsi10(1)-Ghs10(24))>0.0001;

    N=1;

    Goi10(1)=Go10(24);

    Ghsi10(1)=Ghs10(24);

    Thsi10(1)=Ths10(1);

else

    N=0;

end

end

%EXTRATO 11

N=1;

Thsi11(1)=Thspc;

Ghsi11(1)=Ghspc;

Goi11(1)=Gopc;

while N==1;

    for t=1:24;

        M=1;

        while M==1;

            C11(t)=(234.5+Thsi11(t))/(234.5+Thspc);

            Goreg11(t)=Gopc*((1+C11(t)*(K11N(t)^2)*R)/(1+R))^m;

            Ghsreg11(t)=Ghspc*((K11N(t)^2)*C11(t))^m;

            To11(t)=Topc*((Goreg11(t)/Gopc)-(Goi11(t)/Gopc))/((Goreg11(t)/Gopc)^(1/m)-(Goi11(t)/Gopc)^(1/m));

            Te11(t)=Tepc*((Ghsreg11(t)/Ghspc)-(Ghsi11(t)/Ghspc))/((Ghsreg11(t)/Ghspc)^(1/m)-(Ghsi11(t)/Ghspc)^(1/m));

            Go11(t)=(Goreg11(t)-Goi11(t))*(1-exp(-1/To11(t)))+Goi11(t);

            Ghs11(t)=(Ghsreg11(t)-Ghsi11(t))*(1-exp(-1/Te11(t)))+Ghsi11(t);

            Ths11(t)=Go11(t)+Ghs11(t)+Tam(t);

            if abs(Thsi11(t)-Ths11(t))>0.0001;

                M=1;

                Thsi11(t)=Ths11(t);

            else

```




```

M=0;
if t<24;
    Ths11(t+1)=Ths11(t);
    Ghs11(t+1)=Ghs11(t);
    Goi11(t+1)=Goi11(t);
end
end
end
if abs(Goi11(1)-Goi11(24))>0.0001 & abs(Ghs11(1)-Ghs11(24))>0.0001;
    N=1;
    Goi11(1)=Goi11(24);
    Ghs11(1)=Ghs11(24);
    Ths11(1)=Ths11(1);
else
    N=0;
end
end

THS=0.05*Ths1+0.1*Ths2+0.1*Ths3+0.1*Ths4+0.1*Ths5+0.1*Ths6+0.1*Ths7+0.1*Ths8+0.1*Ths9+0.1*Ths10+0.05*Ths11;
    
```

SUBROTINA PARA A IMPRESSÃO DOS RESULTADOS

```

%IMPRESSAO DOS RESULTADOS

%Impressao dos dados do transformador
clc;
disp('Os dados do transformador simulado sao:');
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('Potencia nominal (KVA)=%0.5g\,SN/1000));
disp(sprintf('Tensao no primario (KV)=%0.5g\,V1p/1000));
disp(sprintf('Tensao no secundario (V)=%0.5g\,V1s));
disp(sprintf('Perdas no ferro (KW)=%0.5g\,Pfe1/1000));
disp(sprintf('Perdas no cobre (KW)=%0.5g\,Pcu1/1000));
disp(sprintf('Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC)=%0.5g\,Gopc));
disp(sprintf('Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC)=%0.5g\,Ghspe));
disp(sprintf('Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC)=%0.5g\,Thspe));
disp(sprintf('Expoente de refrigeração=%0.5g\,m));
disp(sprintf('Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=%0.5g\,Topc));
    
```



```

disp(sprintf('Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=%0.5g\,Tepc));
disp(sprintf('Expectativa de vida minima nominal (horas)=%0.5g\,EVnom));
disp('Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)');
disp(sprintf('%d\n',ls));
pause;

%Grafico da curva de carga media
stairs(K6N);
grid on;
Title('CURVA DE CARGA MEDIA');
Xlabel('Tempo - horas');
Ylabel('Carregamento - pu');
pause;

%Grafico da curva de temperatura ambiente
stairs(Tam);
grid on;
Title('CURVA DE TEMPERATURA AMBIENTE MEDIA');
Xlabel('Tempo - horas');
Ylabel('Temperatura - oC');
pause;

%Grafico das perdas no ferro
for t=1:24;
    PFE(t)=Pfn+Phn;
end
stairs(PFE);
grid on;
Title('CURVA REPRESENTATIVA DA VARIAÇÃO DAS PERDAS NO FERRO');
Xlabel('Tempo - horas');
Ylabel('Perdas no ferro - W');
pause;

%Graficos das perdas no cobre
stairs(PJ6N,'k'); %Nao senoidal
hold on;
for t=1:24;
    PS(t)=Pcu1*K6N(t)^2; %Senoidal

```



```

end
stairs(PS,'b');
grid on;
Title('CURVA REPRESENTATIVA DA VARIAÇÃO DAS PERDAS NO COBRE');
Xlabel('Tempo - horas');
Ylabel('Perdas no cobre - W');
legend('Perdas no cobre para carregamento nao senoidal','Perdas no cobre para carregamento senoidal');
pause;
clf;

%Graficos dos perfis de temperatura do enrolamento
plot(THSH,'k'); %nao senoidal
hold on;
plot(THSSENOIDAL,'b'); %senoidal
grid on;
Title('CURVA REPRESENTATIVA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE');
Xlabel('Tempo - horas');
Ylabel('Ths - oC');
legend('Ths para carregamento nao senoidal','Ths para carregamento senoidal');
pause;
clf;

%Graficos da perda de vida
for ano=1:8
    if PVH(ano)<=1.0
        H(ano)=PVH(ano);
        anoh(ano)=ano;
    else
        H(ano)=1000;
    end
    if PVSENOIDAL(ano)<=1
        S(ano)=PVSENOIDAL(ano);
    end
end
if H~=1000
    ano=1:8;
    plot(H,'+'); %nao senoidal
else
    disp('A perda de vida excedeu 1 pu antes do ano 1 para o carregamento nao senoidal');
end

```




```
disp(sprintf('\n'));
end
hold on;
plot(S,'b'); %senoidal
hold on;
grid on;
Title('CURVA REPRESENTATIVA DA VARIAÇÃO DA PERDA DE VIDA POR ANO');
Xlabel('Tempo - anos');
Ylabel('PV - pu');
legend('PV para carregamento nao senoidal','PV para carregamento senoidal');
pause;

close;

disp(sprintf('A perda de vida pu/ano para carregamento senoidal e: %0.5g\n',PVSENOIDAL(1)));
disp(sprintf('A perda de vida pu/ano para carregamento nao senoidal e: %0.5g\n',PVH(1)));
```

VIII.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa descrito no item anterior calcula as perdas internas, os perfis de temperatura e a perda de vida em pu para qualquer transformador, desde que o mesmo tenha seus dados colocados na forma dos arquivos de dados aqui utilizados.

Como a finalidade do programa foi analisar o aumento da perda de vida de transformadores de distribuição quando submetidos a formas de onda não senoidais de operação, e não escrever um programa para realizar esse cálculo, preocupou-se mais com os resultados que com a lógica, de modo que os arquivos de dados não se baseiam em nenhuma norma. Assim como, também, todos os dados de carregamento foram simulados para um mesmo transformador, já que o objetivo era qualificar e não quantificar esse aumento na perda de vida.

Os resultados obtidos com as simulações para cada carregamento serão apresentados no capítulo a seguir.



CAPÍTULO IX – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

IX.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A expectativa de vida útil de um transformador está diretamente ligada ao carregamento que sofre ao longo do seu período de operação. A norma NBR 5416 utilizada no presente trabalho publica várias tabelas expressando os carregamentos para a expectativa de vida normal que são equivalentes aos carregamentos contínuos com o ponto mais quente a $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ para isolamento $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ou $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ para isolamento $65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Entretanto, como já foi discutido, os transformadores operam segundo uma curva de carga que se repete a cada ciclo de funcionamento da instalação, normalmente um ciclo diário, e esse ciclo deve ser contabilizado e convertido em patamares de carga, para calcular-se a perda de vida em intervalos onde a temperatura é constante.

Assim, baseado no procedimento descrito no Capítulo VI, para um dado transformador de distribuição, conhecendo-se sua energia mensal passante, sua curva diária de carga, o perfil de temperatura ambiente e a natureza da carga instalada, é possível calcular a perda de vida anual do mesmo. O processo de cálculo consiste basicamente em calcular o perfil da temperatura do ponto mais quente do enrolamento e com base nesse perfil, calcular a perda de vida para cada hora utilizando uma das equações apresentadas no capítulo VI, no presente trabalho utilizou-se o equacionamento da NBR 5416. Somando-se as perdas de vida obtidas para cada instante t do dia, obtém-se a perda de vida total em pu da nominal.

Os resultados obtidos para a perda de vida total do transformador operando com carga puramente senoidal e não senoidal, foram comparados entre si e são apresentados a seguir para os carregamentos considerados. No caso das simulações para carregamento senoidal, considerou-se a mesma curva de carga sem as componentes harmônicas.

IX.2 CARREGAMENTO 1

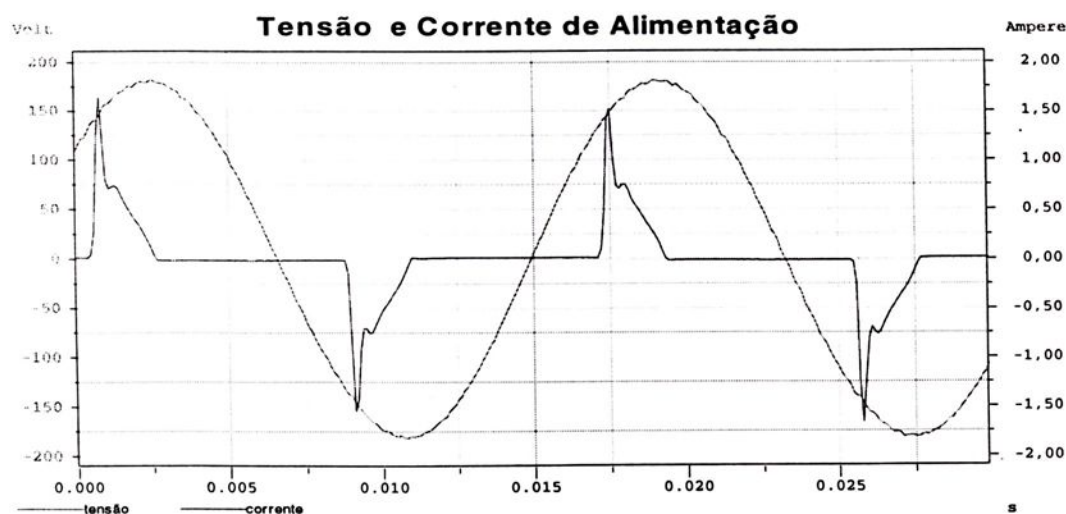


Figura IX.1 – Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 1

Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

Potencia nominal (KVA)=45

Tensao no primario (KV)=13.8

Tensao no secundario (V)=127

Perdas no ferro (KW)=0.189

Perdas no cobre (KW)=0.827

Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC))=50

Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC))=10

Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC))=95

Expoente de refrigeraçao=0.8

Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6

Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08

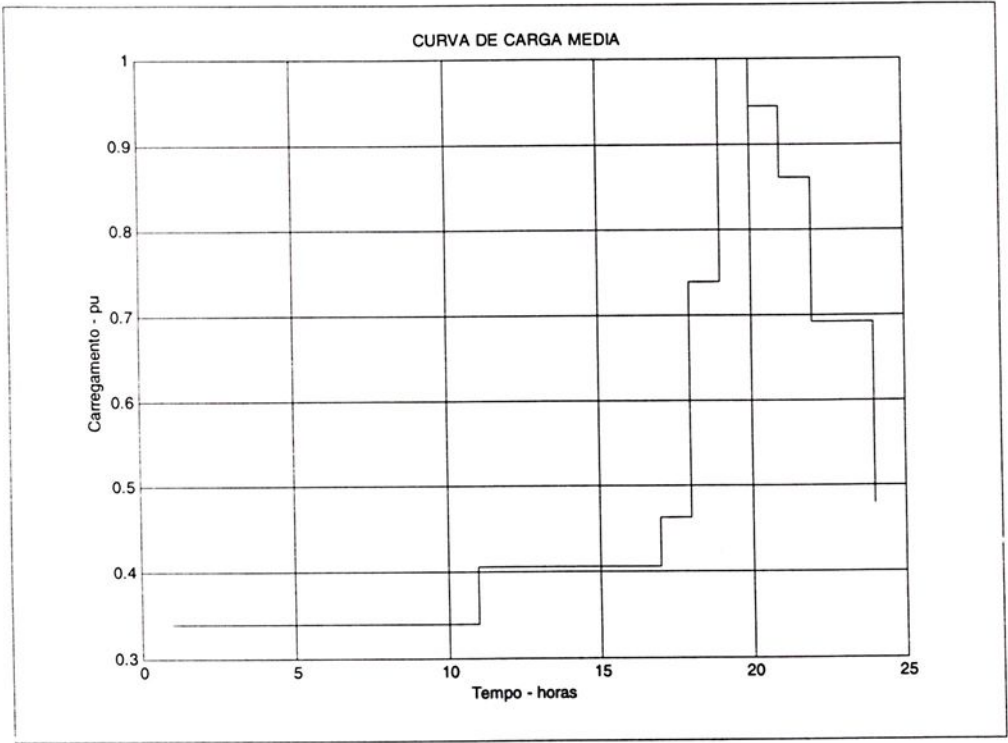
Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000

Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)

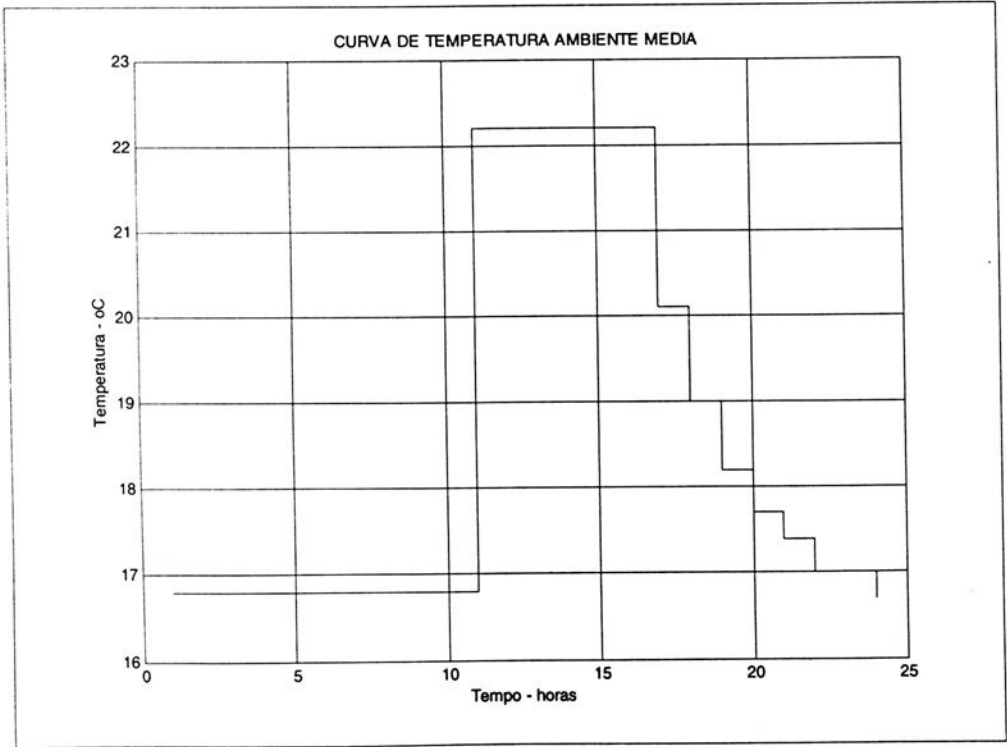
1
2.200000e-003
8.461000e-001
1.130000e-002
6.004000e-001
7.000000e-004
3.703000e-001
5.800000e-003
2.414000e-001
2.500000e-003
2.513000e-001
4.500000e-003
2.409000e-001
1.440000e-002
2.068000e-001
4.600000e-003
1.740000e-001
2.300000e-003
1.867000e-001
7.700000e-003



Curva de carga diária



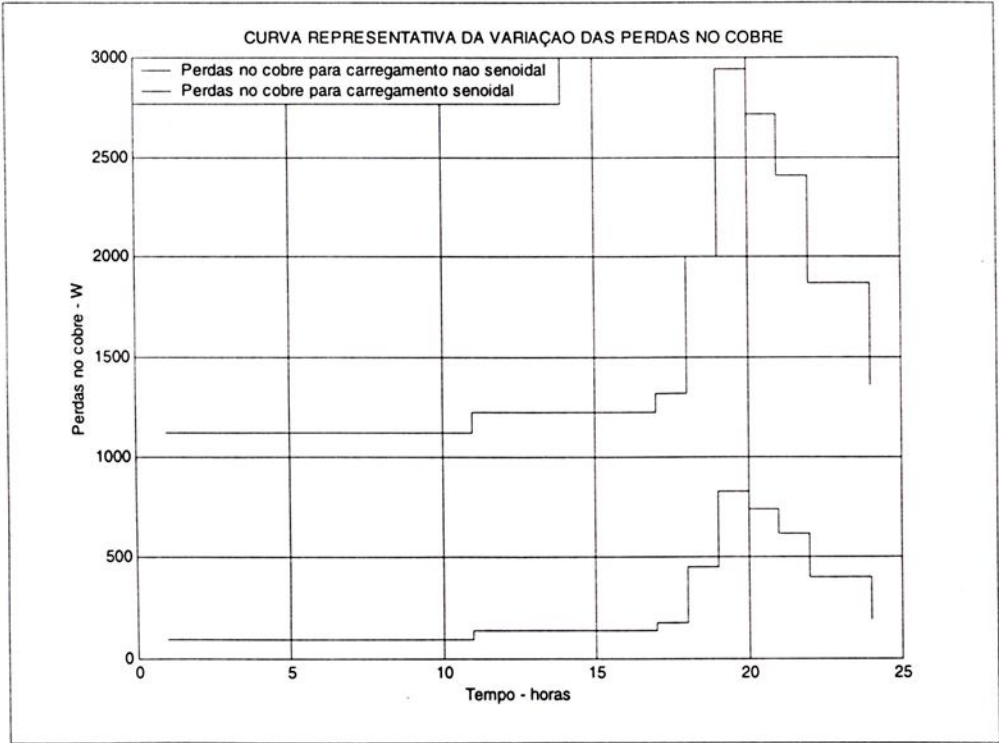
Variação da Temperatura Ambiente Diária



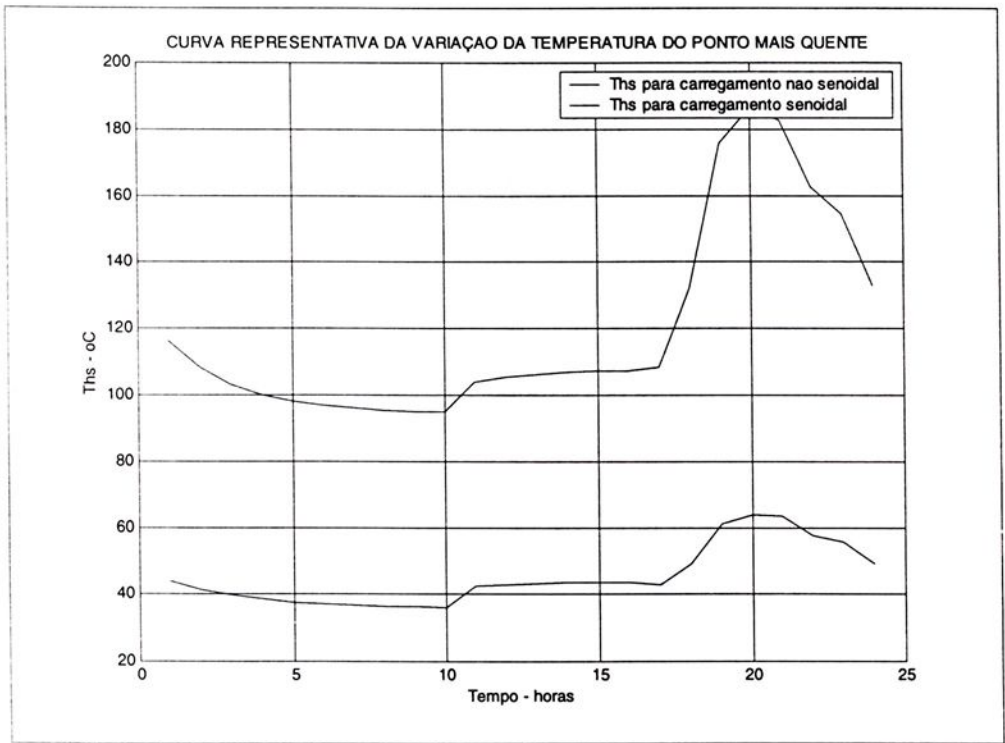
Variação das perdas no Ferro



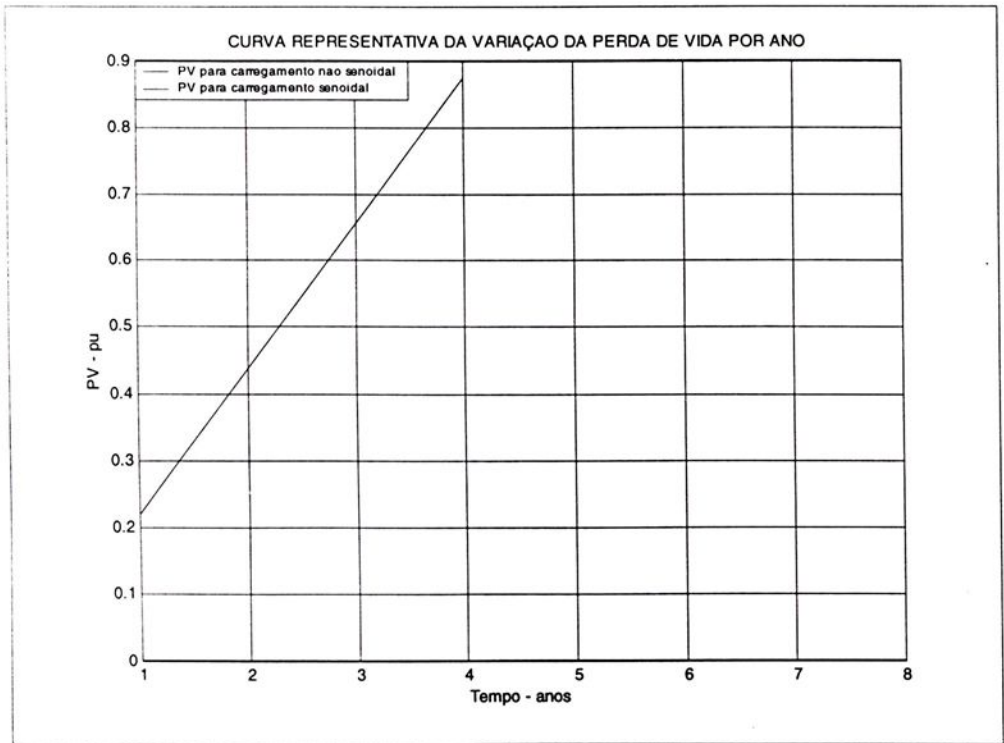
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



IX.3 CARREGAMENTO 2

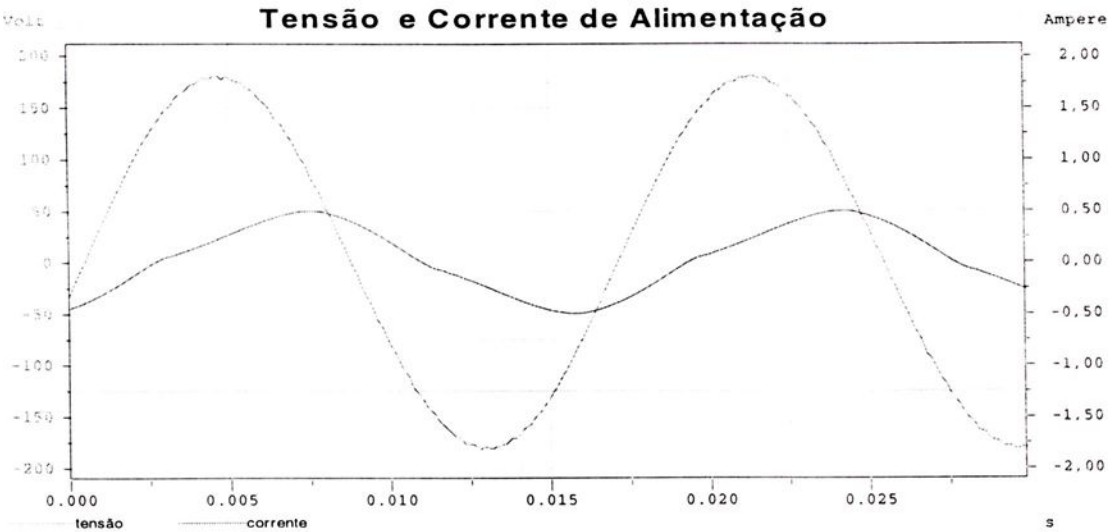


Figura IX.2 – Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 2

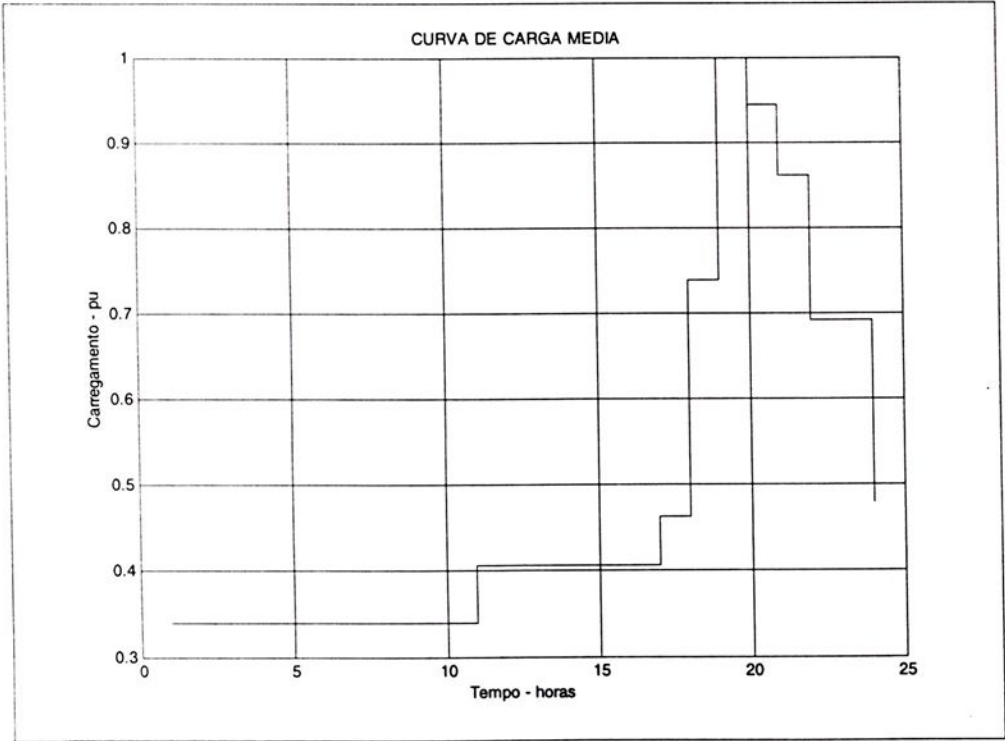
Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado são:
Potencia nominal (KVA)=45
Tensao no primario (KV)=13.8
Tensao no secundario (V)=127
Perdas no ferro (KW)=0.189
Perdas no cobre (KW)=0.827
Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC)=50
Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC)=10
Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC)=95
Expoente de refrigeração=0.8
Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6
Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08
Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000
Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)
1
4.500000e-003
9.720000e-002
5.000000e-003

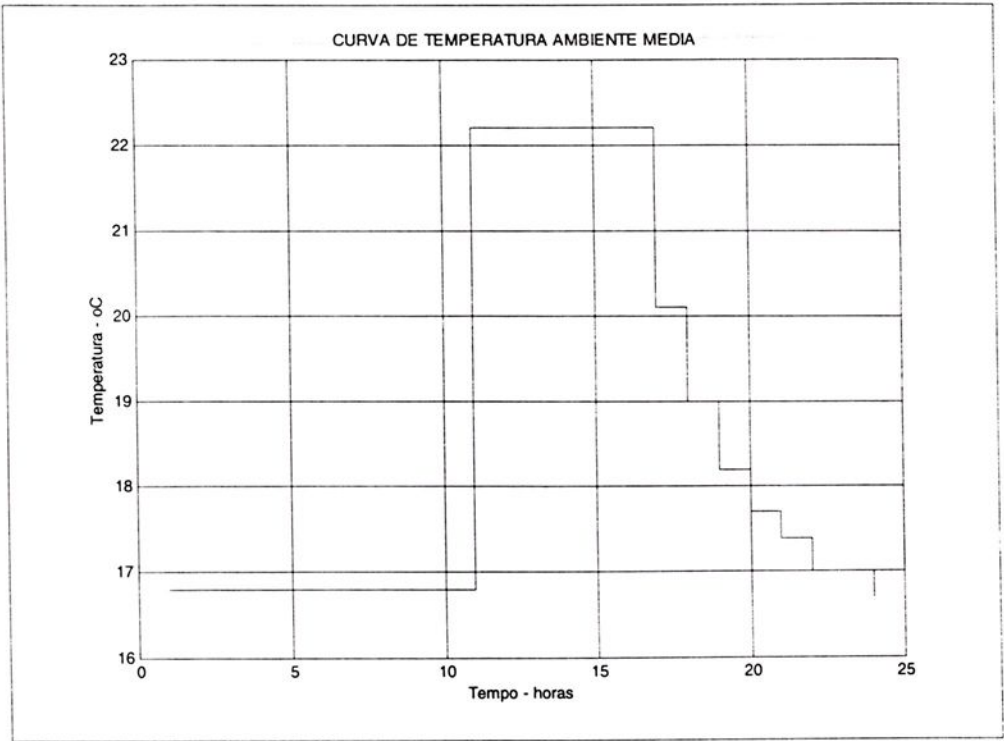


1.280000e-002
5.300000e-003
1.180000e-002
6.000000e-003
6.200000e-003
4.900000e-003
2.700000e-003
4.400000e-003
4.200000e-003
4.200000e-003
3.500000e-003
3.900000e-003
6.200000e-003
1.100000e-003
6.300000e-003
3.700000e-003

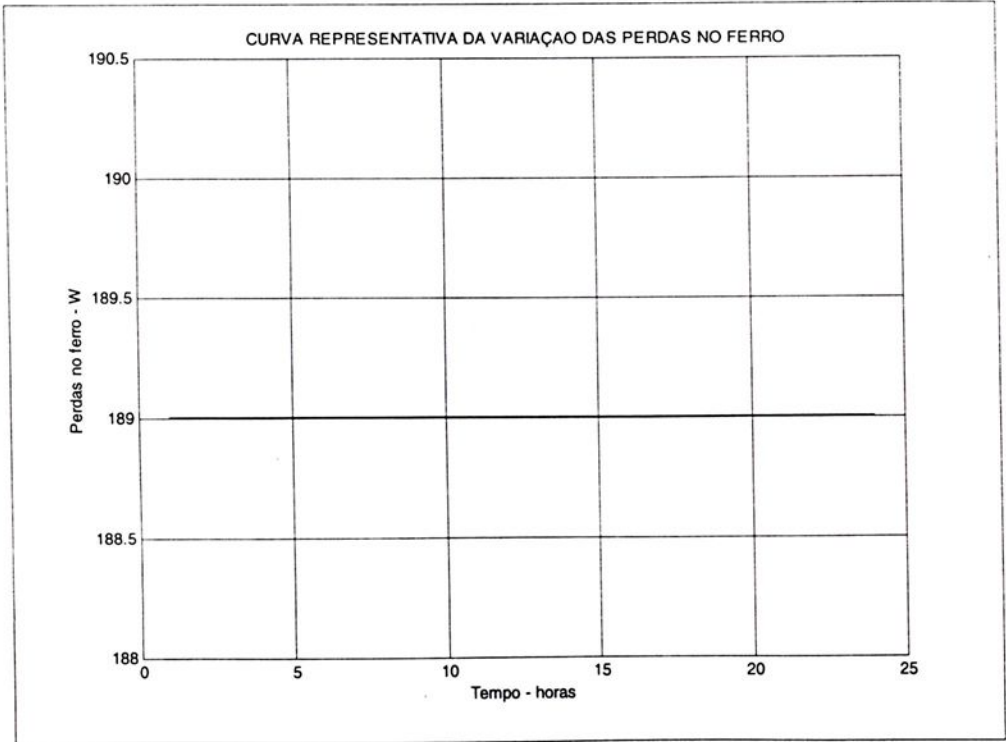
Curva de carga diária



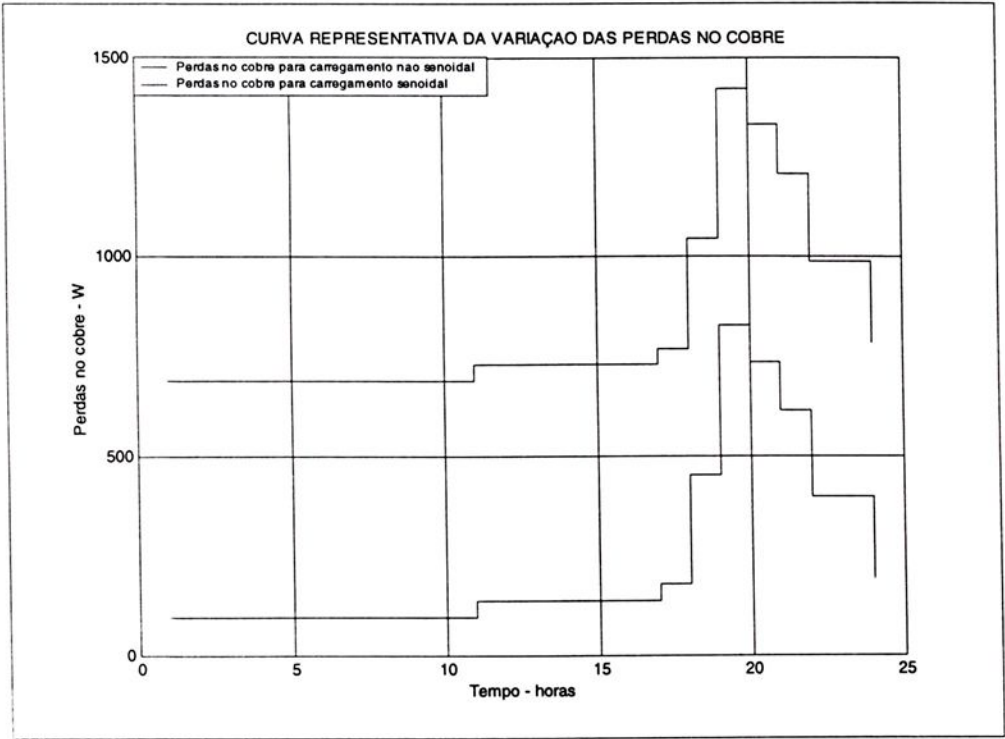
Variação da Temperatura Ambiente Diária



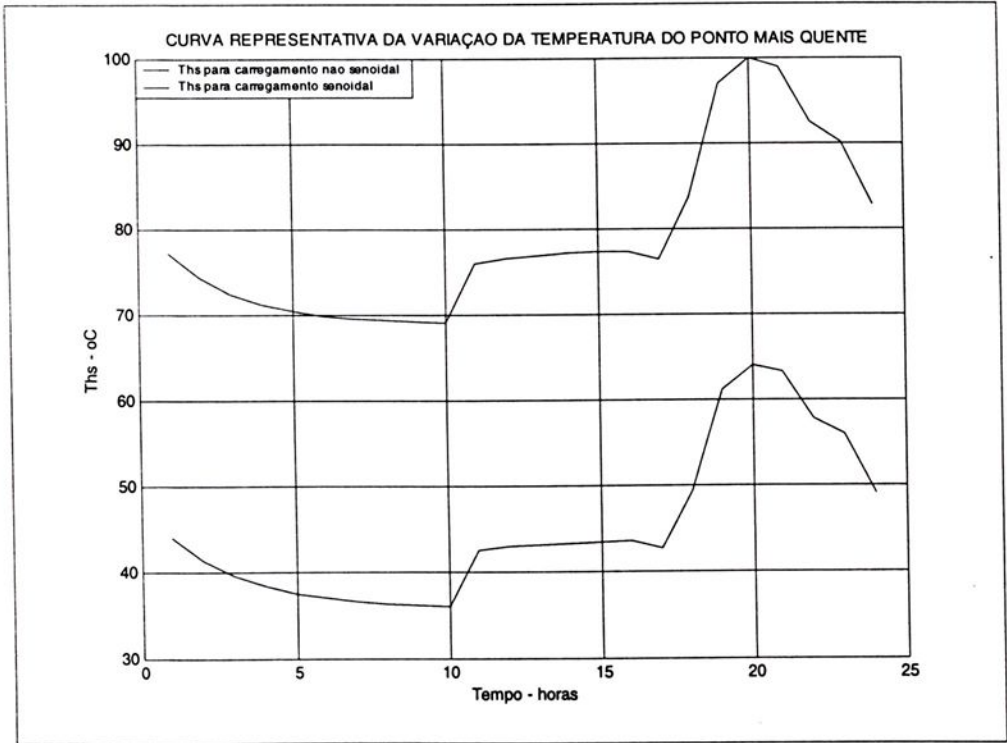
Variação das perdas no Ferro



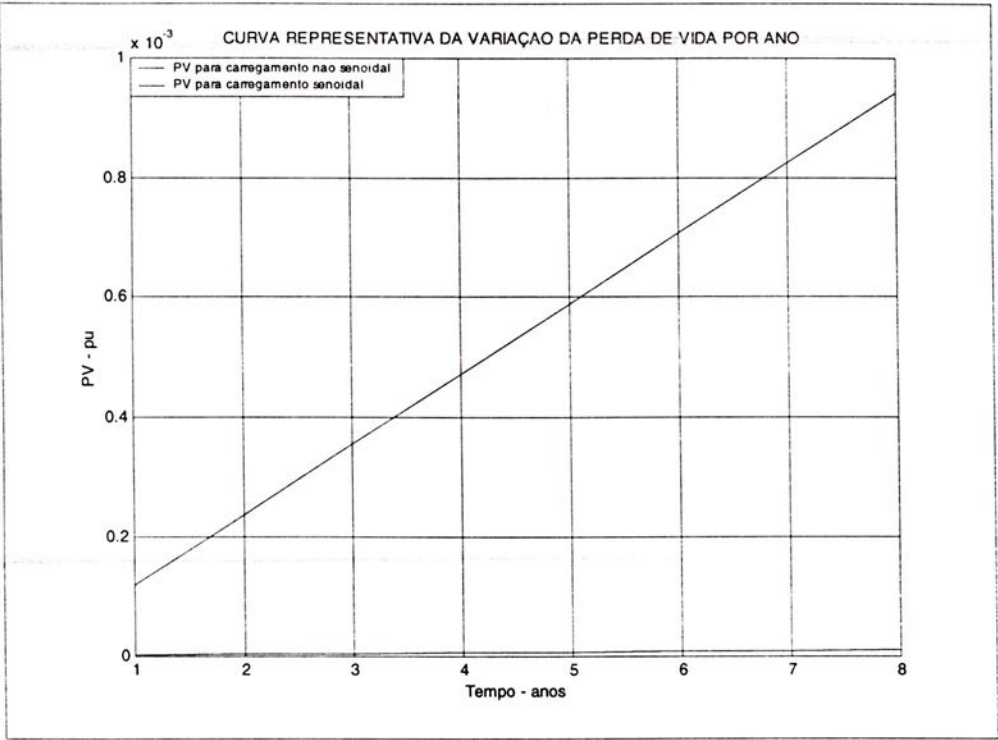
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



IX.4 CARREGAMENTO 3

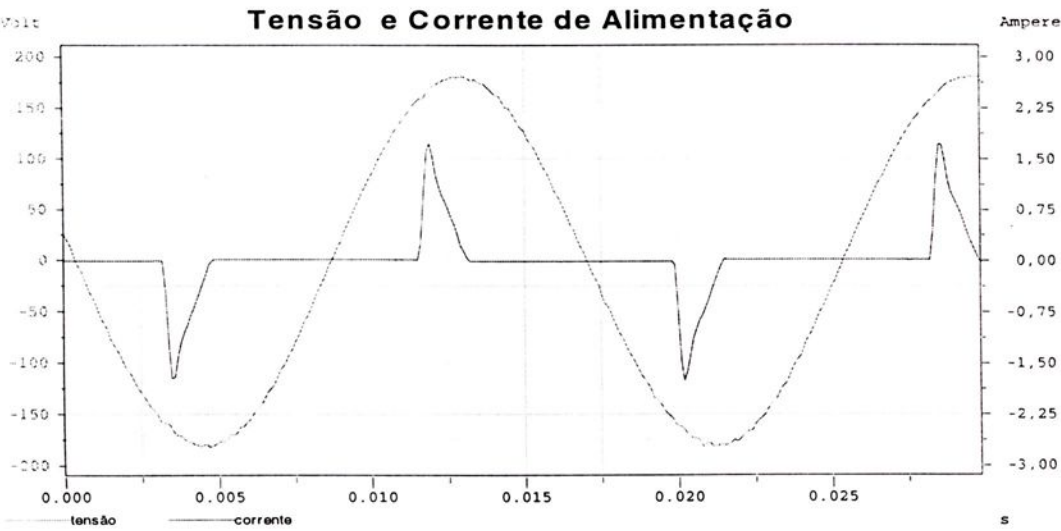


Figura IX.3 – Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 3

Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

Potencia nominal (KVA)=45

Tensao no primario (KV)=13.8

Tensao no secundario (V)=127

Perdas no ferro (KW)=0.189

Perdas no cobre (KW)=0.827

Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC))=50

Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC))=10

Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC))=95

Expoente de refrigeração=0.8

Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6

Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08

Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000

Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)

1

5.400000e-003

9.341000e-001

1.420000e-002

8.200000e-001

2.160000e-002

6.719000e-001

1.480000e-002

5.098000e-001

2.080000e-002

3.677000e-001

1.310000e-002

2.739000e-001

8.400000e-003

2.303000e-001

4.400000e-003

2.245000e-001

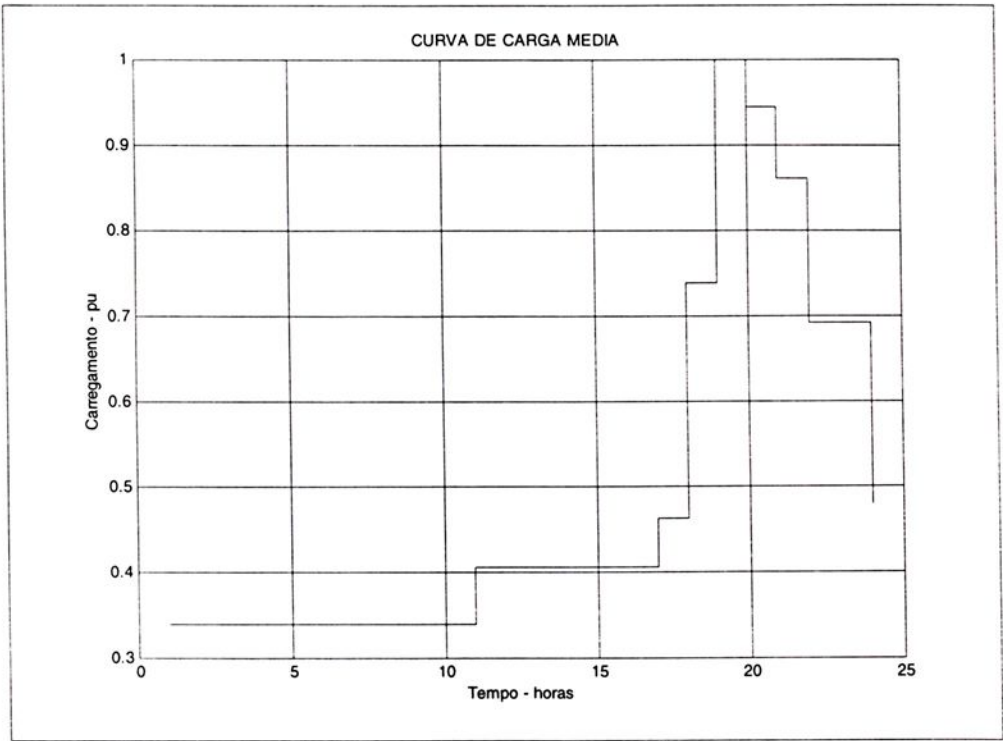
1.220000e-002

2.178000e-001

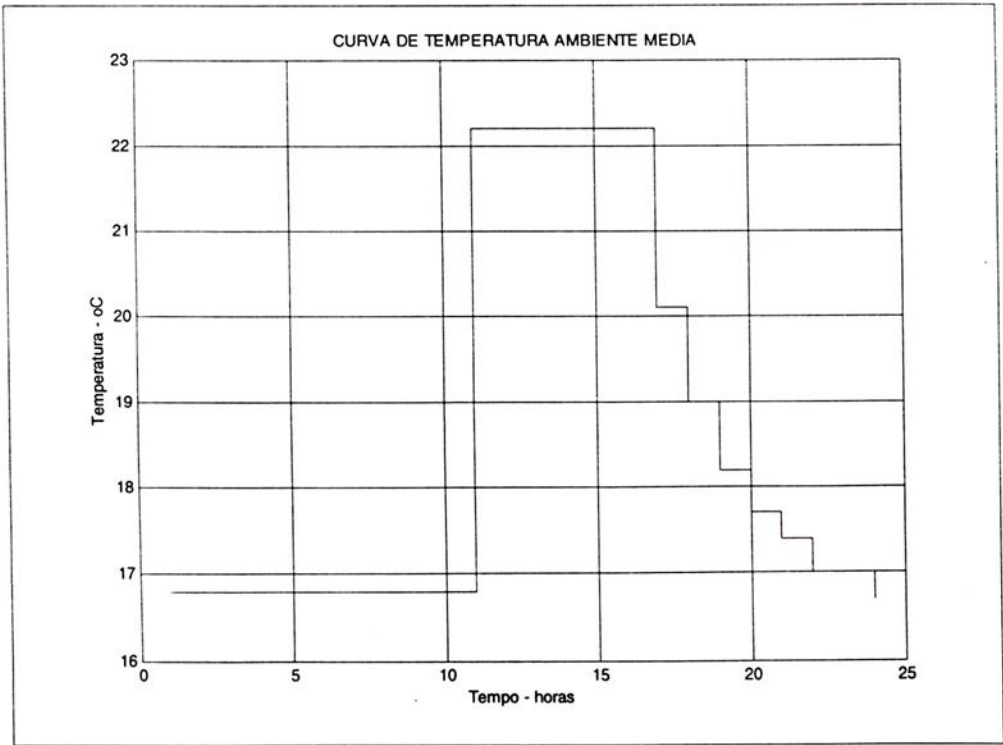
1.010000e-002



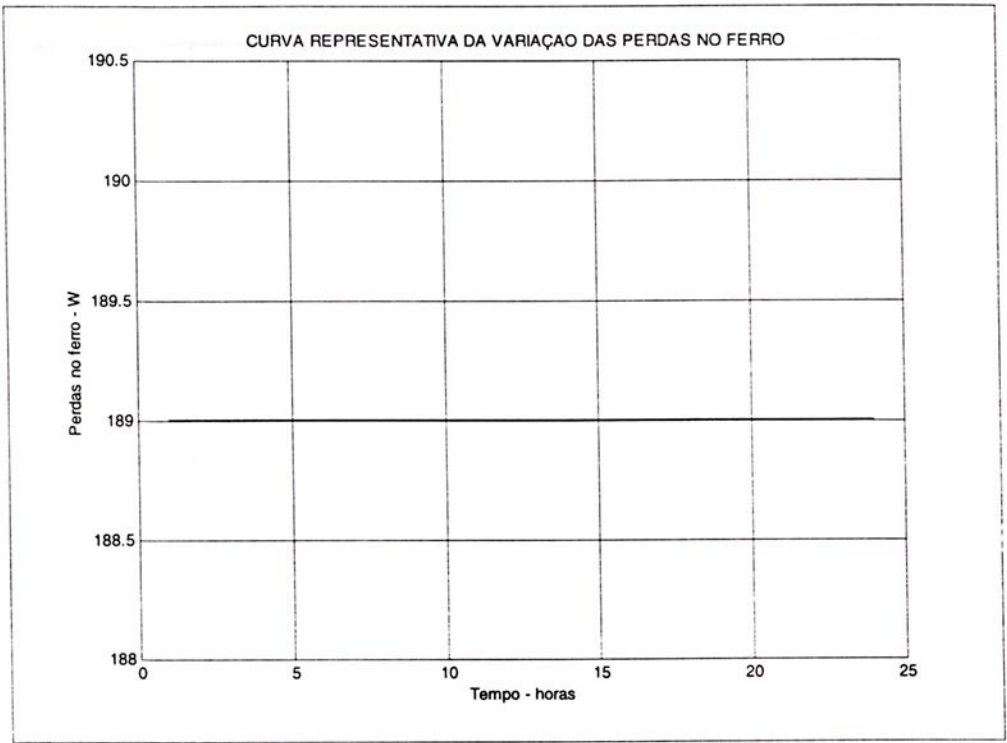
Curva de carga diária



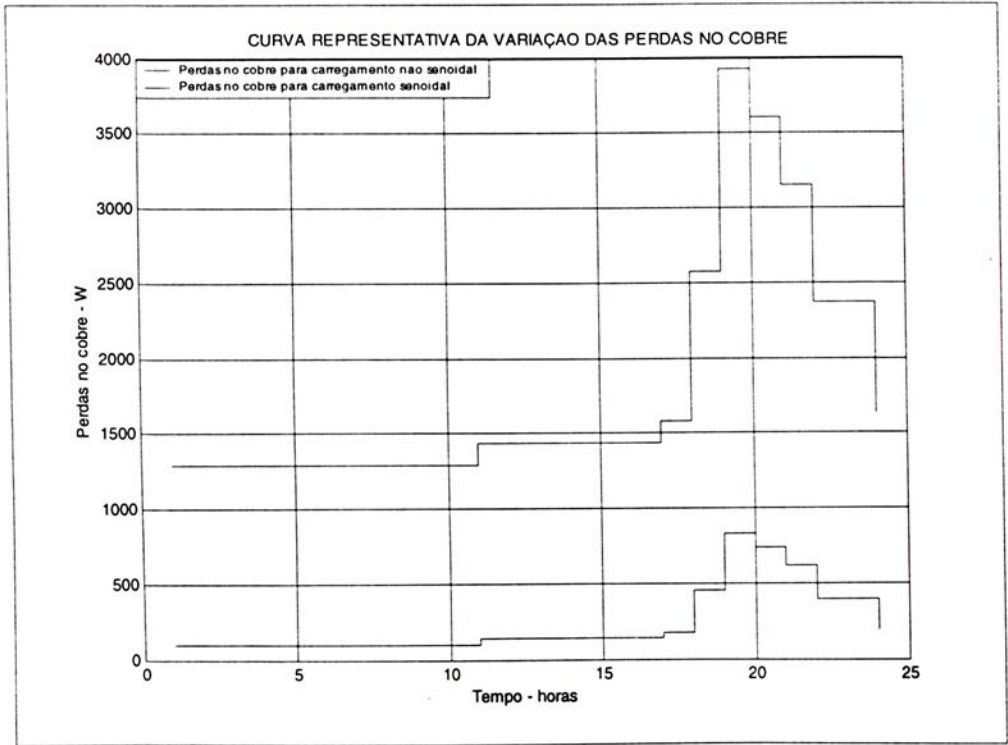
Variação da Temperatura Ambiente Diária



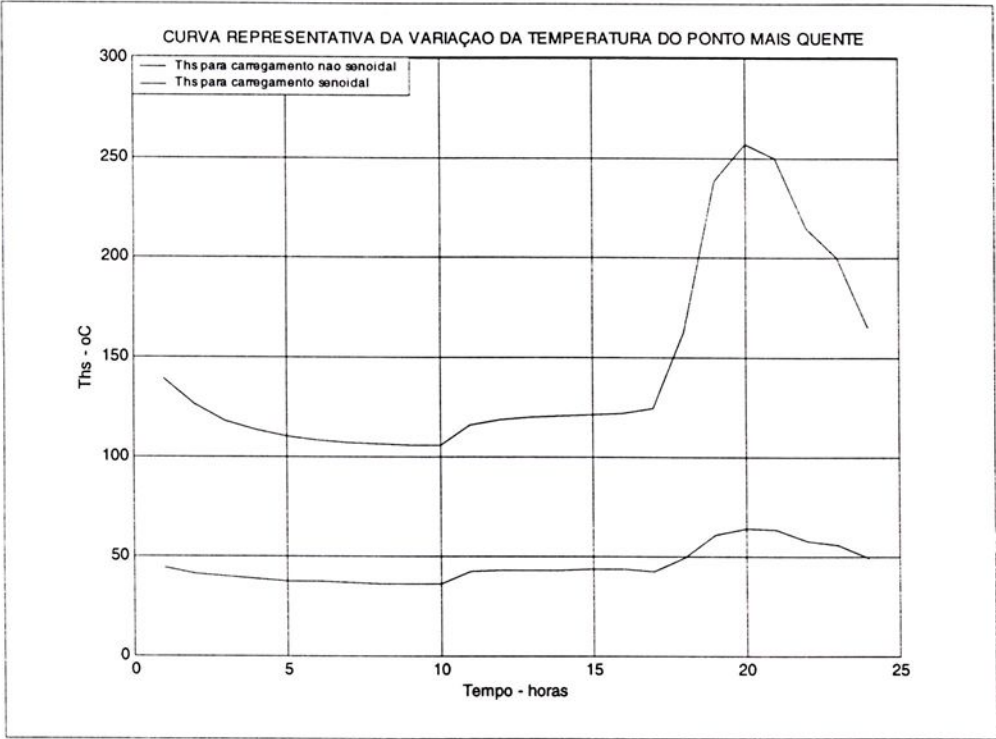
Variação das perdas no Ferro



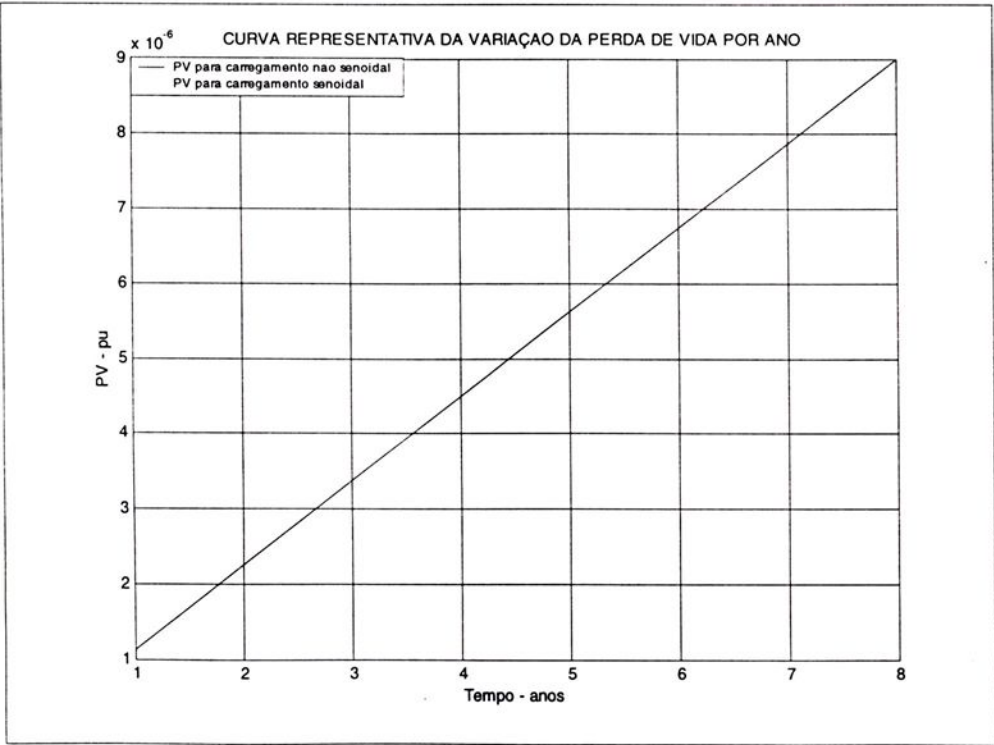
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



Para carregamento nao senoidal. Em $t=20$

a temperatura de fulgor do oleo foi alcançada. O transformador nao pode
trabalhar nessa temperatura. Carregamento excessivo.

Presione qq tecla para continuar...

ABORTANDO CALCULOS

Pressione qualquer tecla para encerrar a programa...

A perda de vida excede 1 pu antes do ano 1 para o carregamento nao senoidal

IX.5 CARREGAMENTO 4

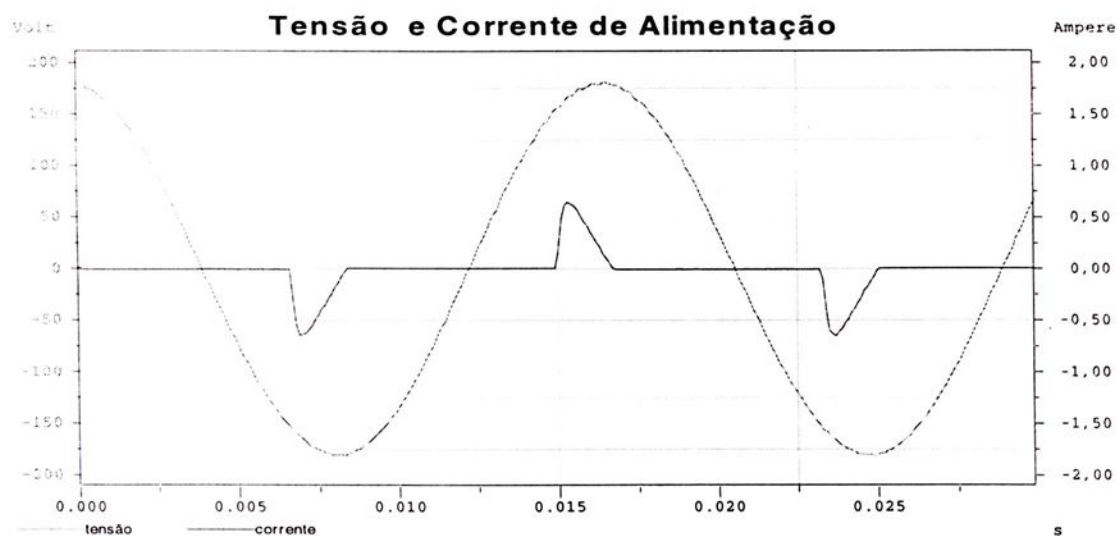


Figura IX.4 – Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 4

Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

Potencia nominal (KVA)=45

Tensao no primario (KV)=13.8

Tensao no secundario (V)=127

Perdas no ferro (KW)=0.189

Perdas no cobre (KW)=0.827

Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC))=50

Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC))=10

Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC))=95

Expoente de refrigeração=0.8

Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6

Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08

Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000

Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)

1

1.100000e-002

8.929000e-001

5.000000e-003

7.077000e-001

1.250000e-002

5.005000e-001

4.100000e-003

2.951000e-001

8.000000e-003

2.075000e-001

1.270000e-002

1.714000e-001

9.200000e-003

1.639000e-001

4.400000e-003

1.412000e-001

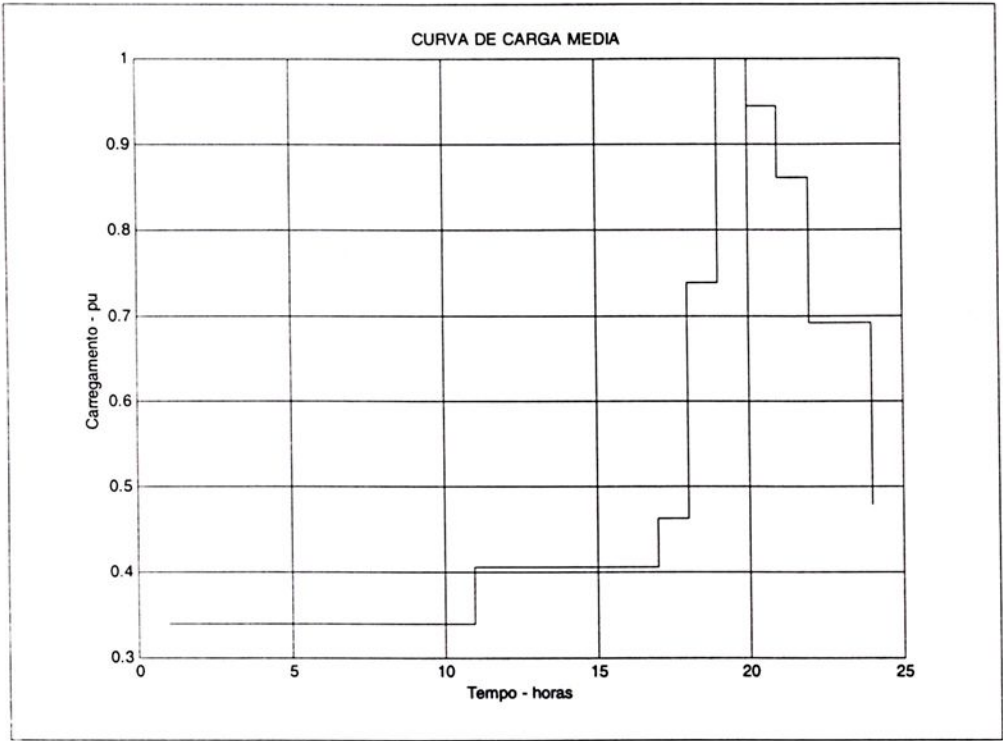
1.430000e-002

1.138000e-001

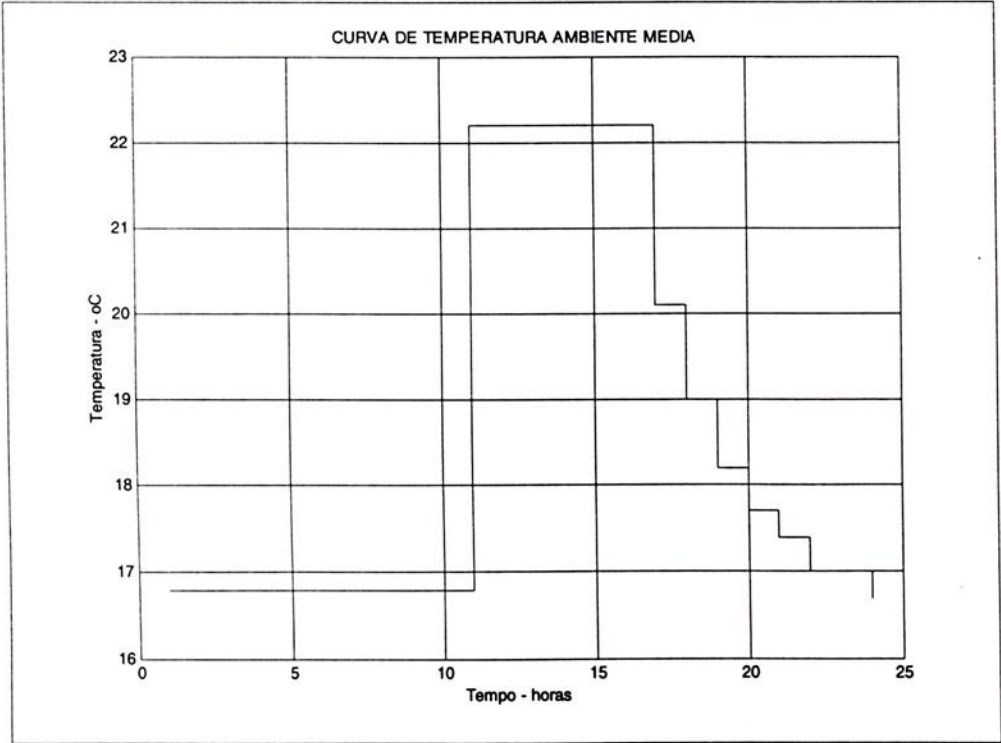
1.710000e-002



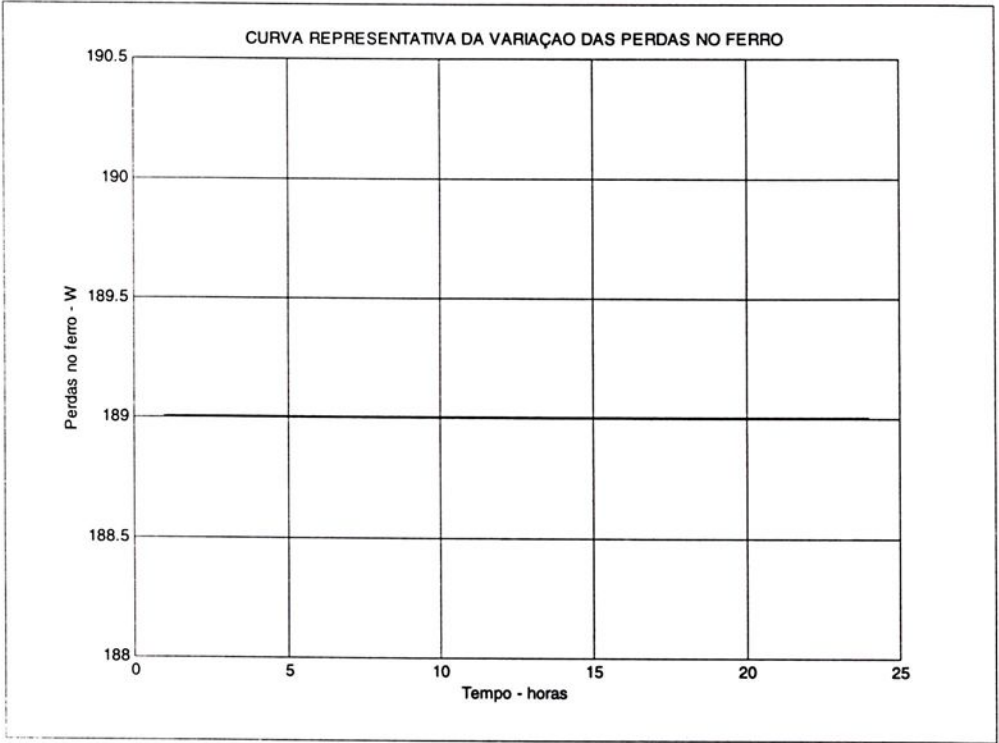
Curva de carga diária



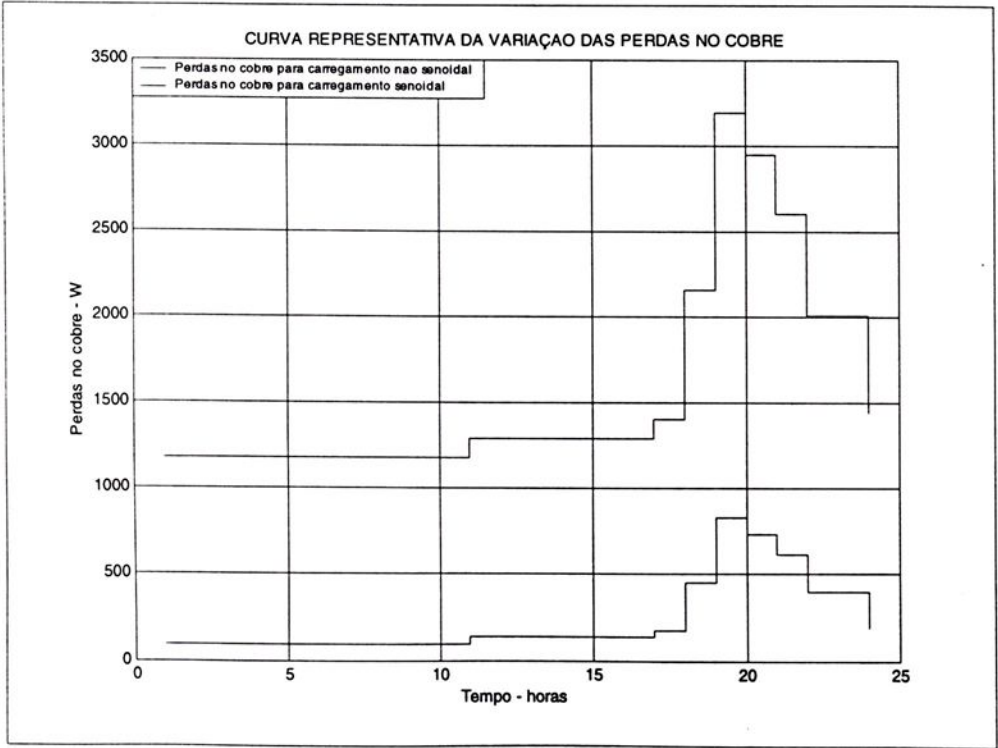
Variação da Temperatura Ambiente Diária



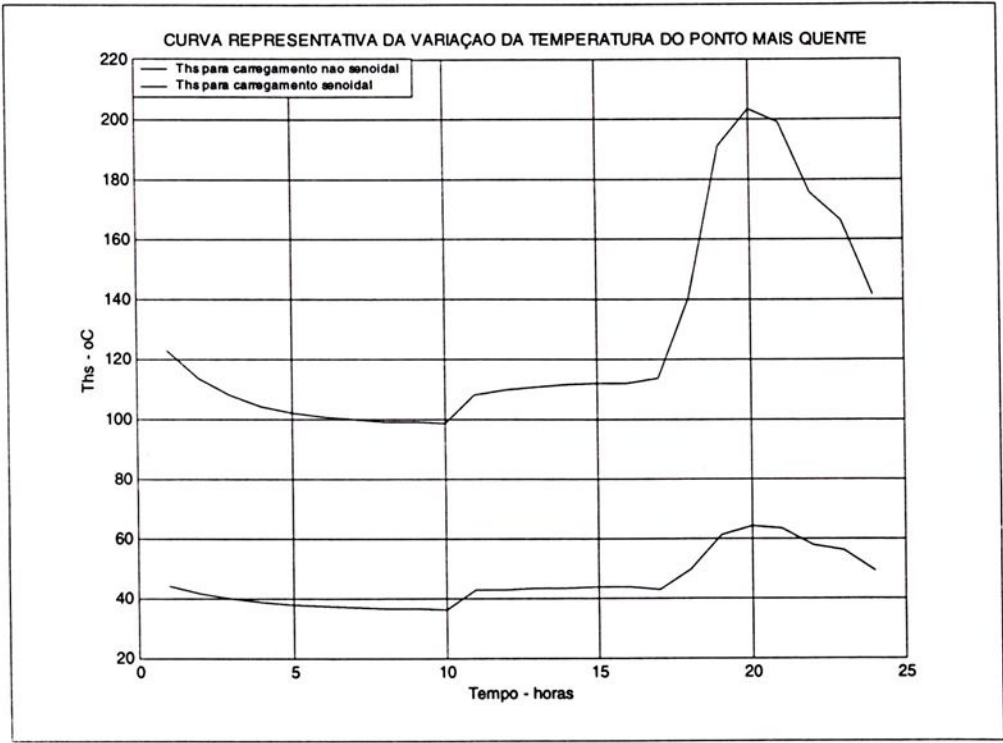
Variação das perdas no Ferro



Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



IX.6 CARREGAMENTO 5

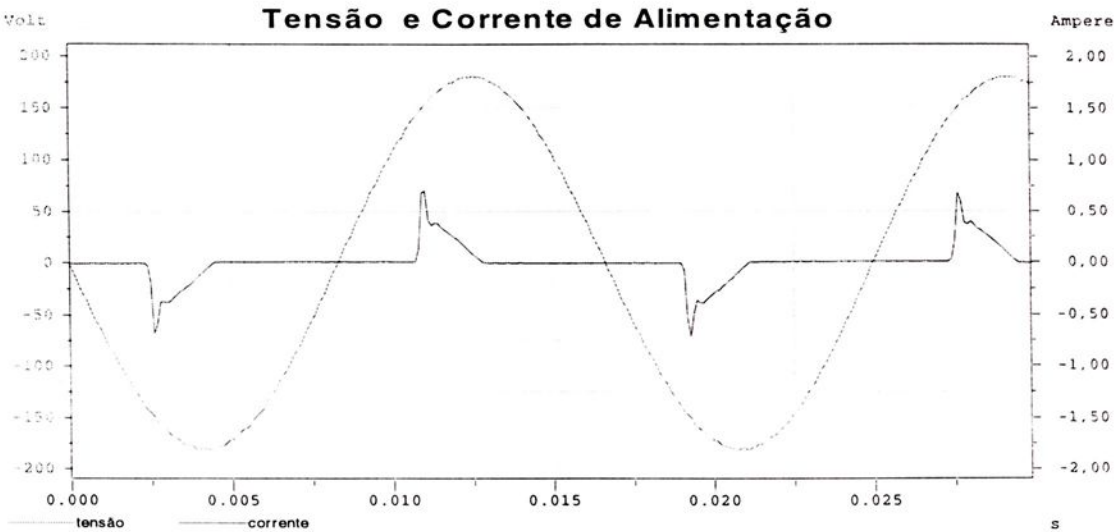


Figura IX.5 – Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 5

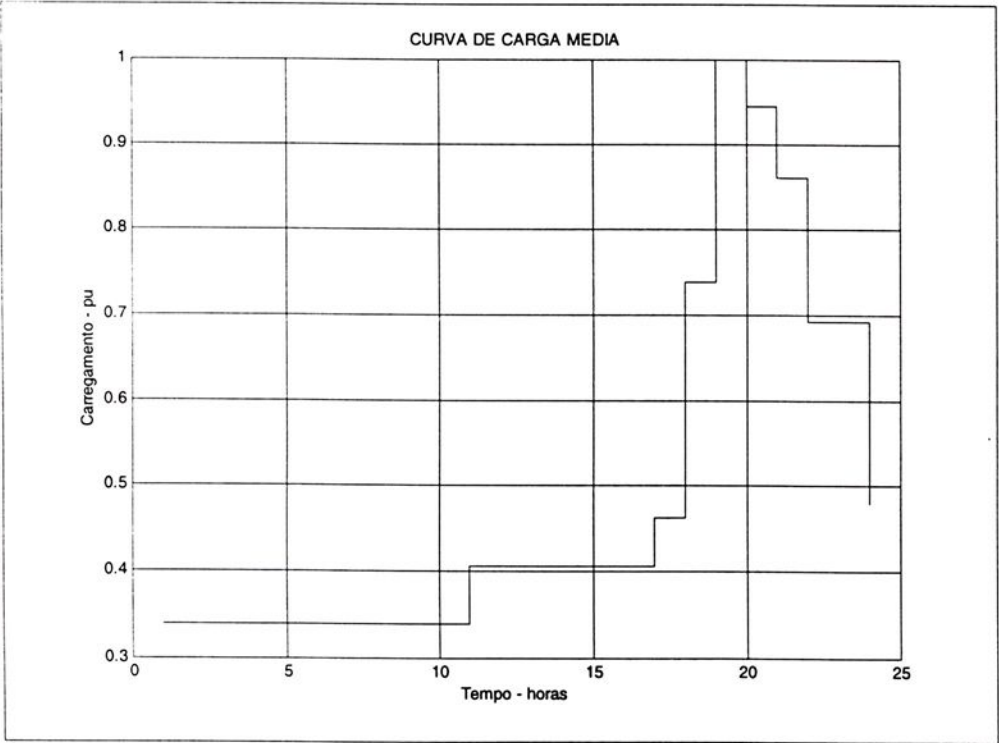
Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

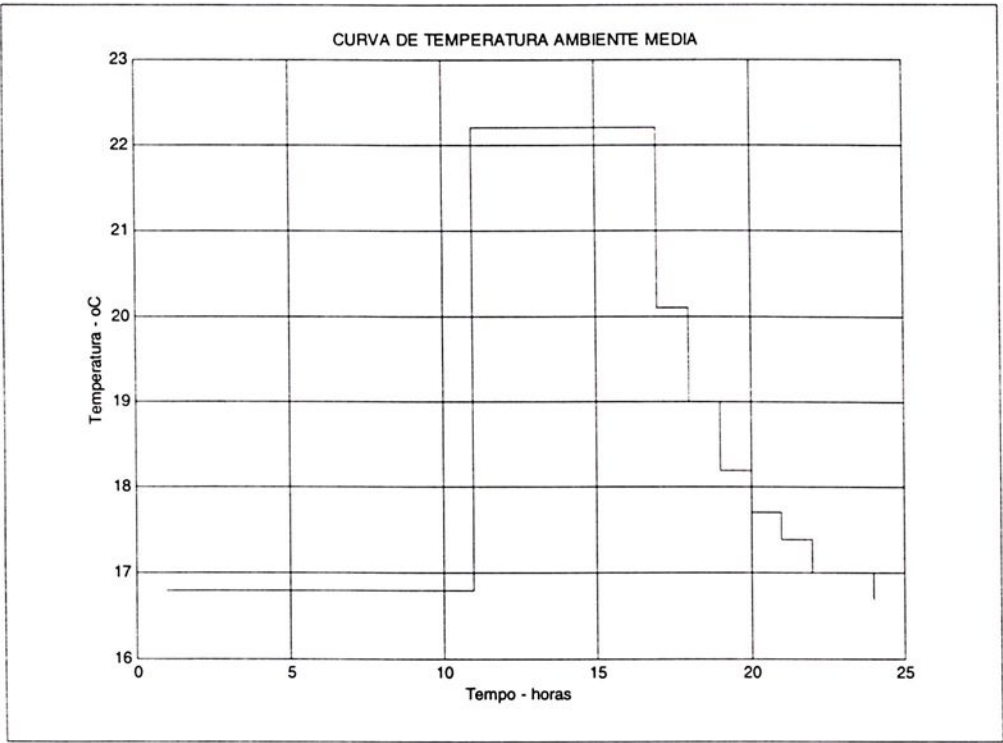
- Potencia nominal (KVA)=45
- Tensao no primario (KV)=13.8
- Tensao no secundario (V)=127
- Perdas no ferro (KW)=0.189
- Perdas no cobre (KW)=0.827
- Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC))=50
- Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC))=10
- Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC))=95
- Expoente de refrigeração=0.8
- Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6
- Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08
- Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000
- Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)
 - 1
 - 1.290000e-002
 - 8.829000e-001
 - 1.210000e-002
 - 6.825000e-001

6.200000e-003
4.398000e-001
4.500000e-003
2.729000e-001
1.440000e-002
2.276000e-001
1.040000e-002
2.294000e-001
1.060000e-002
2.378000e-001
2.320000e-002
2.600000e-002
1.930000e-002
1.875000e-001
1.780000e-002

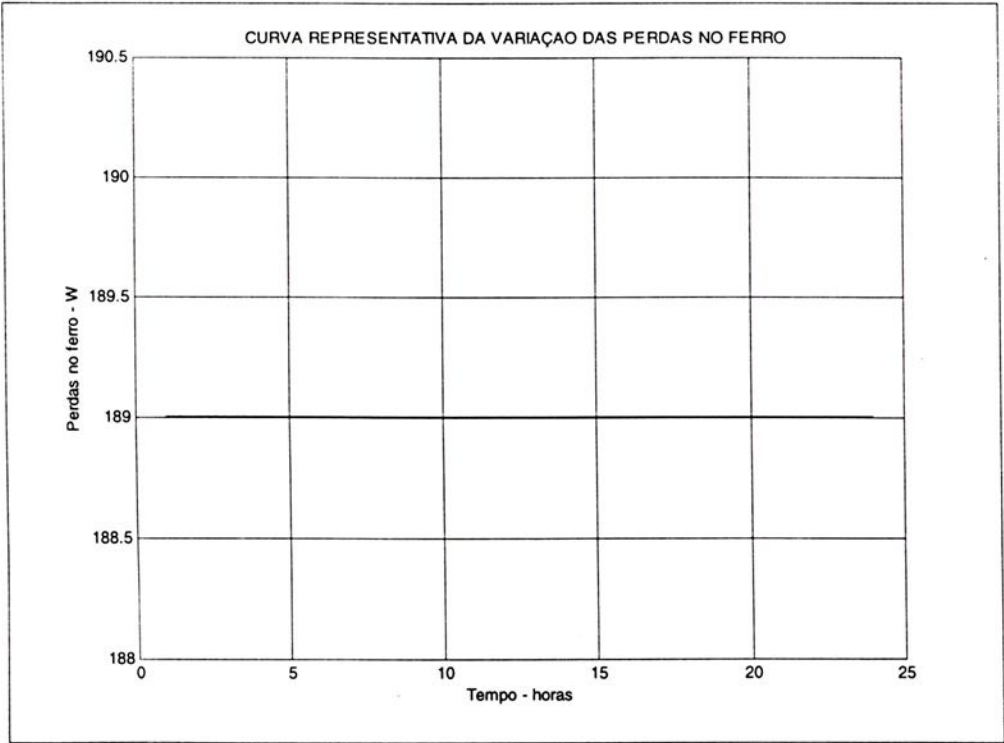
Curva de carga diária



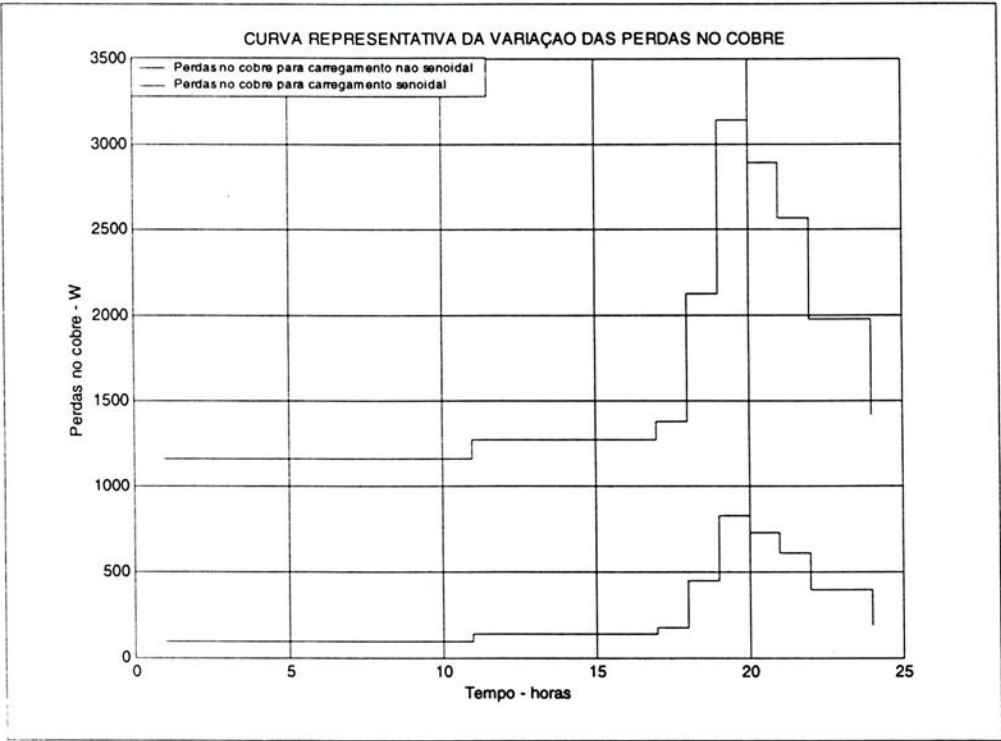
Variação da Temperatura Ambiente Diária



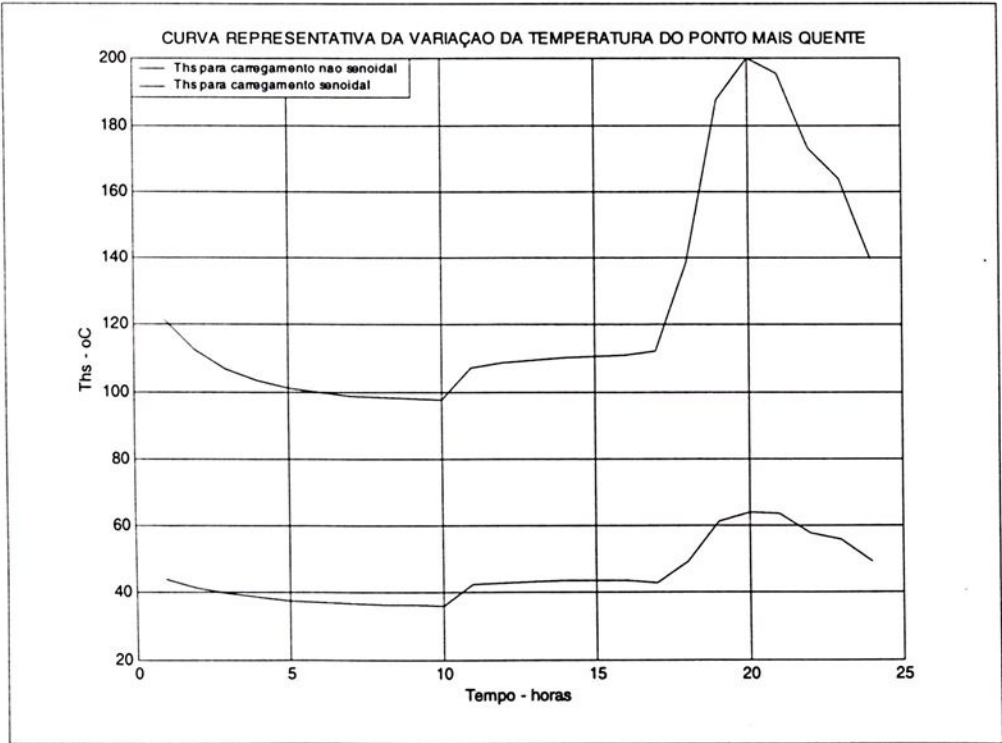
Variação das perdas no Ferro



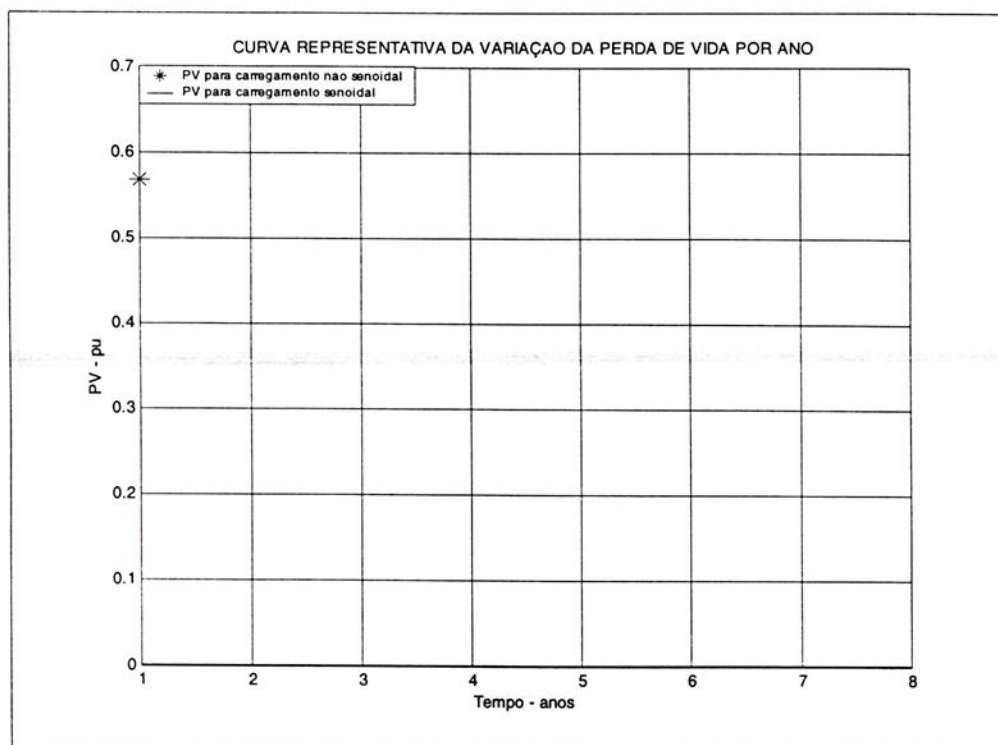
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



IX.7 CARREGAMENTO 6

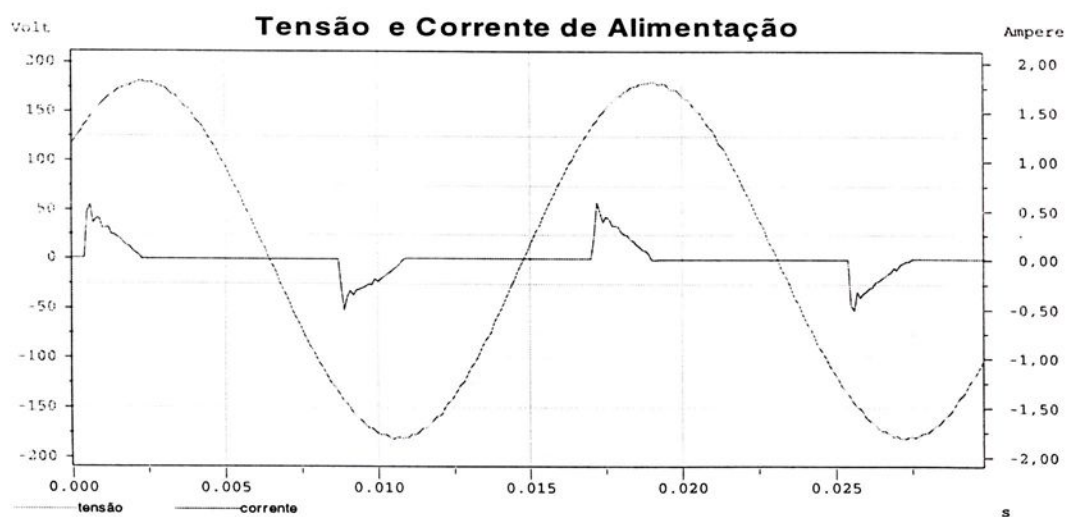


Figura IX.6 – Formas de onda de tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 6

Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

Potencia nominal (KVA)=45

Tensao no primario (KV)=13.8

Tensao no secundario (V)=127

Perdas no ferro (KW)=0.189

Perdas no cobre (KW)=0.827

Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC)=50

Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC)=10

Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC)=95

Expoente de refrigeração=0.8

Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6

Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08

Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000

Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)

1

1.470000e-002

9.032000e-001

1.220000e-002

7.252000e-001

1.570000e-002

4.828000e-001

7.900000e-003

3.210000e-001

2.190000e-002

2.371000e-001

1.680000e-002

2.320000e-001

1.270000e-002

2.046000e-001

9.200000e-003

1.633000e-001

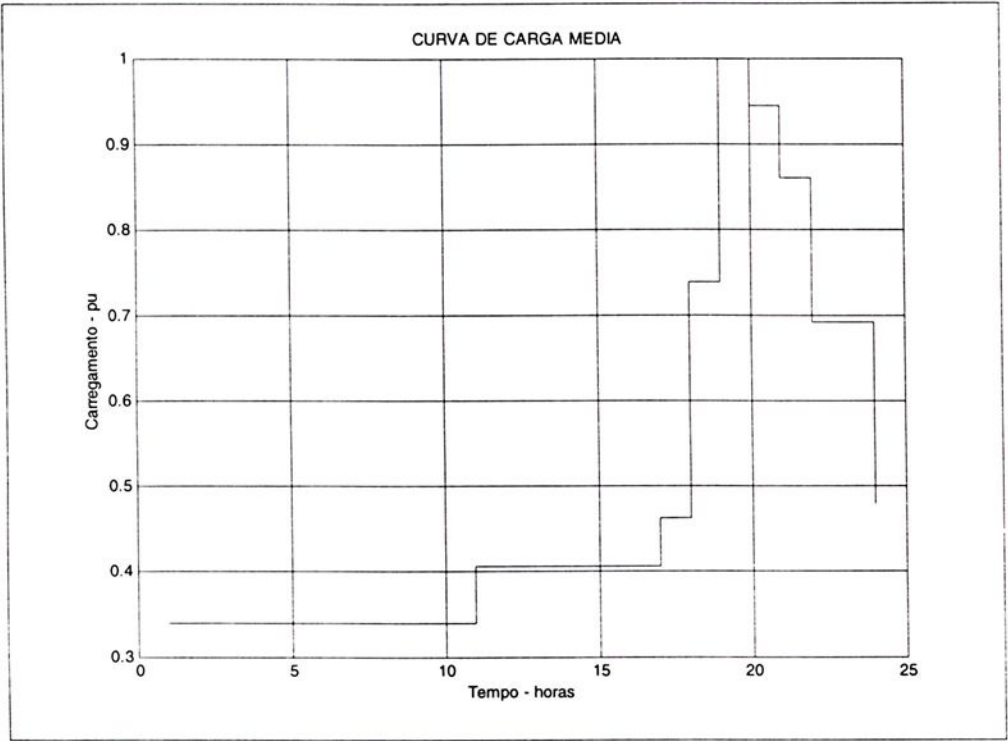
1.510000e-002

1.598000e-001

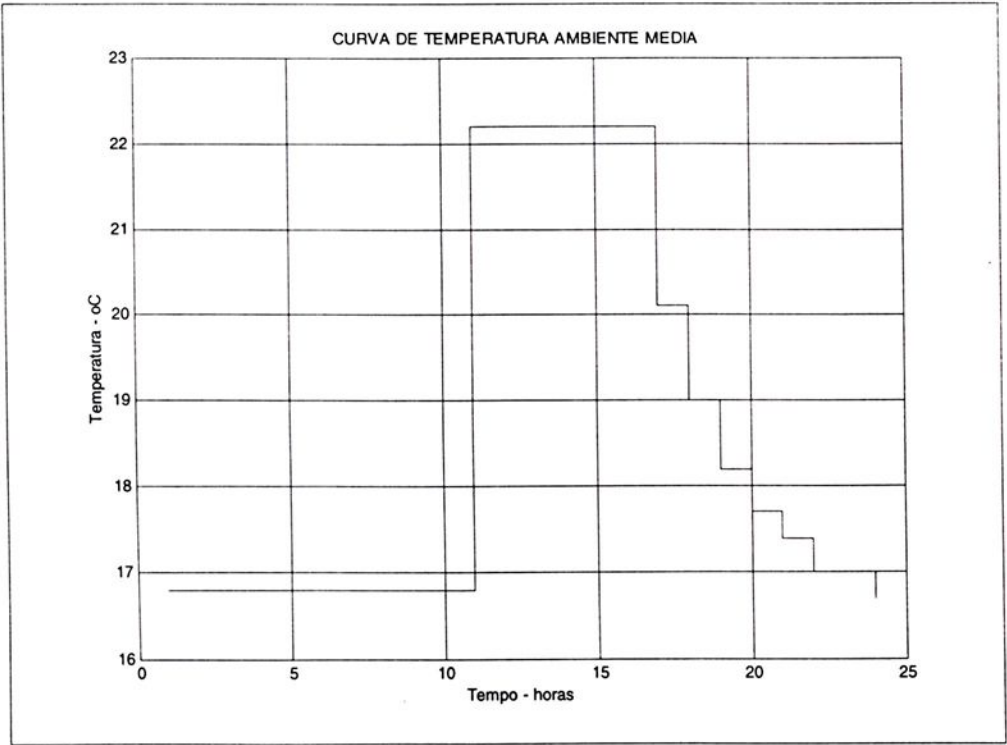
1.020000e-002



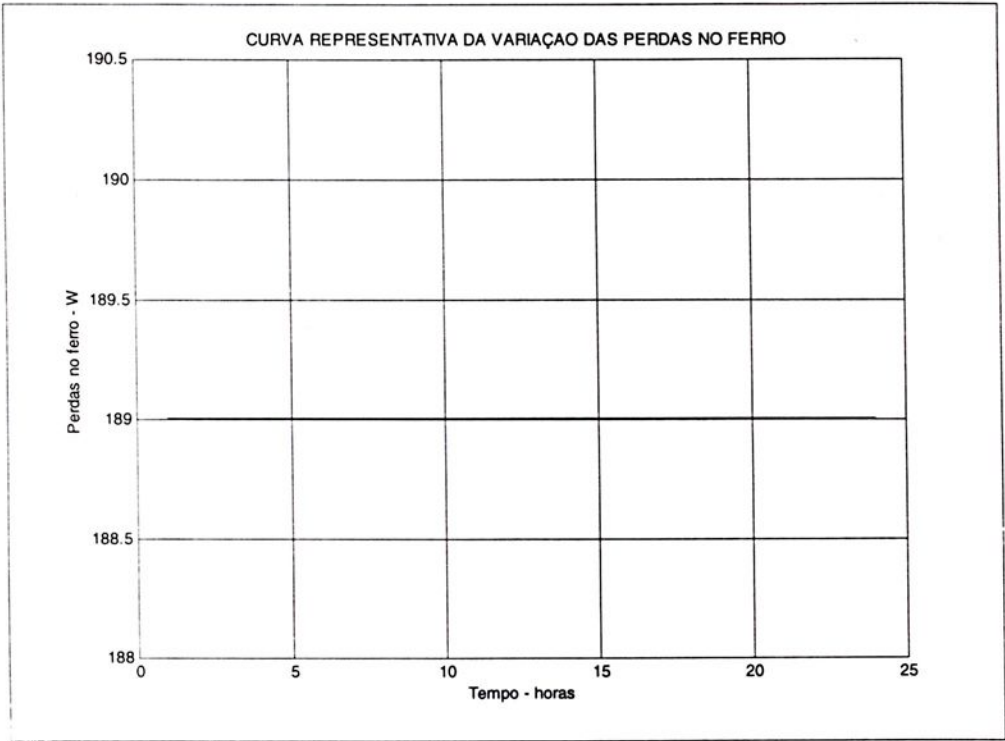
Curva de carga diária



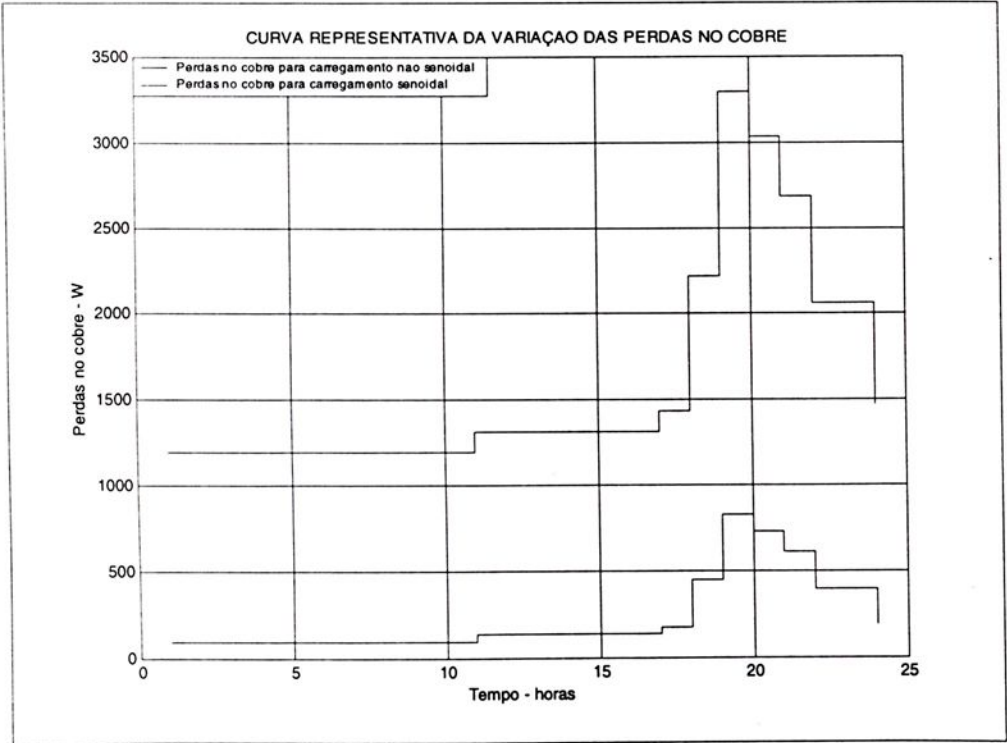
Variação da Temperatura Ambiente Diária



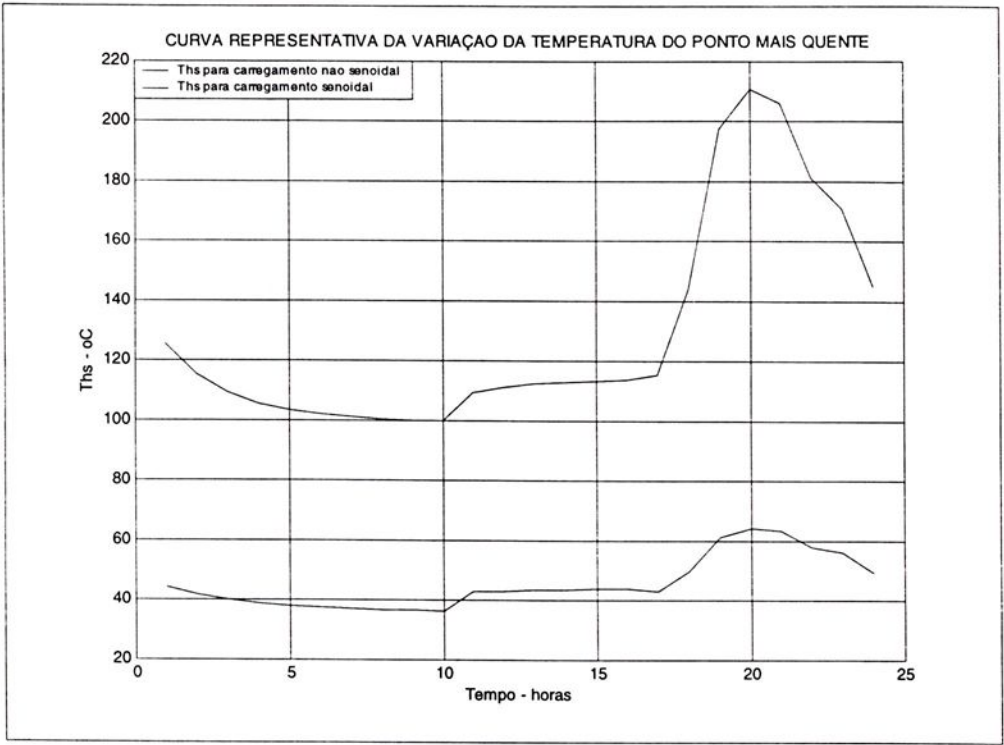
Variação das perdas no Ferro



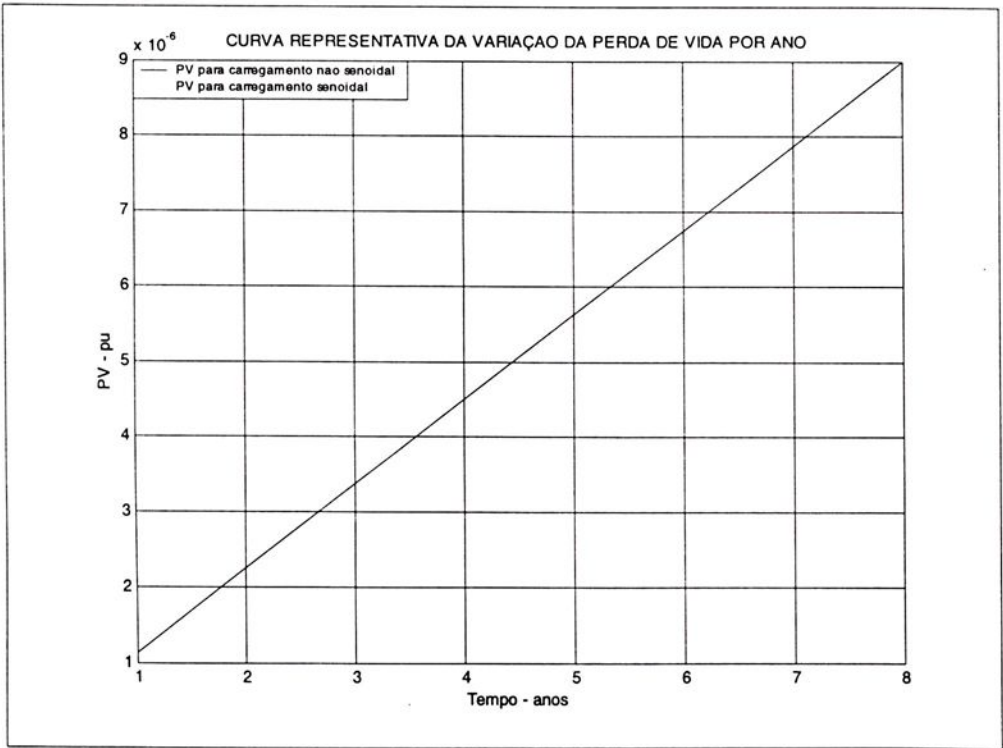
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



A perda de vida excedeu 1 pu antes do ano 1 para o carregamento nao senoidal

IX.8 CARREGAMENTO 7

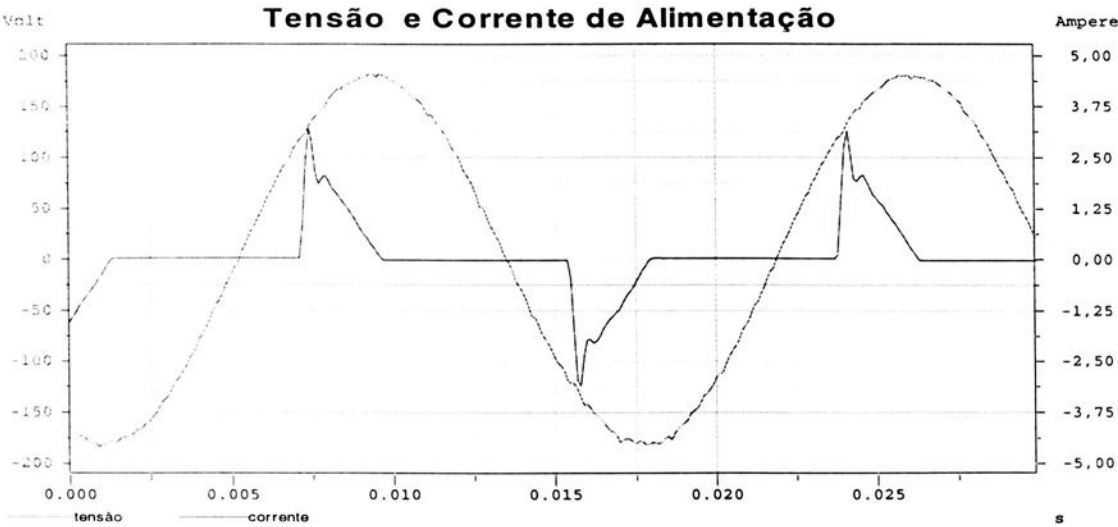


Figura IX.7 – Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 7

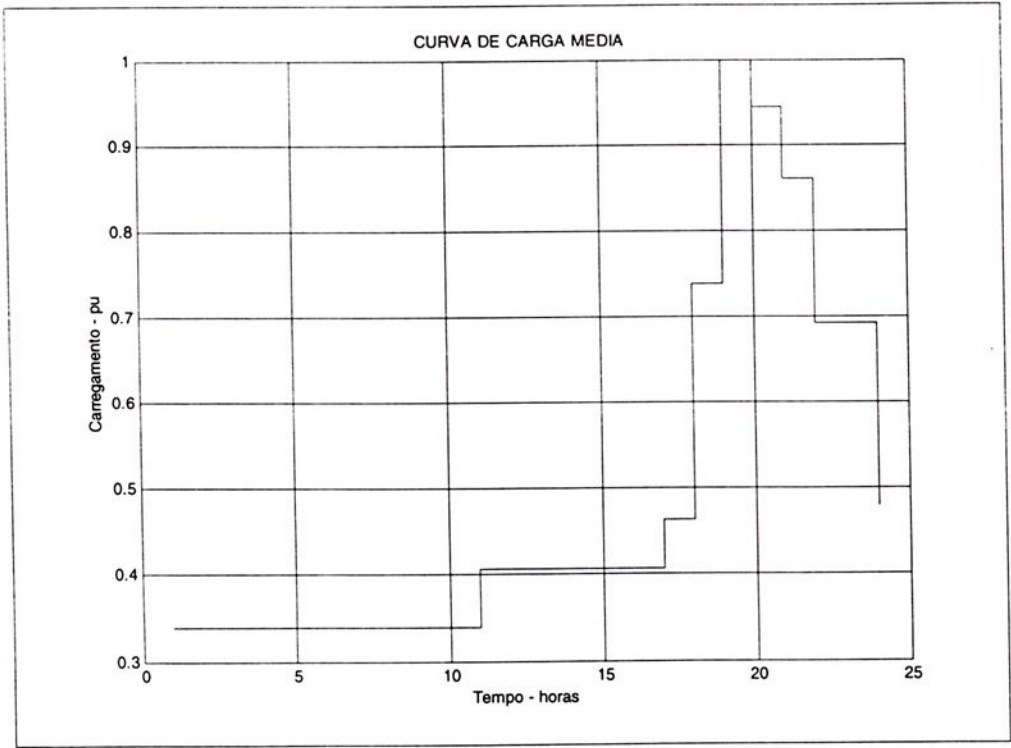
Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

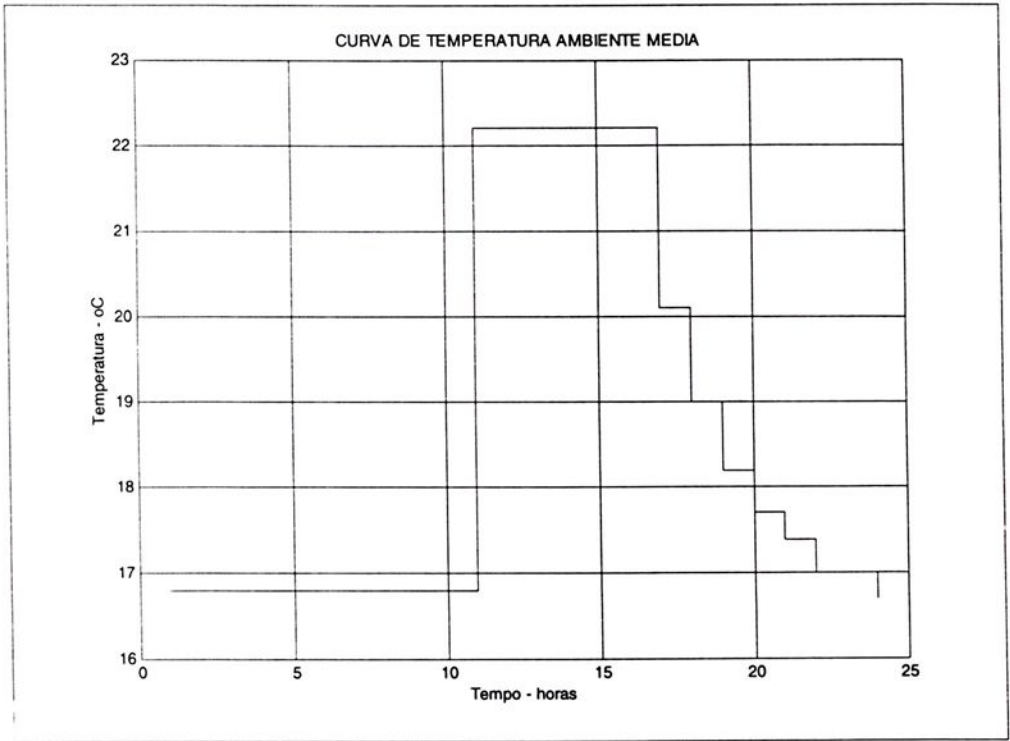
- Potencia nominal (KVA)=45
- Tensao no primario (KV)=13.8
- Tensao no secundario (V)=127
- Perdas no ferro (KW)=0.189
- Perdas no cobre (KW)=0.827
- Elevação da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC)=50
- Elevação da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC)=10
- Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC)=95
- Expoente de refrigeração=0.8
- Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6
- Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08
- Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000
- Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)
 - 1
 - 7.600000e-003
 - 8.297000e-001

1.640000e-002
5.459000e-001
1.010000e-002
2.958000e-001
9.500000e-003
2.150000e-001
1.170000e-002
2.160000e-001
1.050000e-002
1.826000e-001
1.350000e-002
1.406000e-001
1.780000e-002
1.343000e-001
1.320000e-002
1.338000e-001
9.300000e-003

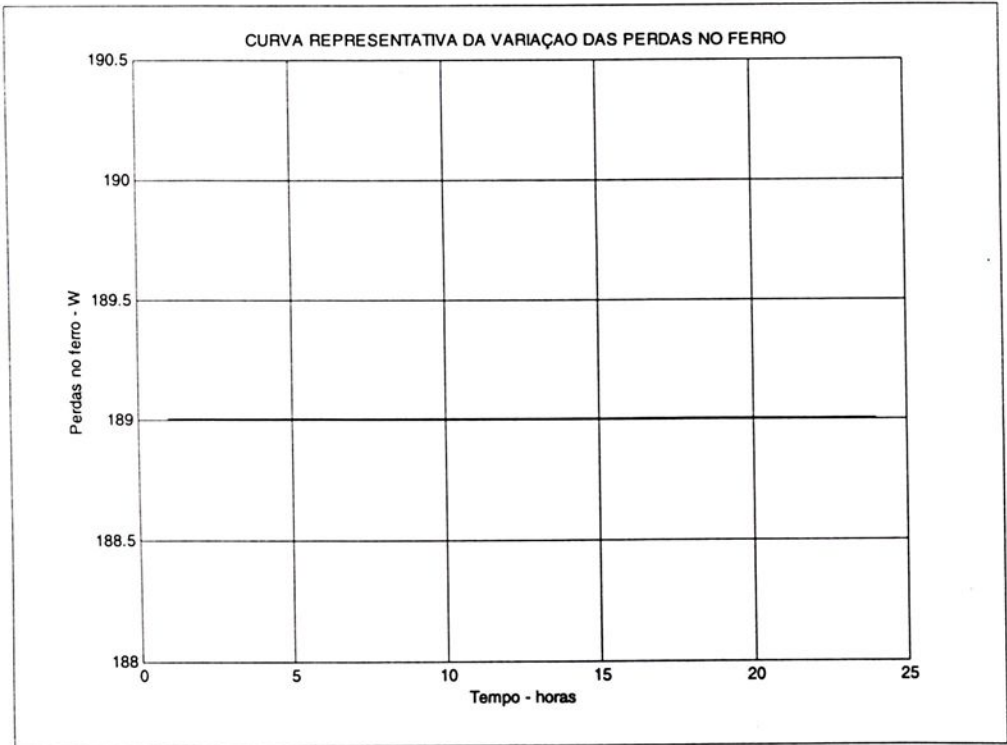
Curva de carga diária



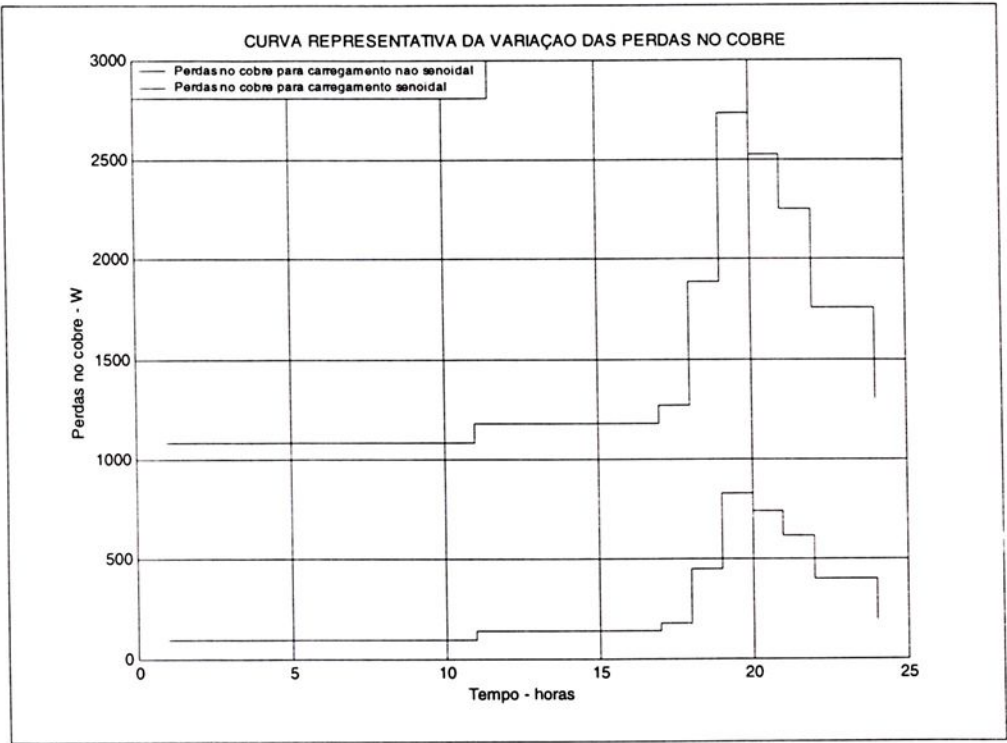
Variação da Temperatura Ambiente Diária



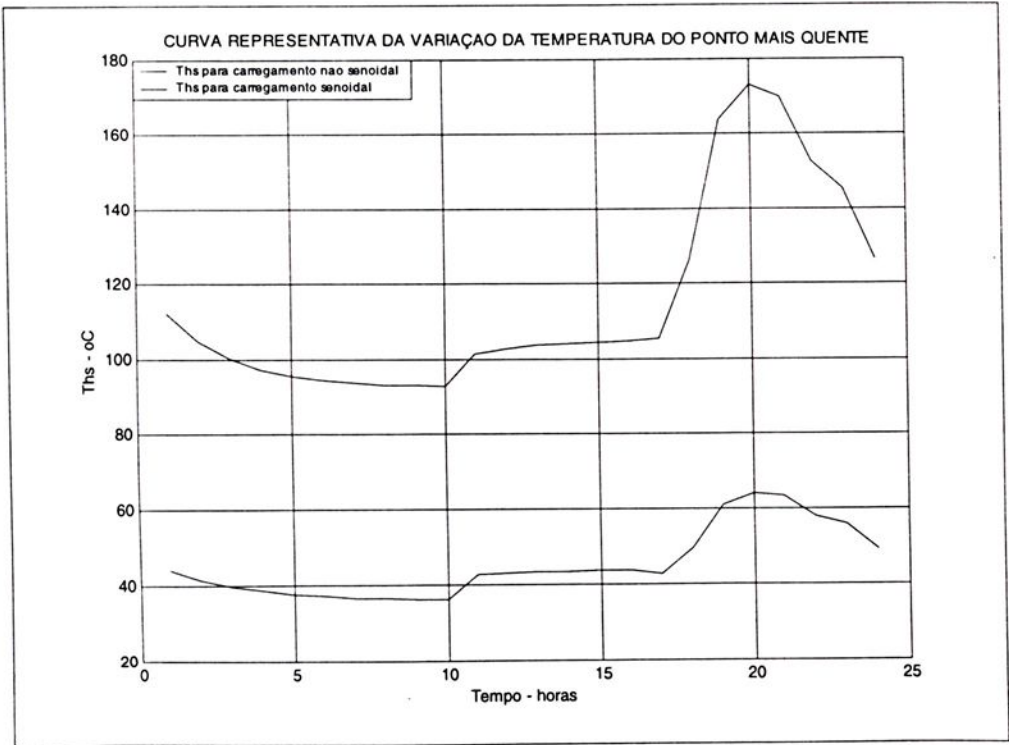
Variação das perdas no Ferro



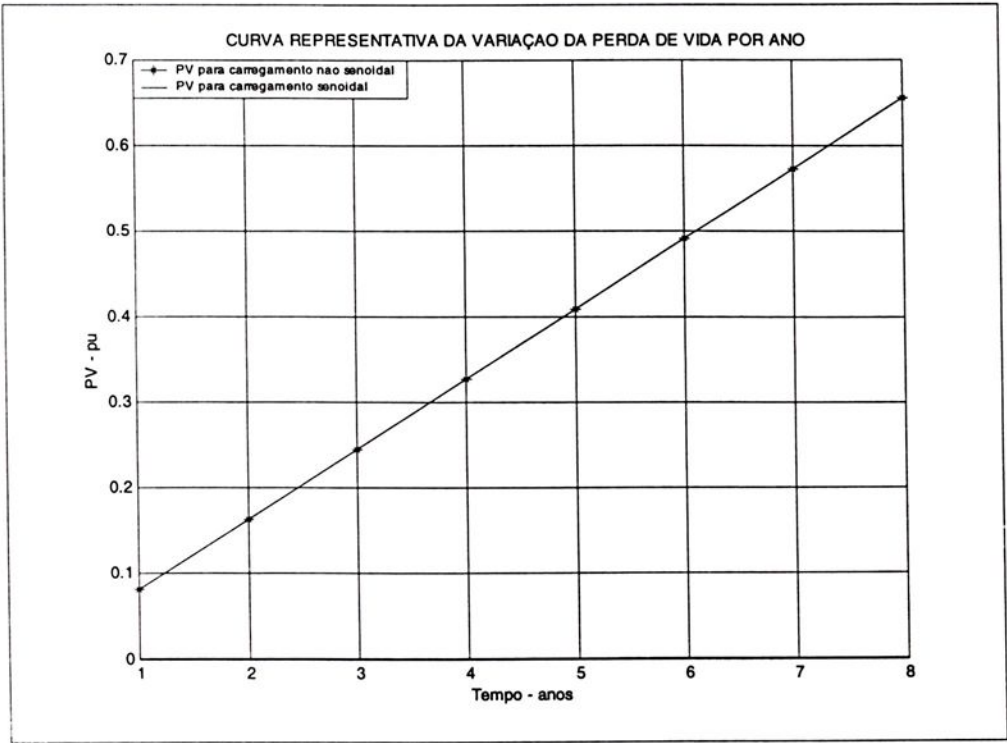
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



IX.9 CARREGAMENTO 8

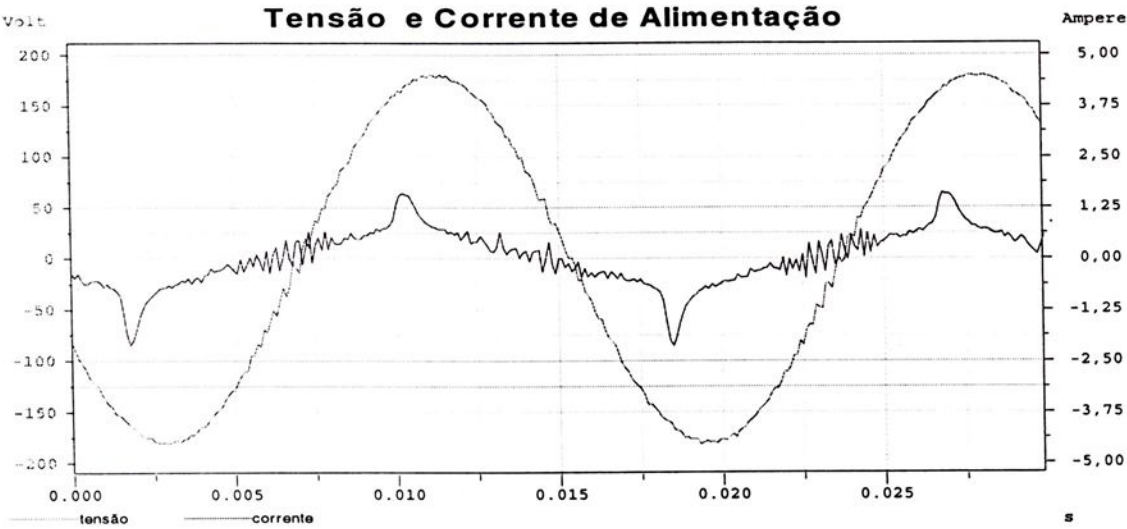


Figura IX.8 - Formas de onda da tensão e corrente no enrolamento BT para o carregamento 8

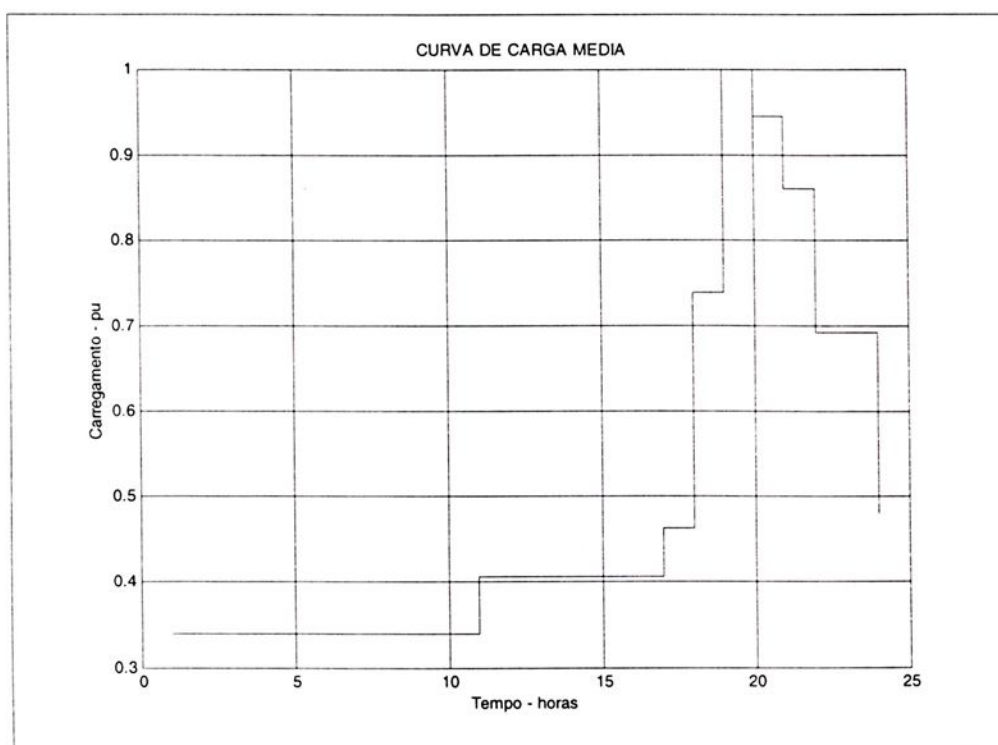
Dados do transformador:

Os dados do transformador simulado sao:

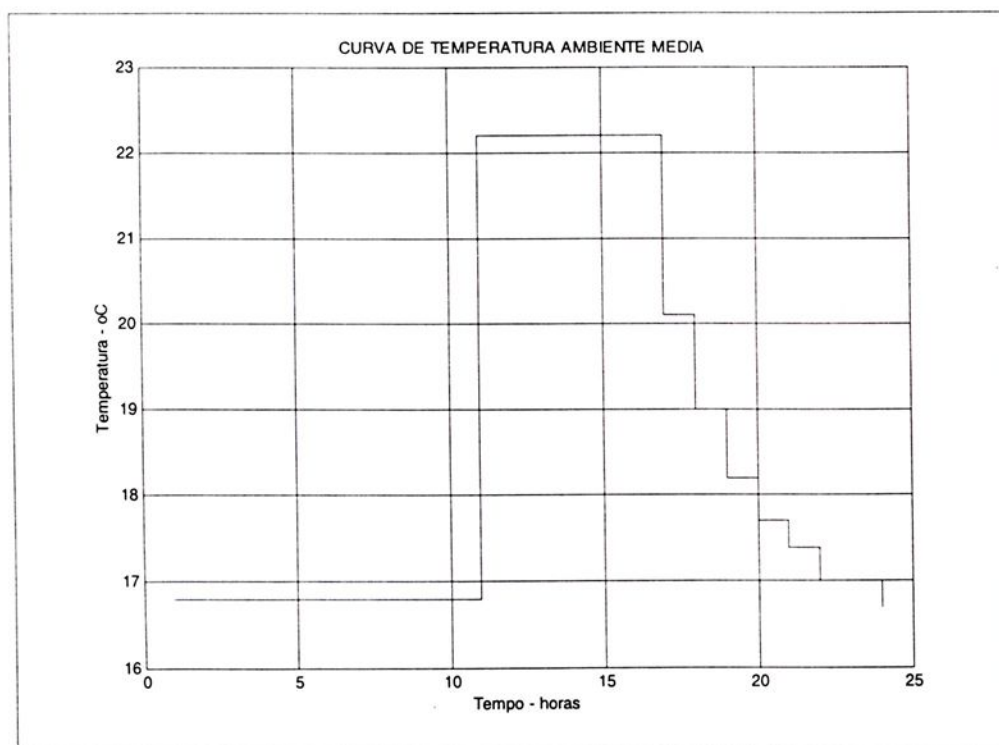
Potencia nominal (KVA)=45
Tensao no primario (KV)=13.8
Tensao no secundario (V)=127
Perdas no ferro (KW)=0.189
Perdas no cobre (KW)=0.827
Elevacao da temperatura do topo do oleo acima da ambiente nominal (oC))=50
Elevacao da temperatura do enrolamento acima da do oleo nominal (oC))=10
Temperatura nominal de ponto quente para transformadores classe 55 oC (oC))=95
Expoente de refrigeracao=0.8
Constante de tempo de aquecimento do oleo nominal=2.6
Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal=0.08
Expectativa de vida minima nominal (horas)=70000
Componentes harmonicas da corrente de carga (pu)
1
2.190000e-002
2.541000e-001
2.730000e-002
1.956000e-001
3.640000e-002
1.889000e-001
2.870000e-002
1.196000e-001
1.840000e-002
1.029000e-001
3.330000e-002
8.410000e-002
2.770000e-002
5.820000e-002
2.180000e-002
5.250000e-002
2.460000e-002
4.570000e-002
1.940000e-002



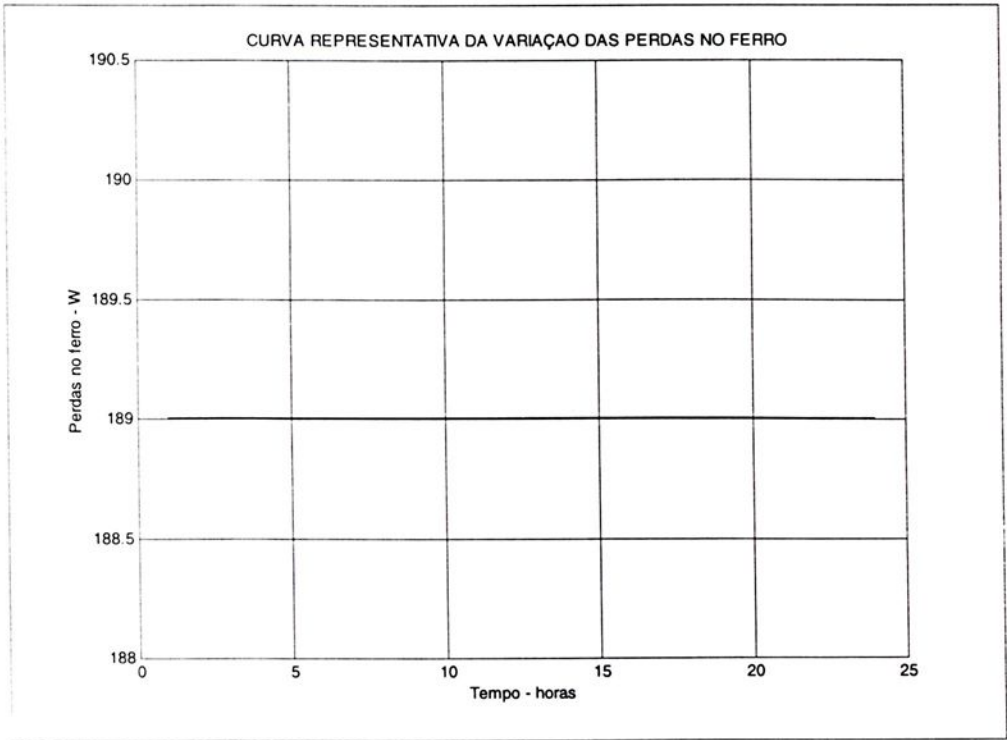
Curva de carga diária



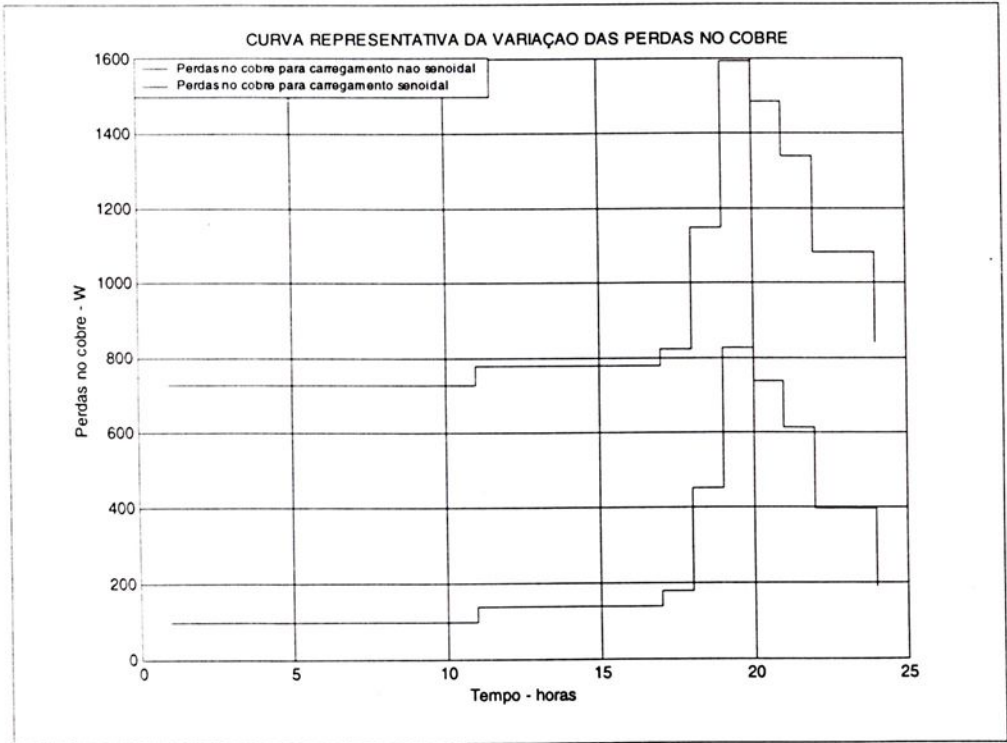
Variação da Temperatura Ambiente Diária



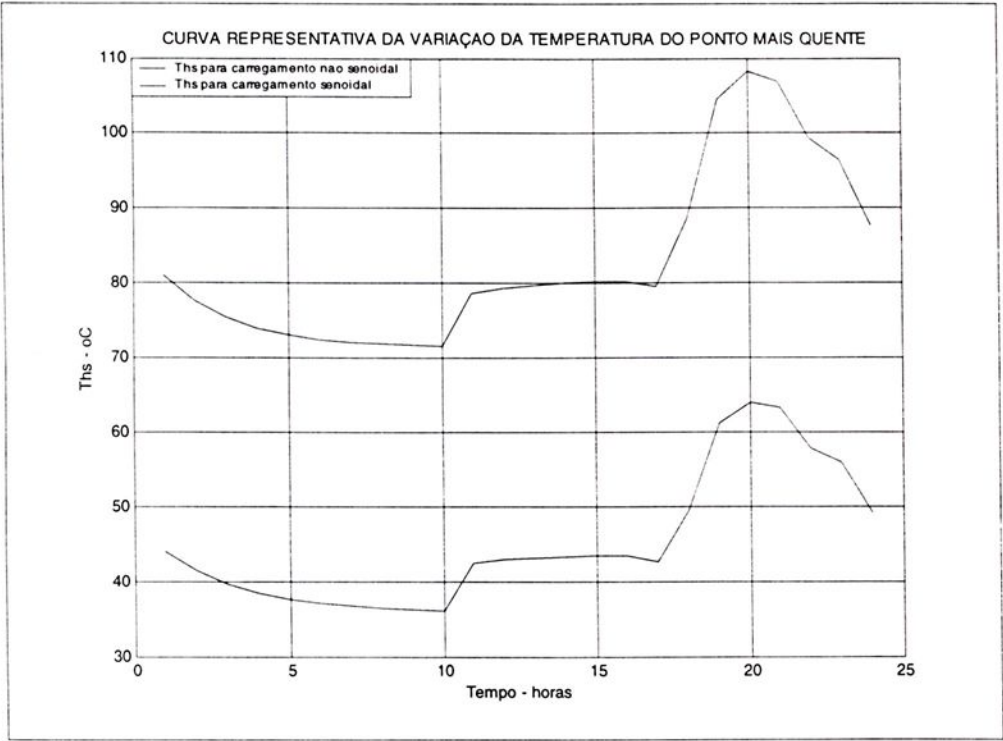
Variação das perdas no Ferro



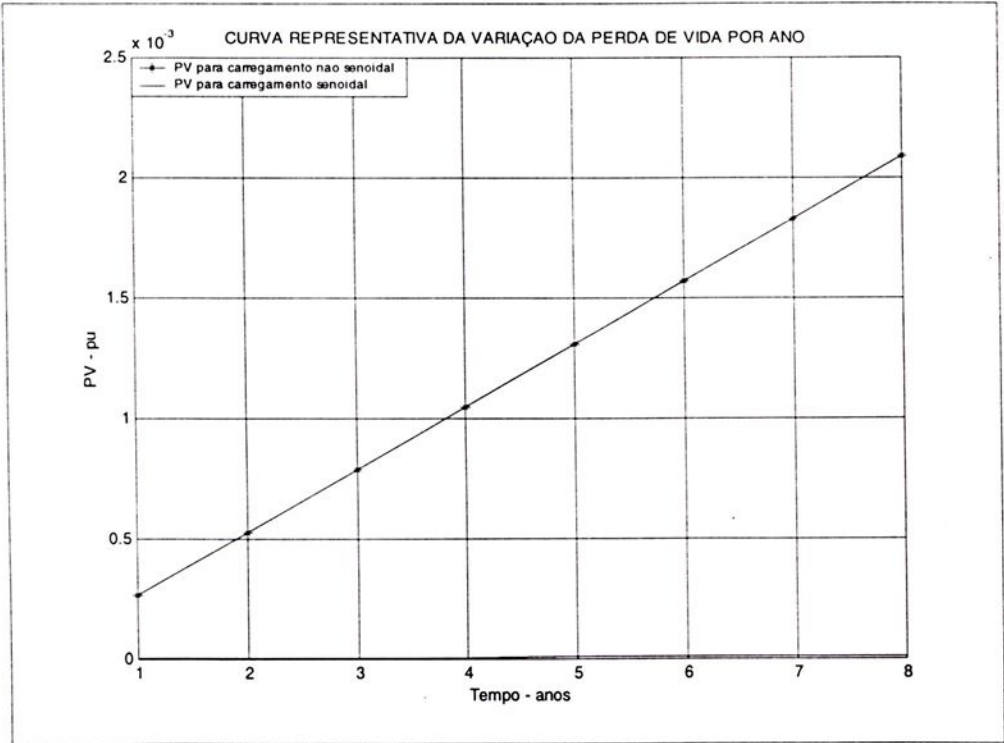
Variação das Perdas no Cobre



Variação da temperatura do ponto mais quente



Perda de Vida



IX.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que para todos os carregamentos simulados, a perda de vida devido à cargas não lineares é muito maior que aquela para cargas puramente senoidais. O que já era esperado, pois, cargas não senoidais aumentam as perdas no cobre, que influem diretamente na temperatura do enrolamento, conseqüentemente, na deterioração da isolação.

Da análise das simulações realizadas, observa-se que para o caso senoidal, a expectativa de vida útil do transformador é muito maior que a expectativa de vida mínima considerada pela NBR, que é de aproximadamente 8 anos.

Observando cada carregamento separadamente, pode-se afirmar que para o carregamento 1, as perdas no cobre e as temperaturas de ponto mais quente do enrolamento são, respectivamente, 4 e 3 vezes maiores no caso não senoidal que no caso senoidal, o que leva a uma expectativa de vida útil de aproximadamente 4 anos, o que é metade da expectativa mínima e é muito menor que no caso puramente senoidal.

Com relação aos carregamentos 2 e 8, nota-se que a expectativa de vida é muito maior que a mínima, entretanto, claro, é menor que no caso puramente senoidal. As perdas no cobre e as temperaturas de ponto mais quente do enrolamento nesses casos são, respectivamente, 2 e 1,5 vezes maiores no caso não senoidal que no caso senoidal.

Com o carregamento 3 o transformador analisado nem poderia funcionar, pois a temperatura do enrolamento atinge a temperatura de fulgor do óleo. As perdas no cobre para esse carregamento são mais de 5 vezes maiores que no caso de carregamento puramente senoidal.

Carregando o transformador analisado com as cargas 4 e 5, ele teria uma expectativa de vida de apenas um ano, pois suas temperaturas do enrolamento chegam muito próximas a temperatura de fulgor do óleo no horário de pico e são muito maiores que aquela considerada máxima pela NBR mesmo nos horários de menor carga.

Finalmente, com relação ao carregamento 7, nota-se que, a expectativa de vida é pouco que a mínima, mas ainda muito menor que no caso de carregamento puramente senoidal. As perdas no cobre e as temperaturas de ponto mais quente do enrolamento nesse caso são, respectivamente, 3,5 e 2,5 vezes maiores nesse caso.

Dos resultados, pode-se dizer que, no mínimo, a perda de vida do transformador de distribuição simulado, operando com cargas não lineares é 100% maior que com cargas senoidais. Em outras palavras, os transformadores operando com cargas puramente senoidais têm uma expectativa de vida de, no mínimo, o dobro daquela para operação com cargas não senoidais.

Assim, a natureza e o comportamento do carregamento imposto a um transformador de distribuição irão definir o seu comportamento ao longo da vida útil.



CAPÍTULO X – CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

X.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho enfocou questões relacionadas com os efeitos das distorções harmônicas no comportamento térmico e vida útil de transformadores de distribuição. Inicialmente, teceram-se considerações sobre a forma de obtenção e análise da curva diária de carga representativa de um transformador. Foi então discutida a variação dos parâmetros internos do transformador com a variação da frequência e apresentaram-se diversas formulações propostas para a inclusão desse efeito nos parâmetros do circuito equivalente. Adicionalmente esse efeito foi incorporado no circuito equivalente do transformador.

Em seguida foi observado o comportamento das perdas no núcleo e nos enrolamentos sob efeito de ação de sinais elétricos distorcidos, já que estas influem diretamente no aumento da temperatura interna de funcionamento do transformador.

Finalizando os aspectos anteriormente citados, apresentou-se uma metodologia de cálculo que permite estimar o comportamento térmico e a vida útil dos transformadores de distribuição, quando estes alimentam cargas não lineares, caracterizadas, no presente texto, por dispositivos de iluminação eficiente.

Utilizando um programa computacional desenvolvido e os dados típicos de um transformador de distribuição, vários estudos foram processados e seus resultados apresentados.

De um modo geral, os resultados indicaram que as distorções típicas corrente consideradas aqui afetam drasticamente o comportamento térmico e a vida útil dos transformadores de distribuição.

X.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS

É sabido que a aplicação de uma carga no transformador, provoca neste um aquecimento que, por sua vez, gera degradação do material isolante; e que a medida dessa degradação fornece a perda de vida útil do referido transformador.

Para quantificar a perda de vida útil, foi necessário definir em que condições ela seria calculada, e quais os critérios que baseariam sua análise. Assim, foram observados os seguintes aspectos.

1. Curva diária de carga representativa do transformador, cujos métodos de obtenção e análise foram discutidos no Capítulo II.
2. Variação dos parâmetros e das perdas internas do transformador quando sob influência de sinais distorcidos, assim como foi visto nos Capítulos III e IV.
3. Temperatura ambiente, cálculo das temperaturas do transformador e sua constante térmica, conforme apresentado no Capítulo V.
4. Perda de vida em função da temperatura, como foi observada, entre outros aspectos, no Capítulo VI.



O processo de cálculo utilizado foi resumido no capítulo VI, no fluxograma da figura VI.4.

Dentro desse escopo foram realizadas simulações em um transformador de distribuição cujos dados típicos utilizados encontram-se resumidos na tabela X.1.

Tabela X.1- Dados do transformador utilizados no cálculo da perda da sua vida sob condições senoidais e não senoidais.

Potência Nominal do Transformador	45 KVA
Frequência Nominal do Sistema	60 Hz
Temperatura de fulgor do óleo	250 °C
Elevação da temperatura nominal no óleo acima da ambiente	50 °C
Elevação da temperatura nominal no enrolamento acima do óleo	10 ° C
Perdas no ferro nominais	189 W
Perdas no cobre nominais	827 W
Expoente de refrigeração	0,8
Constante de tempo de aquecimento do óleo nominal	2,6 horas
Constante de tempo de aquecimento do enrolamento nominal	0,08 horas
Tensão Nominal no lado de Alta Tensão	13,8 KV
Tensão Nominal no lado de Baixa Tensão	127 V
Resistência equivalente	1,84 %
Espessura da chapa do núcleo	0,0027 m
Permeabilidade magnética do núcleo	0,0063 H/m
Condutividade térmica do núcleo	10E7 Ω .m
Ordem harmônica máxima considerada (adotada)	20
Expoente de Steimmetz	2

Os dados da curva diária de carga e da curva diária de temperatura ambiente aplicadas a esse transformador são mostrados nas figuras X.1 e X.2 respectivamente.



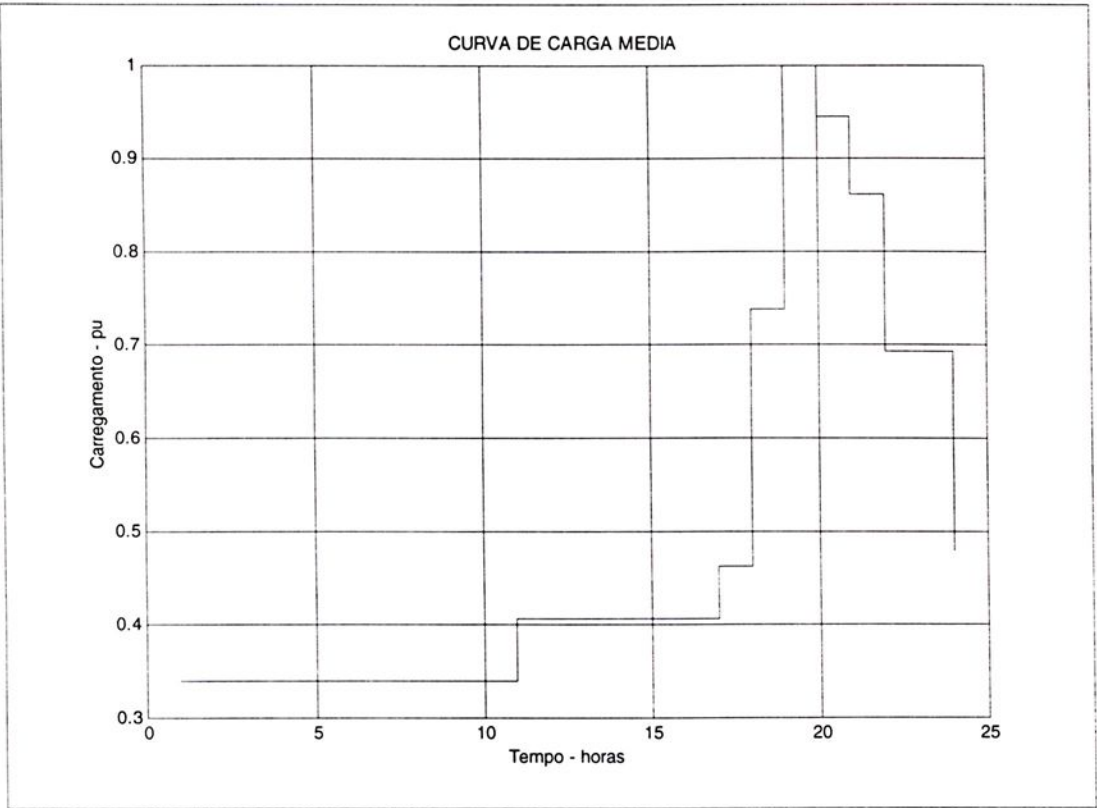


Figura X.1 – Curva diária de carga utilizada para a simulação da perda de vida

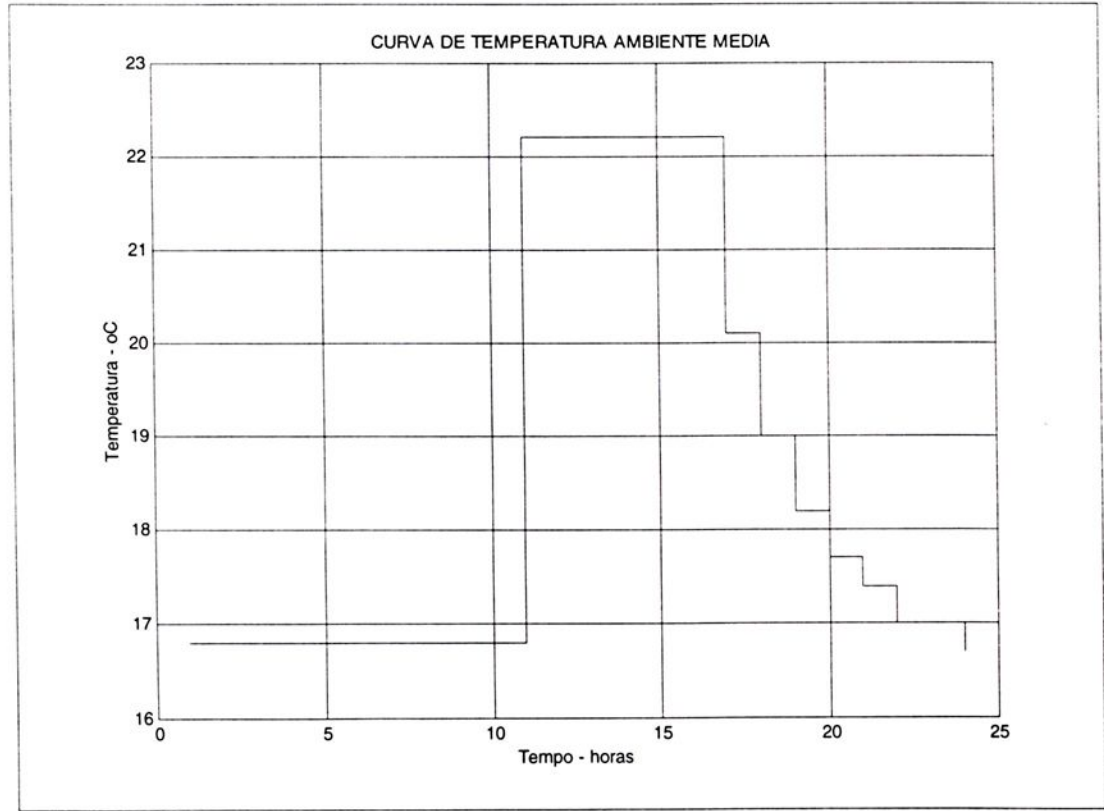


Figura X.2 – Curva diária de temperatura ambiente utilizada para a simulação da perda de vida

Finalmente os dados relativos à composição harmônica da corrente de carga são apresentados no Apêndice I.

De acordo com os resultados apresentados no Capítulo IX, observou-se que:

1. O transformador trabalha a maior parte do tempo subcarregado, ou seja com carga inferior a nominal.
2. A temperatura ambiente diária possui valores relativamente baixos.
3. Todos os carregamentos tinham predominantemente componentes harmônicas ímpares
4. Aqueles que possuíam harmônicas de amplitudes mais elevadas como os carregamentos 1, 3, 4, 5 e 6 apresentaram resultados muito altos de perda de vida, sendo que no carregamento 3 a temperatura de fulgor do óleo foi alcançada, o que nem permitiria que esse carregamento fosse imposto ao transformador.
5. As perdas de vida útil encontradas para condições não senoidais são muito maiores que para condições senoidais, em todos os carregamentos, entretanto, para os carregamentos 7 e 8 o transformador ainda teria uma expectativa de vida maior que a mínima.
6. As perdas internas nos enrolamentos para todos os carregamentos foram maiores no caso de onda distorcida de corrente do que no caso de senóide, sendo essa diferença maior ou menor dependendo da carga ser composta por harmônicas de maior ou menor amplitude.

X.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os diversos aspectos relacionados com a qualidade no fornecimento de energia elétrica, os que mais se destacam são (i) o equilíbrio entre fases nas redes trifásicas, (ii) a forma de onda da tensão de suprimento, que deve ser o mais próxima possível de uma senóide, e (iii) o valor eficaz dessa tensão que deve ser mantido a níveis praticamente constantes.

Entretanto, com o crescimento do número e do porte das cargas especiais implantadas no sistema elétrico brasileiro, associadas às cargas tradicionais, os índices de distorção harmônica podem ultrapassar os níveis máximos admissíveis ou recomendados. Nessas condições, os prejuízos para as empresas concessionárias e/ou para os consumidores podem atingir expressivas proporções.

Dentro desse contexto encontram-se os transformadores, presentes em grande quantidade nas redes de energia e que foram projetados para trabalhar com mínimas distorções nas formas de onda das tensões e correntes para uma dada frequência. Sendo assim, é de se esperar que o seu desempenho seja alterado quando operando sob condições não lineares.

Conhecer os efeitos das harmônicas de tensão e/ou corrente nos transformadores, principalmente com relação à sua expectativa de vida permite que sejam evitados vários



prejuízos às concessionárias, tais como a queima de equipamentos ou blecautes.

Com relação ao aumento da perda de vida útil, pode-se concluir através do presente trabalho que, quando o transformador é carregado com dispositivos geradores de harmônicos de corrente, suas perdas internas tornam-se muito maiores que no caso senoidal, aumentando muito sua temperatura de funcionamento e diminuindo a expectativa de vida do equipamento, podendo em alguns casos até provocar a combustão do óleo.

Não se pode deixar de registrar aqui que as condições simuladas são condições de operação extremas, onde toda a carga do transformador é não linear. Nos casos reais, as cargas aplicadas aos transformadores de distribuição são mistas, e muitas são lineares, de modo que no secundário as componentes harmônicas terão menores amplitudes do que as aqui consideradas.

Entretanto, se essa diminuição na expectativa de vida não for prevista adequadamente, pode ocorrer a queima do equipamento, o que traria transtornos tanto aos consumidores quanto a própria concessionária de energia.

Nos casos simulados duas soluções podem ser facilmente visualizadas, ou diminuir a carga no transformador, ou substituir o transformador por outro de maior potência.

Conclui-se portando que apesar dos grandes desenvolvimentos já ocorridos, pode-se facilmente encontrar lacunas ainda a serem pesquisadas quando se fala em qualidade de energia, principalmente tratando-se de harmônicas.

Entretanto, a crescente introdução de harmônicos nos sistemas de energia leva, cada vez mais à busca de dados comparativos, de modo que seja possível buscar soluções antes que isso se torne realmente um problema para as empresas e os consumidores de energia.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Junior, Augusto F. Brandão; "*Políticas de Instalação e Operação de Transformadores*"; Dissertação de Mestrado Apresentada à Escola Politécnica da USP; 1978.
- [2] Ahn, Se Uh; "*Política de Carregamento dos Transformadores de Distribuição*"; Dissertação de Mestrado Apresentada à Escola Politécnica da USP; 1993.
- [3] Jardini, José A., et al; "*Avaliação da Perda de Vida em Transformadores de Distribuição através da Análise de Cluster e de Redes Neurais*"; Nota Técnica do Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica; 1998.
- [4] Jardini, José A., Ahn, Se Uh; "*Curva de Carga de Consumidores Residenciais e de Respectivos Transformadores*"; Artigo Técnico do Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica; 1995.
- [5] Junior, Augusto F. Brandão; "*Aspectos Econômicos e Probabilísticos em Estudos de Instalação de Transformadores*"; Dissertação de Doutorado Apresentada à Escola Politécnica da USP; 1980.
- [6] Jardini, José A., et al; "*Comparação dos Resultados de Perda de Vida em Transformadores Usando curvas Estratificadas de Carga e a Função KVAS*"; Nota Técnico do Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica; 1995.
- [7] Blake, John H. e Kelly, Edward J.; "*Oil Immersed Power Transformer Overload Calculations by Computer*"; IEEE, vol.pas-88, nº 8, agosto 1969.
- [8] Delayba, A. C.; "*Comportamento de Transformadores com Cargas não Lineares: Uma Abordagem Analítica, Experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos*"; Dissertação de Doutorado Apresentada à Escola Politécnica da USP; 1997.
- [9] Domingues, E. G.; "*Uma contribuição à Modelagem de Transformadores Convencionais Utilizando o Simulador SABER*"; Dissertação de Mestrado Apresentada à Universidade Federal de Uberlândia; 1996.
- [10] Galli A. W., et al; "*Temperature Rise Small Oil-filled Distribution Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents*"; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, nº 1, Janeiro de 1996.
- [11] Bishop M. T., et al; "*Evaluating Harmonic Induced Transformer Heating*"; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, nº 1, Janeiro de 1996.
- [12] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas; "*Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência*"; NBR 5416, Dezembro de 1996.
- [13] ANSI/IEEE C57.110.1986; "*Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents*".
- [14] Oliveira, J. C. et al; "*Cargas Elétricas Especiais*"; Apostila editada pela Universidade Federal de Uberlândia; 1986.



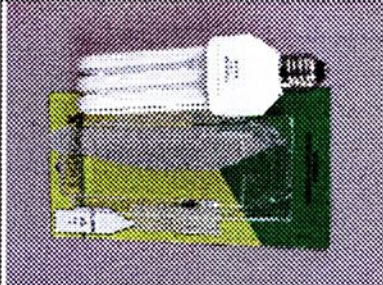
- [15] Montisinger, V.M et al; "Transformer Engineering - A treatise on Theory, Operation, and Application of Transformers"; Segunda edição
- [16] Jr Sanders, H.W. et al; "Distribution Transformer Winding Losses Due To Nonsinusoidal Currents"; vol PWRD-2, N 1, January 1987



Apêndice I

RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DOS DISPOSITIVOS DE ILUMINAÇÃO EFICIENTES

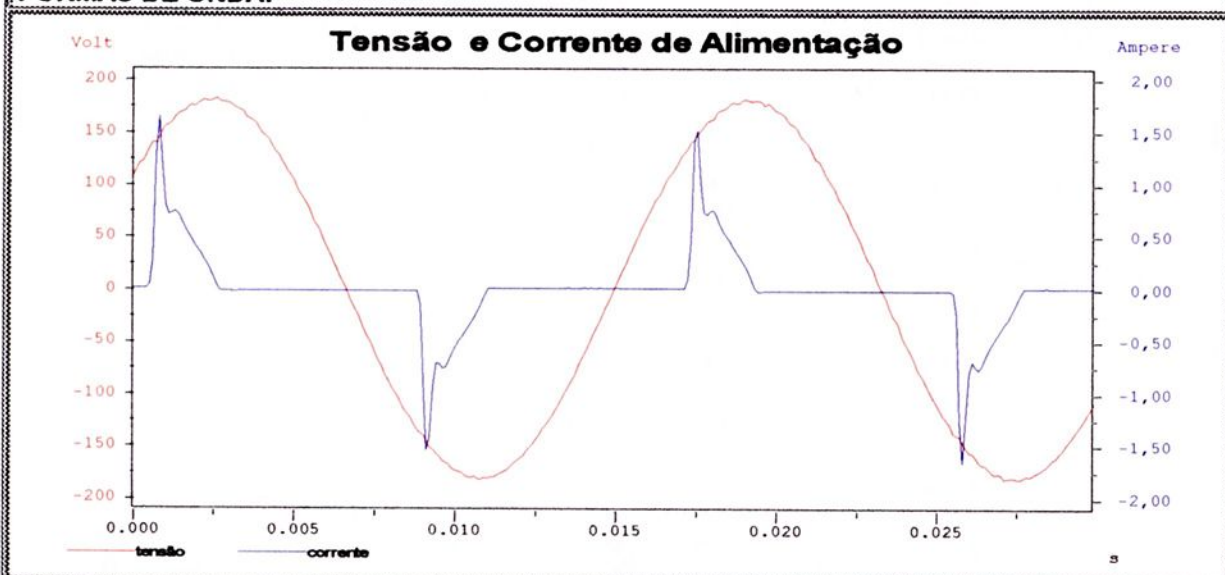


Fabricante	Lightex	Fator de Potência		
Origem		THD%		
Modelo		Luminosidade	0,6 Lm	
Tensão	127	Tonalidade de cor		
Frequência	60 Hz	Vida útil	8000 h	
Potência	27 W			

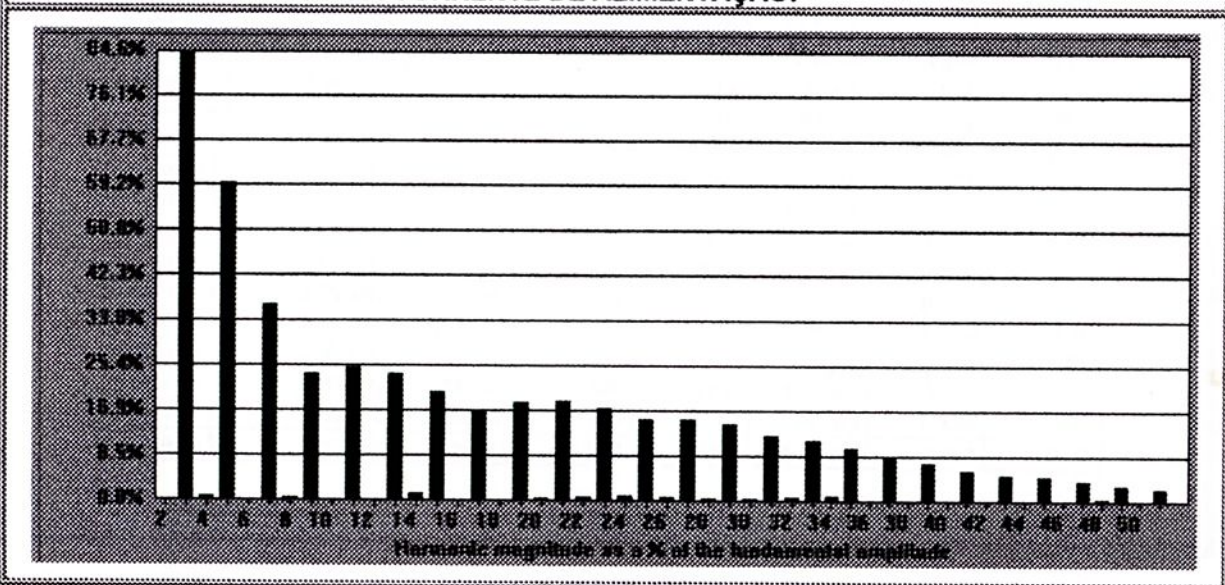
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

	Corrente	Tensão	Potência Ativa	25,8 W
Rms	0,38 A	127 V	Potência Aparente	47,7 VA
Pico	1,74 A	178 V	Potência Reativa	40,2 Var
THD	130,6 %	0,76 %	Fator de Potência (PF)	0,54
Fator de Crista	4,58	1,40	Cos ϕ (DPF)	0,87

FORMAS DE ONDA:

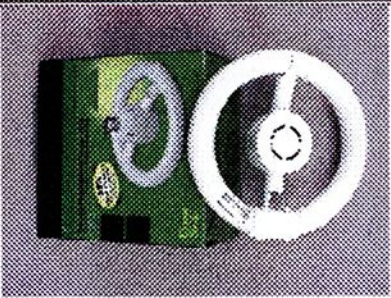


ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO:

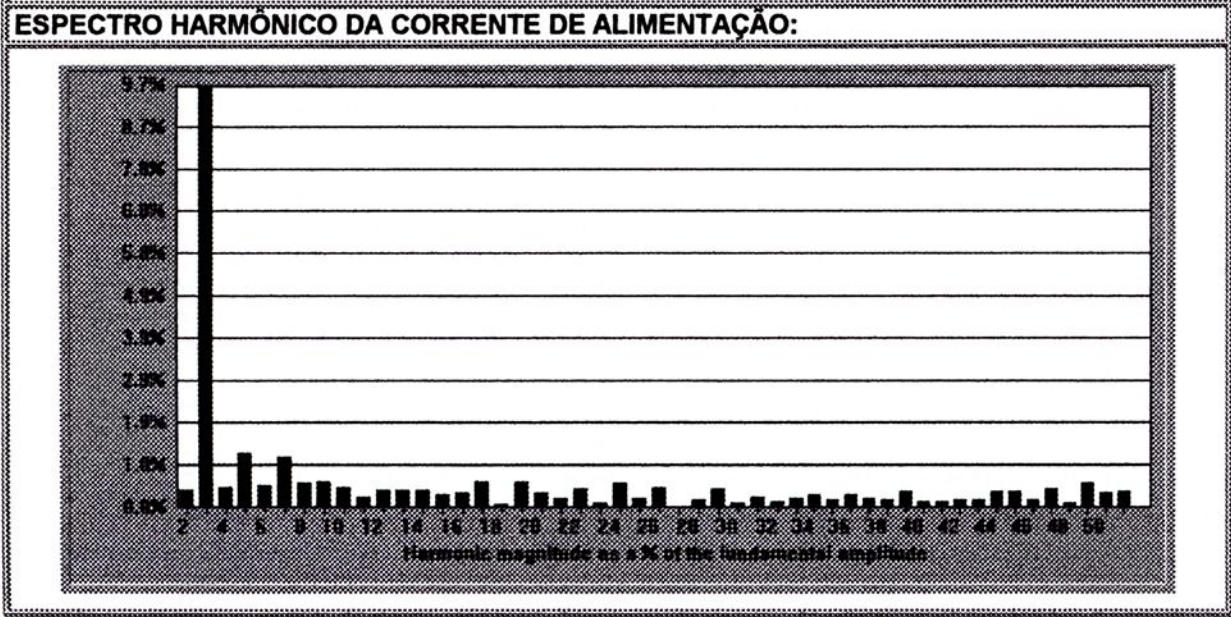
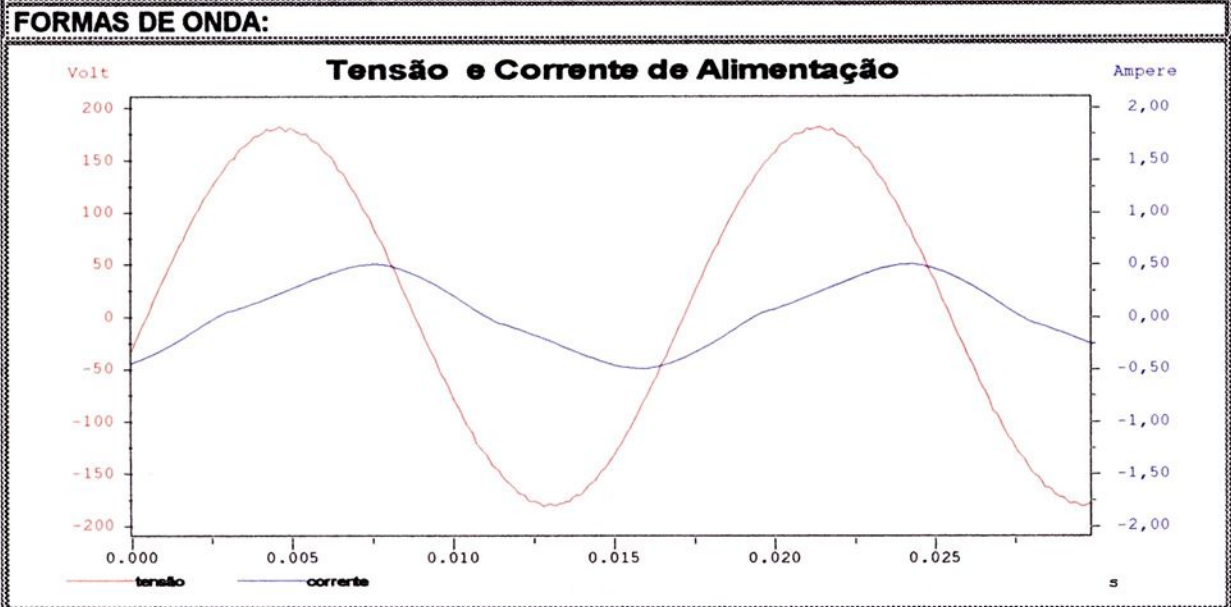


	Freq	Voltage RMS	Voltage % F	Voltage Phase	Current RMS	Current % F	Current Phase
Fundamental	59.9 Hz	127 V	100.00%	0.0	225 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	240 mV	0.19%	165	500 uA	0.22%	171
Harmonic 3	180 Hz	473 mV	0.37%	-123	190 mA	84.61%	159
Harmonic 4	240 Hz	192 mV	0.15%	-149	2.54 mA	1.13%	-35.4
Harmonic 5	299 Hz	143 mV	0.11%	-165	135 mA	60.04%	-19.3
Harmonic 6	359 Hz	187 mV	0.15%	-108	158 uA	0.07%	91.8
Harmonic 7	419 Hz	146 mV	0.11%	123	83.3 mA	37.03%	150
Harmonic 8	479 Hz	117 mV	0.09%	-152	1.3 mA	0.58%	-104
Harmonic 9	539 Hz	50 mV	0.04%	-147	54.3 mA	24.14%	-63
Harmonic 10	599 Hz	245 mV	0.19%	-166	571 uA	0.25%	-143
Harmonic 11	659 Hz	153 mV	0.12%	165	56.5 mA	25.13%	87.3
Harmonic 12	719 Hz	70.5 mV	0.06%	179	1.02 mA	0.45%	-7.31
Harmonic 13	778 Hz	42.2 mV	0.03%	-50	54.2 mA	24.09%	-107
Harmonic 14	839 Hz	17.4 mV	0.01%	66.8	3.24 mA	1.44%	69.7
Harmonic 15	898 Hz	81.5 mV	0.06%	-145	46.5 mA	20.68%	53.7
Harmonic 16	958 Hz	101 mV	0.08%	-178	1.04 mA	0.46%	-179
Harmonic 17	1.02 kHz	26.4 mV	0.02%	-161	39.1 mA	17.40%	-153
Harmonic 18	1.08 kHz	80 mV	0.06%	-112	513 uA	0.23%	83.5
Harmonic 19	1.14 kHz	93.3 mV	0.07%	131	42 mA	18.67%	4.84
Harmonic 20	1.2 kHz	145 mV	0.11%	146	1.74 mA	0.77%	172
Harmonic 21	1.26 kHz	86.3 mV	0.07%	70	43 mA	19.11%	168
Harmonic 22	1.32 kHz	78.4 mV	0.06%	54.2	2.02 mA	0.90%	-9.75
Harmonic 23	1.38 kHz	67.4 mV	0.05%	146	39.8 mA	17.69%	-24.5
Harmonic 24	1.44 kHz	50.9 mV	0.04%	89.8	2.64 mA	1.17%	-176
Harmonic 25	1.5 kHz	208 mV	0.16%	-111	35.1 mA	15.60%	136
Harmonic 26	1.56 kHz	44.8 mV	0.04%	-151	1.98 mA	0.88%	-23.6
Harmonic 27	1.62 kHz	31.6 mV	0.02%	-81.9	35 mA	15.55%	-63.2
Harmonic 28	1.68 kHz	65.2 mV	0.05%	159	1.39 mA	0.62%	90.2
Harmonic 29	1.74 kHz	99.9 mV	0.08%	90.4	33.2 mA	14.77%	100
Harmonic 30	1.8 kHz	56.8 mV	0.04%	-102	1.38 mA	0.61%	-69.3
Harmonic 31	1.86 kHz	109 mV	0.09%	-147	28.4 mA	12.63%	-92.1
Harmonic 32	1.92 kHz	83.3 mV	0.07%	173	2.14 mA	0.95%	34.2
Harmonic 33	1.98 kHz	209 mV	0.16%	170	26.4 mA	11.76%	72.1
Harmonic 34	2.04 kHz	115 mV	0.09%	-99.9	2.54 mA	1.13%	-95.3
Harmonic 35	2.1 kHz	48.3 mV	0.04%	13.8	23.3 mA	10.38%	-126
Harmonic 36	2.16 kHz	94.5 mV	0.07%	-110	1.24 mA	0.55%	67.8
Harmonic 37	2.22 kHz	141 mV	0.11%	-170	19.6 mA	8.71%	39.1
Harmonic 38	2.28 kHz	22.2 mV	0.02%	24	759 uA	0.34%	-113
Harmonic 39	2.34 kHz	51.9 mV	0.04%	-116	17 mA	7.56%	-153
Harmonic 40	2.4 kHz	32.5 mV	0.03%	-119	588 uA	0.26%	89.6
Harmonic 41	2.46 kHz	168 mV	0.13%	-3.12	13.6 mA	6.04%	2.84
Harmonic 42	2.51 kHz	22.4 mV	0.02%	-148	1.02 mA	0.46%	-134
Harmonic 43	2.57 kHz	35.7 mV	0.03%	96.7	11.8 mA	5.26%	161
Harmonic 44	2.63 kHz	53.4 mV	0.04%	-94.8	1.21 mA	0.54%	-116
Harmonic 45	2.69 kHz	136 mV	0.11%	-86.7	10.9 mA	4.84%	-33.6
Harmonic 46	2.75 kHz	47.7 mV	0.04%	147	741 uA	0.33%	130
Harmonic 47	2.81 kHz	88.6 mV	0.07%	-23.8	9.41 mA	4.18%	131
Harmonic 48	2.87 kHz	73 mV	0.06%	-12.5	1.45 mA	0.64%	-108
Harmonic 49	2.93 kHz	256 mV	0.20%	57.2	7.36 mA	3.27%	-71.5
Harmonic 50	2.99 kHz	125 mV	0.10%	62.5	983 uA	0.44%	-34.6
Harmonic 51	3.05 kHz	136 mV	0.11%	-151	6.03 mA	2.68%	93.9

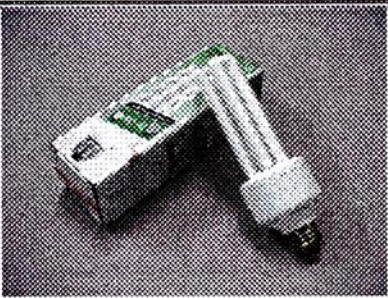
Fabricante	Philips	Fator de Potência	
Origem		THD%	
Modelo		Luminosidade	
Tensão	127 V	Tonalidade de cor	Luz do dia
Frequência	50/60 Hz	Vida útil	10.000 h
Potência	26 W		



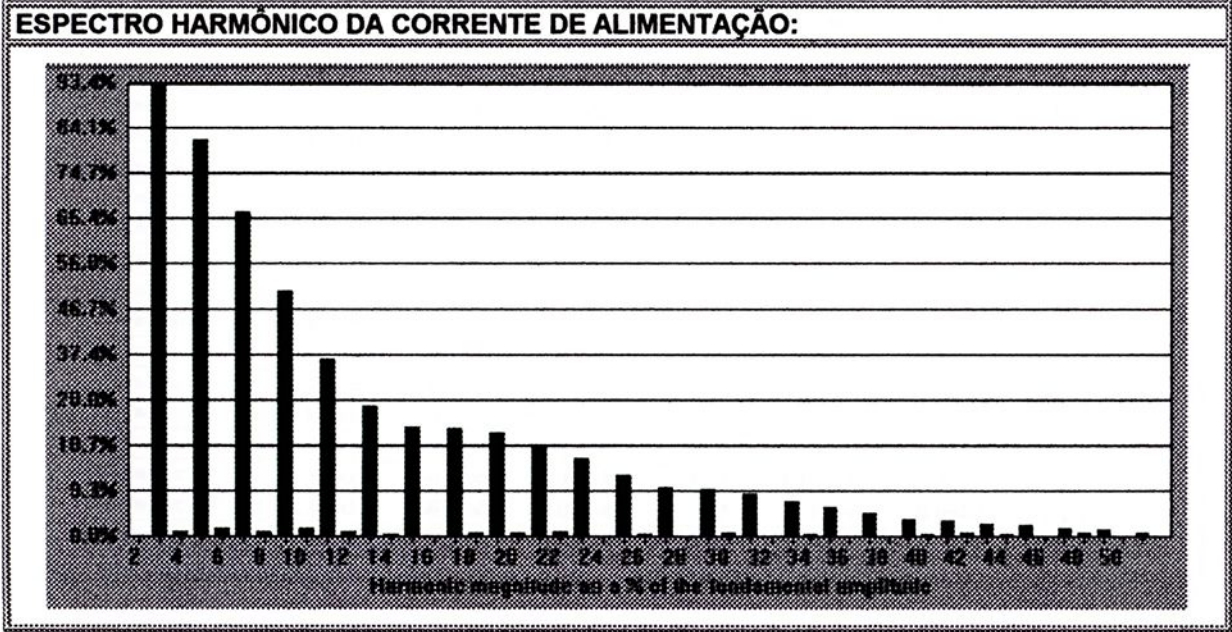
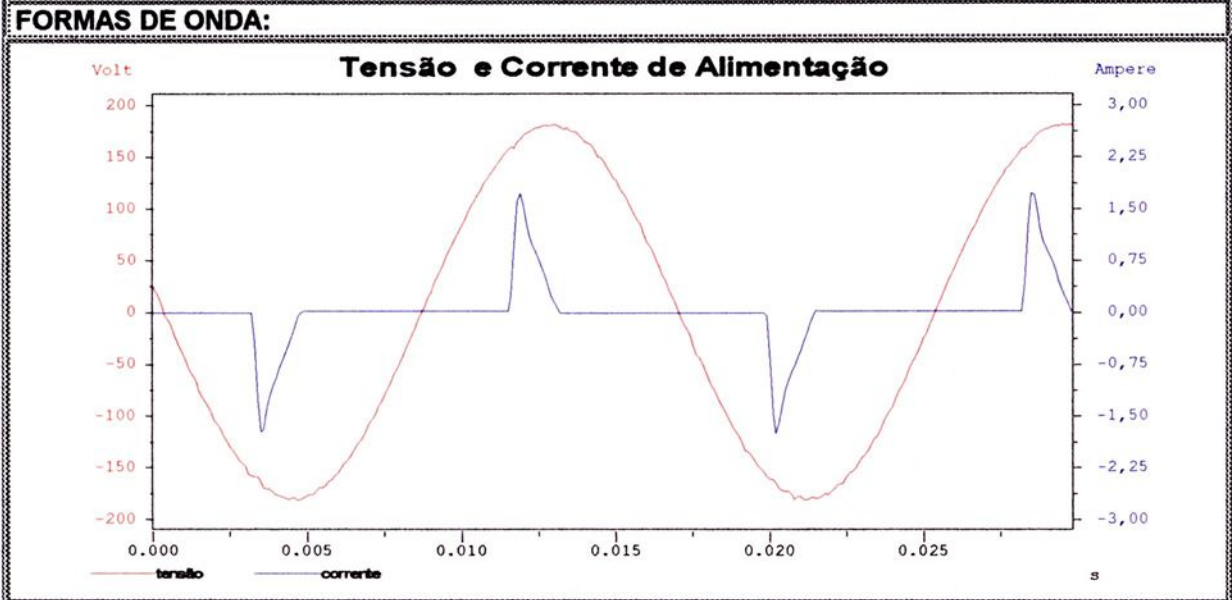
RESULTADOS EXPERIMENTAIS					
	Corrente	Tensão	Potência Ativa	24,10 W	
Rms	0,34 A	127 V	Potência Aparente	42,70 VA	
Pico	0,50 A	178 V	Potência Reativa	35,20 Var	
THD	10,22 %	0,67 %	Fator de Potência (PF)	0,57	
Fator de Crista	1,47	1,40	Cos ϕ (DPF)	0,56	



	Freq	Voltage RMS	Voltage % F	Voltage Phase	Current RMS	Current % F	Current Phase
Fundamental	59.9 Hz	127 V	100.00%	0.0	332 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	318 mV	0.25%	-172	1.51 mA	0.45%	1.96
Harmonic 3	180 Hz	352 mV	0.28%	-114	32.3 mA	9.72%	-76.1
Harmonic 4	240 Hz	61.5 mV	0.05%	-95	1.67 mA	0.50%	28.3
Harmonic 5	299 Hz	177 mV	0.14%	152	4.24 mA	1.28%	-41.4
Harmonic 6	359 Hz	82.9 mV	0.07%	155	1.77 mA	0.53%	-8.83
Harmonic 7	419 Hz	126 mV	0.10%	-160	3.93 mA	1.18%	-53.8
Harmonic 8	479 Hz	116 mV	0.09%	-139	1.98 mA	0.60%	-127
Harmonic 9	539 Hz	48.9 mV	0.04%	-143	2.05 mA	0.62%	-129
Harmonic 10	599 Hz	118 mV	0.09%	-14.5	1.64 mA	0.49%	74.3
Harmonic 11	659 Hz	115 mV	0.09%	-171	888 uA	0.27%	-85.5
Harmonic 12	719 Hz	120 mV	0.09%	132	1.47 mA	0.44%	-148
Harmonic 13	778 Hz	8.37 mV	0.01%	118	1.41 mA	0.42%	-29.4
Harmonic 14	838 Hz	147 mV	0.12%	142	1.4 mA	0.42%	113
Harmonic 15	898 Hz	136 mV	0.11%	-179	1.16 mA	0.35%	-12.7
Harmonic 16	958 Hz	70.9 mV	0.06%	-119	1.28 mA	0.39%	-92.7
Harmonic 17	1.02 kHz	81 mV	0.06%	97.2	2.06 mA	0.62%	-140
Harmonic 18	1.08 kHz	99.4 mV	0.08%	141	378 uA	0.11%	52.9
Harmonic 19	1.14 kHz	124 mV	0.10%	-153	2.09 mA	0.63%	-109
Harmonic 20	1.2 kHz	139 mV	0.11%	-130	1.23 mA	0.37%	75.5
Harmonic 21	1.26 kHz	18.6 mV	0.01%	-172	784 uA	0.24%	-1.88
Harmonic 22	1.32 kHz	69.4 mV	0.05%	134	1.52 mA	0.46%	22.1
Harmonic 23	1.38 kHz	17.6 mV	0.01%	-173	505 uA	0.15%	-162
Harmonic 24	1.44 kHz	114 mV	0.09%	-165	2.04 mA	0.61%	-55.4
Harmonic 25	1.5 kHz	52.6 mV	0.04%	-162	772 uA	0.23%	-66.3
Harmonic 26	1.56 kHz	126 mV	0.10%	40.4	1.68 mA	0.50%	8.35
Harmonic 27	1.62 kHz	130 mV	0.10%	37.5	53.6 uA	0.02%	170
Harmonic 28	1.68 kHz	24.1 mV	0.02%	99	669 uA	0.20%	-120
Harmonic 29	1.74 kHz	67.8 mV	0.05%	-150	1.59 mA	0.48%	-86.4
Harmonic 30	1.8 kHz	162 mV	0.13%	371 m	517 uA	0.16%	50.2
Harmonic 31	1.86 kHz	132 mV	0.10%	71.2	899 uA	0.27%	158
Harmonic 32	1.92 kHz	65.1 mV	0.05%	-179	568 uA	0.17%	136
Harmonic 33	1.98 kHz	147 mV	0.12%	129	753 uA	0.23%	-75.5
Harmonic 34	2.04 kHz	38 mV	0.03%	7.07	1.13 mA	0.34%	-76.3
Harmonic 35	2.1 kHz	43.7 mV	0.03%	-177	664 uA	0.20%	81.2
Harmonic 36	2.16 kHz	80.6 mV	0.06%	-52.2	1.11 mA	0.34%	111
Harmonic 37	2.22 kHz	94.4 mV	0.07%	150	759 uA	0.23%	-26.7
Harmonic 38	2.28 kHz	143 mV	0.11%	165	661 uA	0.20%	-95.8
Harmonic 39	2.34 kHz	31.6 mV	0.02%	-43.5	1.31 mA	0.39%	-116
Harmonic 40	2.4 kHz	107 mV	0.08%	154	576 uA	0.17%	34.2
Harmonic 41	2.46 kHz	132 mV	0.10%	-84.3	632 uA	0.19%	165
Harmonic 42	2.51 kHz	86 mV	0.07%	42.8	738 uA	0.22%	41.8
Harmonic 43	2.57 kHz	44.3 mV	0.03%	-166	676 uA	0.20%	-57.9
Harmonic 44	2.63 kHz	83.8 mV	0.07%	-10.1	1.31 mA	0.40%	-108
Harmonic 45	2.69 kHz	62 mV	0.05%	-65.9	1.33 mA	0.40%	1.54
Harmonic 46	2.75 kHz	91.2 mV	0.07%	63.1	750 uA	0.23%	140
Harmonic 47	2.81 kHz	25.2 mV	0.02%	-144	1.58 mA	0.48%	7.76
Harmonic 48	2.87 kHz	168 mV	0.13%	178	508 uA	0.15%	155
Harmonic 49	2.93 kHz	113 mV	0.09%	6.02	1.98 mA	0.60%	157
Harmonic 50	2.99 kHz	108 mV	0.09%	134	1.27 mA	0.38%	-50.3
Harmonic 51	3.05 kHz	41.8 mV	0.03%	-105	1.39 mA	0.42%	27.4

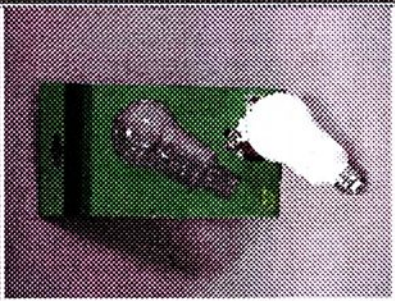
Fabricante	Osram	Fator de Potência	$\geq 0,5$	
Origem		THD%		
Modelo		Luminosidade	1500 Lm	
Tensão	120 V	Tonalidade de cor	COR 21	
Frequência	60 Hz	Vida útil	10000h	
Potência	23 W			

RESULTADOS EXPERIMENTAIS				
	Corrente	Tensão	Potência Ativa	27,0 W
Rms	0,42 A	128 V	Potência Aparente	53,6 VA
Pico	1,76 A	180 V	Potência Reativa	46,3 Var
THD	165,75 %	0,69 %	Fator de Potência (PF)	0,50
Fator de Crista	4,19	1,41	Cos ϕ (DPF)	0,95



	Freq	Voltage RMS	Voltage %F	Voltage Phase	Current RMS	Current %F	Current Phase
Fundamental	59.9 Hz	127 V	100.00%	0.0	214 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	330 mV	0.26%	-176	1.15 mA	0.54%	98.9
Harmonic 3	180 Hz	533 mV	0.42%	-102	200 mA	93.41%	169
Harmonic 4	240 Hz	122 mV	0.10%	-169	3.03 mA	1.42%	-32.4
Harmonic 5	299 Hz	68.5 mV	0.05%	161	176 mA	82.00%	-5.82
Harmonic 6	359 Hz	80.4 mV	0.06%	-129	4.62 mA	2.16%	-174
Harmonic 7	419 Hz	284 mV	0.22%	-164	144 mA	67.19%	177
Harmonic 8	479 Hz	60.8 mV	0.05%	132	3.16 mA	1.48%	16.4
Harmonic 9	539 Hz	108 mV	0.09%	-41	109 mA	50.98%	-2.85
Harmonic 10	599 Hz	94.5 mV	0.07%	-81	4.44 mA	2.08%	151
Harmonic 11	659 Hz	111 mV	0.09%	106	78.7 mA	36.77%	170
Harmonic 12	719 Hz	24.9 mV	0.02%	82.1	2.8 mA	1.31%	-15.2
Harmonic 13	778 Hz	100 mV	0.08%	135	58.6 mA	27.39%	-23.7
Harmonic 14	838 Hz	84.3 mV	0.07%	160	1.8 mA	0.84%	-165
Harmonic 15	898 Hz	22.2 mV	0.02%	134	49.3 mA	23.03%	138
Harmonic 16	958 Hz	73.3 mV	0.06%	125	943 uA	0.44%	-95.9
Harmonic 17	1.02 kHz	98.6 mV	0.08%	115	48.1 mA	22.45%	-59
Harmonic 18	1.08 kHz	94.7 mV	0.07%	-133	2.61 mA	1.22%	114
Harmonic 19	1.14 kHz	41.4 mV	0.03%	-90.2	46.6 mA	21.78%	112
Harmonic 20	1.2 kHz	50.4 mV	0.04%	-157	2.15 mA	1.01%	-102
Harmonic 21	1.26 kHz	96.5 mV	0.08%	26.2	40.7 mA	19.01%	-75
Harmonic 22	1.32 kHz	77 mV	0.06%	57.8	3.24 mA	1.51%	106
Harmonic 23	1.38 kHz	142 mV	0.11%	-177	34.9 mA	16.32%	98.7
Harmonic 24	1.44 kHz	49.7 mV	0.04%	-10.3	1.31 mA	0.61%	-75.1
Harmonic 25	1.5 kHz	87 mV	0.07%	-75.5	27.8 mA	13.00%	-92.9
Harmonic 26	1.56 kHz	32 mV	0.03%	-38.6	1.51 mA	0.71%	109
Harmonic 27	1.62 kHz	122 mV	0.10%	56.5	22.5 mA	10.50%	71.3
Harmonic 28	1.68 kHz	58.3 mV	0.05%	179	1.15 mA	0.54%	-51.3
Harmonic 29	1.74 kHz	53.3 mV	0.04%	-152	21.9 mA	10.24%	-122
Harmonic 30	1.8 kHz	83.4 mV	0.07%	-74.2	2.11 mA	0.98%	33.7
Harmonic 31	1.86 kHz	27.7 mV	0.02%	23 m	20 mA	9.33%	48.6
Harmonic 32	1.92 kHz	32.8 mV	0.03%	-65.1	1.24 mA	0.58%	-12.3
Harmonic 33	1.98 kHz	108 mV	0.08%	152	16 mA	7.48%	-139
Harmonic 34	2.04 kHz	83.5 mV	0.07%	-145	1.46 mA	0.68%	88.7
Harmonic 35	2.1 kHz	120 mV	0.09%	146	13.4 mA	6.24%	28.6
Harmonic 36	2.16 kHz	39.3 mV	0.03%	-82.5	1.01 mA	0.47%	-91.5
Harmonic 37	2.22 kHz	55.8 mV	0.04%	103	10.8 mA	5.03%	-159
Harmonic 38	2.28 kHz	99 mV	0.08%	-13	1.18 mA	0.55%	7.4
Harmonic 39	2.34 kHz	57.4 mV	0.05%	56.5	8.11 mA	3.79%	-1.85
Harmonic 40	2.4 kHz	73.6 mV	0.06%	-175	1.71 mA	0.80%	-145
Harmonic 41	2.46 kHz	46.1 mV	0.04%	-85.5	7.42 mA	3.47%	160
Harmonic 42	2.51 kHz	55.2 mV	0.04%	45.9	2.44 mA	1.14%	-14.4
Harmonic 43	2.57 kHz	104 mV	0.08%	87.1	6.15 mA	2.87%	-29.6
Harmonic 44	2.63 kHz	116 mV	0.09%	-2.1	1.34 mA	0.63%	179
Harmonic 45	2.69 kHz	89.5 mV	0.07%	-106	5.77 mA	2.70%	114
Harmonic 46	2.75 kHz	84.6 mV	0.07%	76	1.23 mA	0.57%	160
Harmonic 47	2.81 kHz	69.1 mV	0.05%	-147	4.24 mA	1.98%	-54.5
Harmonic 48	2.87 kHz	21.7 mV	0.02%	107	2.37 mA	1.11%	-45.2
Harmonic 49	2.93 kHz	66.1 mV	0.05%	34.3	3.79 mA	1.77%	102
Harmonic 50	2.99 kHz	66.8 mV	0.05%	59	1.17 mA	0.55%	89.8
Harmonic 51	3.05 kHz	72.5 mV	0.06%	-30.6	2.48 mA	1.16%	-111

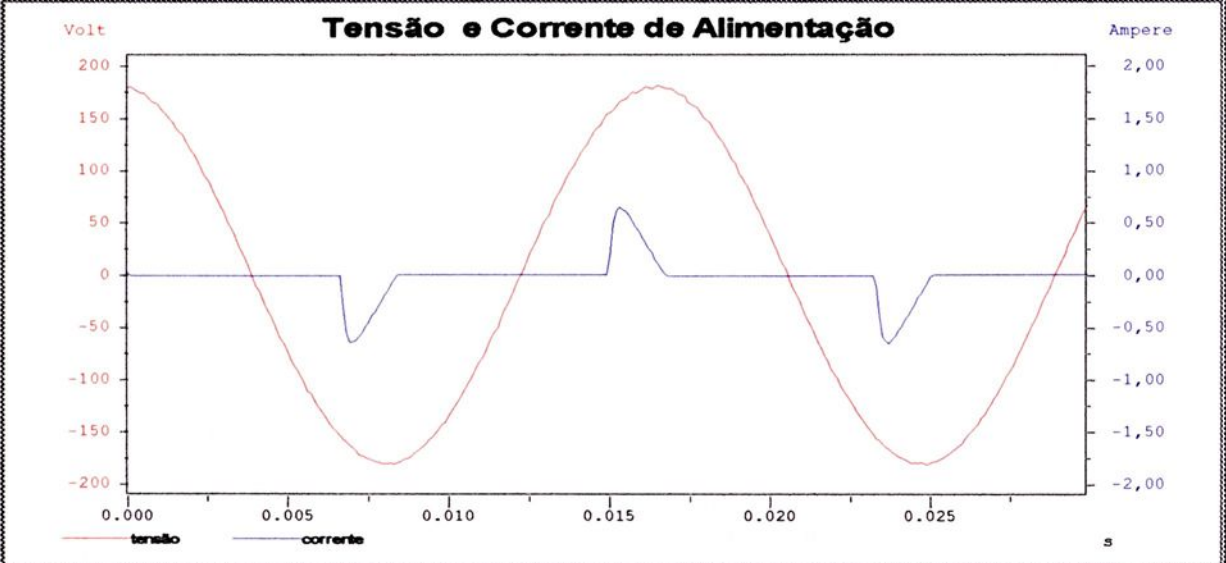
Fabricante	Philips	Fator de Potência	
Origem		THD%	
Modelo		Luminosidade	
Tensão	110-120V	Tonalidade de cor	Luz Suave
Frequência	50/60 Hz	Vida útil	5840 h
Potência	16 W		



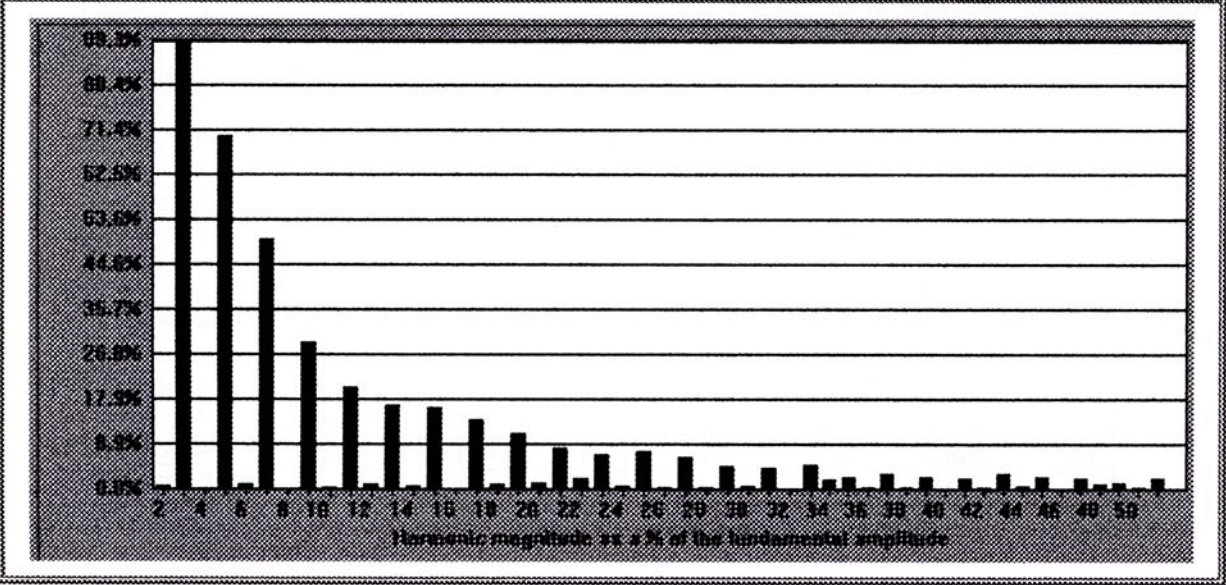
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

	Corrente	Tensão	Potência Ativa	16,40 W
Rms	0,23 A	127 V	Potência Aparente	29,30 VA
Pico	0,70 A	178 V	Potência Reativa	24,30 Var
THD	134,47 %	0,61 %	Fator de Potência (PF)	0,56
Fator de Crista	3,04	1,40	Cos ϕ (DPF)	0,92

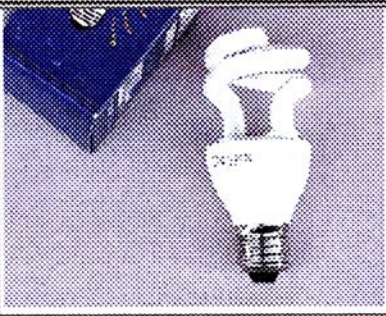
FORMAS DE ONDA:



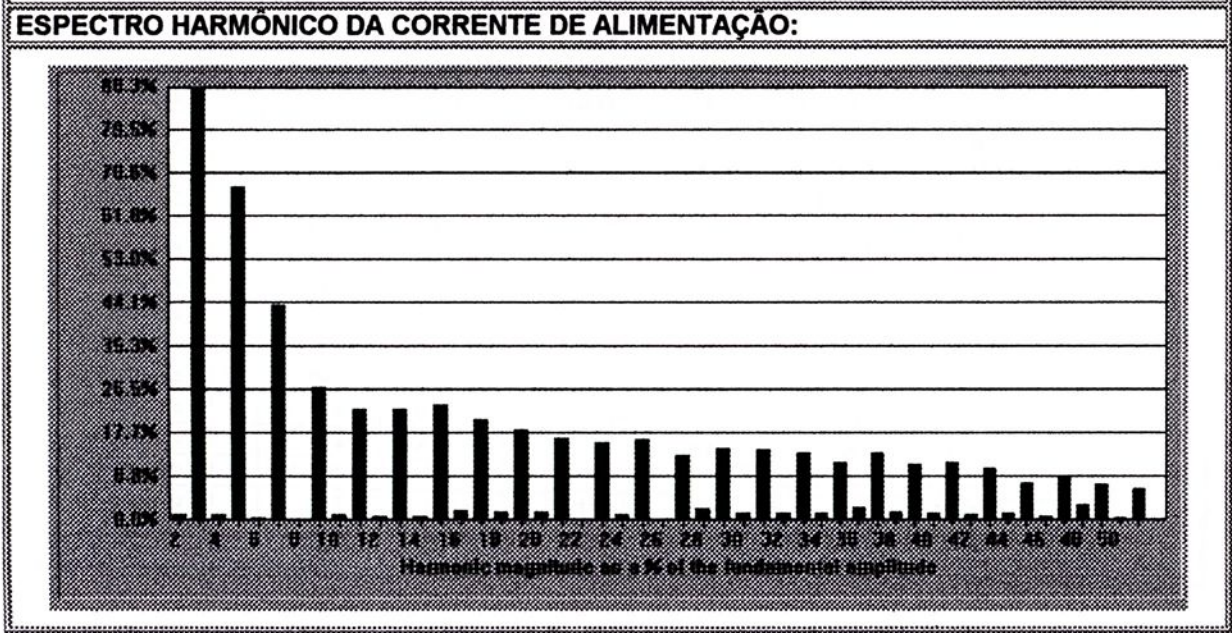
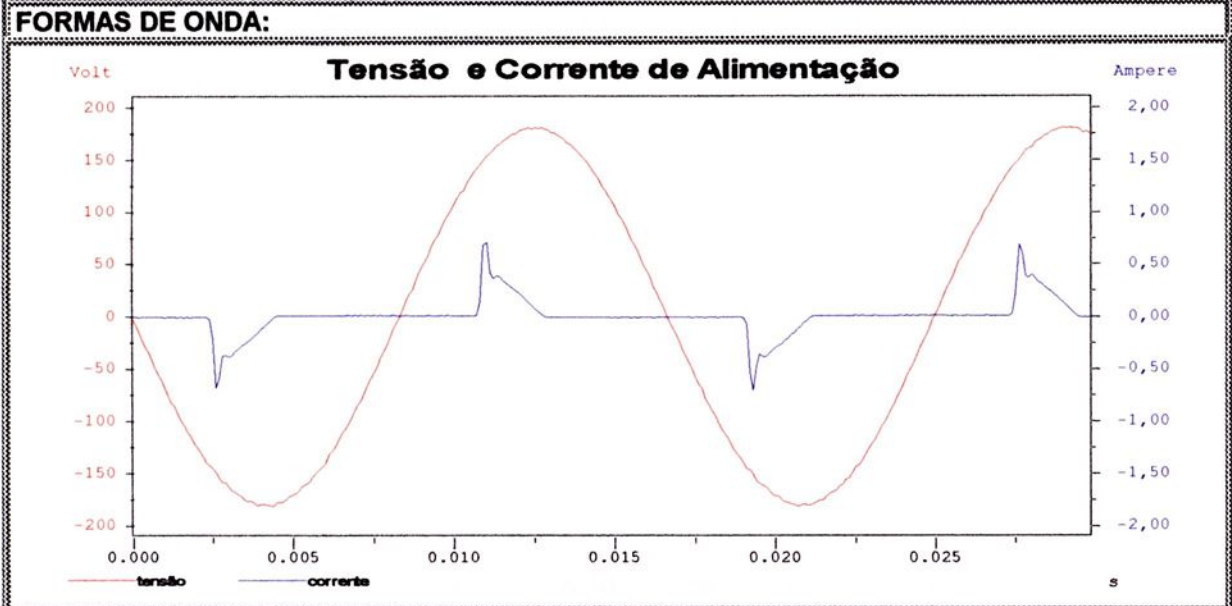
ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO:



	Freq	Voltage RMS	Voltage % F	Voltage Phase	Current RMS	Current % F	Current Phase
Fundamental	60 Hz	127 V	100.00%	0.0	136 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	81.4 mV	0.06%	88	1.49 mA	1.10%	171
Harmonic 3	180 Hz	319 mV	0.25%	-99.5	121 mA	89.29%	164
Harmonic 4	240 Hz	211 mV	0.17%	-120	679 uA	0.50%	85.2
Harmonic 5	300 Hz	110 mV	0.09%	-104	96 mA	70.77%	-12.1
Harmonic 6	360 Hz	26 mV	0.02%	-155	1.7 mA	1.25%	158
Harmonic 7	420 Hz	82.2 mV	0.06%	151	67.9 mA	50.05%	167
Harmonic 8	480 Hz	57.3 mV	0.05%	110	555 uA	0.41%	177
Harmonic 9	540 Hz	47.7 mV	0.04%	-55	40 mA	29.51%	-21.2
Harmonic 10	600 Hz	122 mV	0.10%	120	1.08 mA	0.80%	70.8
Harmonic 11	660 Hz	80.5 mV	0.06%	116	28.1 mA	20.75%	129
Harmonic 12	720 Hz	112 mV	0.09%	128	1.72 mA	1.27%	147
Harmonic 13	780 Hz	116 mV	0.09%	-168	23.3 mA	17.14%	-81.1
Harmonic 14	840 Hz	29.5 mV	0.02%	88.8	1.25 mA	0.92%	74.8
Harmonic 15	900 Hz	101 mV	0.08%	-121	22.2 mA	16.39%	84.3
Harmonic 16	960 Hz	52.2 mV	0.04%	-115	595 uA	0.44%	-30.1
Harmonic 17	1.02 kHz	28 mV	0.02%	-43.5	19.2 mA	14.12%	-111
Harmonic 18	1.08 kHz	190 mV	0.15%	-81.9	1.94 mA	1.43%	56.8
Harmonic 19	1.14 kHz	152 mV	0.12%	157	15.4 mA	11.38%	47.2
Harmonic 20	1.2 kHz	167 mV	0.13%	95.5	2.32 mA	1.71%	-53.3
Harmonic 21	1.26 kHz	142 mV	0.11%	-113	11.6 mA	8.58%	-161
Harmonic 22	1.32 kHz	132 mV	0.10%	143	3.43 mA	2.53%	-59.9
Harmonic 23	1.38 kHz	46.2 mV	0.04%	-87.3	9.72 mA	7.17%	-7.44
Harmonic 24	1.44 kHz	29.4 mV	0.02%	57.2	1.58 mA	1.16%	90.5
Harmonic 25	1.5 kHz	14 mV	0.01%	-63.1	10.5 mA	7.77%	158
Harmonic 26	1.56 kHz	200 mV	0.16%	57.1	1.18 mA	0.87%	10.8
Harmonic 27	1.62 kHz	101 mV	0.08%	-39.7	9.27 mA	6.83%	-47.2
Harmonic 28	1.68 kHz	62.4 mV	0.05%	-22.9	882 uA	0.65%	136
Harmonic 29	1.74 kHz	152 mV	0.12%	-125	6.61 mA	4.87%	121
Harmonic 30	1.8 kHz	63.2 mV	0.05%	49.6	1.27 mA	0.94%	41.5
Harmonic 31	1.86 kHz	54.4 mV	0.04%	-155	6.3 mA	4.65%	-87
Harmonic 32	1.92 kHz	198 mV	0.16%	-174	522 uA	0.38%	-6.12
Harmonic 33	1.98 kHz	42.4 mV	0.03%	144	7.02 mA	5.18%	67.1
Harmonic 34	2.04 kHz	71.9 mV	0.06%	178	2.98 mA	2.19%	-119
Harmonic 35	2.1 kHz	40.8 mV	0.03%	94.5	3.65 mA	2.69%	-157
Harmonic 36	2.16 kHz	104 mV	0.08%	82.7	859 uA	0.63%	149
Harmonic 37	2.22 kHz	43.1 mV	0.03%	77.3	4.57 mA	3.37%	45.8
Harmonic 38	2.28 kHz	29 mV	0.02%	25.8	1.16 mA	0.85%	-75.8
Harmonic 39	2.34 kHz	53.5 mV	0.04%	159	3.67 mA	2.71%	153
Harmonic 40	2.4 kHz	145 mV	0.11%	-136	564 uA	0.42%	94.5
Harmonic 41	2.46 kHz	38.5 mV	0.03%	-34.7	3.37 mA	2.49%	-55
Harmonic 42	2.52 kHz	92.3 mV	0.07%	-179	1.11 mA	0.82%	46.1
Harmonic 43	2.58 kHz	41.9 mV	0.03%	54.6	4.51 mA	3.32%	128
Harmonic 44	2.64 kHz	55.1 mV	0.04%	43.1	1.37 mA	1.01%	-103
Harmonic 45	2.7 kHz	119 mV	0.09%	437 m	3.96 mA	2.92%	-64.7
Harmonic 46	2.76 kHz	66.1 mV	0.05%	42.5	454 uA	0.33%	95.9
Harmonic 47	2.82 kHz	79.1 mV	0.06%	-174	3.29 mA	2.42%	71.9
Harmonic 48	2.88 kHz	26.1 mV	0.02%	2.49	1.62 mA	1.20%	-113
Harmonic 49	2.94 kHz	135 mV	0.11%	72.1	2.04 mA	1.50%	-125
Harmonic 50	3 kHz	115 mV	0.09%	109	1.17 mA	0.87%	131
Harmonic 51	3.06 kHz	27.9 mV	0.02%	-9.59	3.49 mA	2.57%	8.6

Fabricante	Golden Plus	Fator de Potência	$\geq 0,5$	
Origem		THD%		
Modelo	Espiral	Luminosidade	660 Lumen	
Tensão	130 V	Tonalidade de cor	Luz do dia	
Frequência	60 Hz	Vida útil	8000 h	
Potência	11 W			

RESULTADOS EXPERIMENTAIS				
	Corrente	Tensão	Potência Ativa	10,80 W
Rms	0,16 A	127 V	Potência Aparente	21,10 VA
Pico	0,70 A	178 V	Potência Reativa	18,10 Var
THD	142,1 %	0,64 %	Fator de Potência (PF)	0.51
Fator de Crista	4,37	1,40	Cos ϕ (DPF)	0,89



Componentes Harmônicas da Tensão e Corrente de Alimentação

Ref: Lâmpada Espiral 11w/130V – Golden Plus

	Freq	Voltage RMS	Voltage % F	Voltage Phase	Current RMS	Current % F	Current Phase
Fundamental	60 Hz	127 V	100.00%	0.0	90.5 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	108 mV	0.08%	-176	1.17 mA	1.29%	-65.4
Harmonic 3	180 Hz	349 mV	0.27%	-87	79.9 mA	88.29%	167
Harmonic 4	240 Hz	149 mV	0.12%	-88.2	1.09 mA	1.21%	41.2
Harmonic 5	300 Hz	6.83 mV	0.01%	-51.6	61.8 mA	68.25%	-4.24
Harmonic 6	360 Hz	45.5 mV	0.04%	116	560 uA	0.62%	118
Harmonic 7	420 Hz	115 mV	0.09%	126	39.8 mA	43.98%	174
Harmonic 8	480 Hz	48.9 mV	0.04%	-174	409 uA	0.45%	-85.7
Harmonic 9	540 Hz	118 mV	0.09%	105	24.7 mA	27.29%	-24.4
Harmonic 10	600 Hz	221 mV	0.17%	152	1.31 mA	1.44%	94.3
Harmonic 11	660 Hz	29.2 mV	0.02%	-19.1	20.6 mA	22.76%	130
Harmonic 12	720 Hz	52.4 mV	0.04%	-105	943 uA	1.04%	-76.3
Harmonic 13	780 Hz	152 mV	0.12%	-19.9	20.8 mA	22.94%	-68
Harmonic 14	840 Hz	134 mV	0.11%	-112	961 uA	1.06%	-50.7
Harmonic 15	900 Hz	108 mV	0.09%	-175	21.5 mA	23.78%	100
Harmonic 16	960 Hz	39.3 mV	0.03%	-125	2.1 mA	2.32%	-65.4
Harmonic 17	1.02 kHz	65.2 mV	0.05%	-52.4	18.6 mA	20.60%	-93.2
Harmonic 18	1.08 kHz	44.3 mV	0.03%	128	1.75 mA	1.93%	127
Harmonic 19	1.14 kHz	43.4 mV	0.03%	167	17 mA	18.75%	66.6
Harmonic 20	1.2 kHz	52.6 mV	0.04%	172	1.61 mA	1.78%	-66.4
Harmonic 21	1.26 kHz	81.9 mV	0.06%	-136	15.4 mA	16.97%	-126
Harmonic 22	1.32 kHz	83.8 mV	0.07%	108	218 uA	0.24%	32.1
Harmonic 23	1.38 kHz	168 mV	0.13%	-111	14.6 mA	16.17%	42.5
Harmonic 24	1.44 kHz	75.3 mV	0.06%	5.14	1.09 mA	1.21%	113
Harmonic 25	1.5 kHz	41.6 mV	0.03%	-34.4	15.1 mA	16.72%	-157
Harmonic 26	1.56 kHz	242 mV	0.19%	-107	314 uA	0.35%	-143
Harmonic 27	1.62 kHz	12.6 mV	0.01%	109	12 mA	13.31%	14.1
Harmonic 28	1.68 kHz	9.47 mV	0.01%	-117	2.35 mA	2.60%	177
Harmonic 29	1.74 kHz	209 mV	0.16%	-48.7	13.4 mA	14.79%	-172
Harmonic 30	1.8 kHz	153 mV	0.12%	-161	1.48 mA	1.63%	31.8
Harmonic 31	1.86 kHz	123 mV	0.10%	35.6	13.1 mA	14.46%	-10.2
Harmonic 32	1.92 kHz	104 mV	0.08%	-146	1.58 mA	1.74%	136
Harmonic 33	1.98 kHz	129 mV	0.10%	50.8	12.6 mA	13.97%	163
Harmonic 34	2.04 kHz	67.3 mV	0.05%	25.6	1.59 mA	1.76%	23.5
Harmonic 35	2.1 kHz	51.7 mV	0.04%	166	10.7 mA	11.88%	-39.6
Harmonic 36	2.16 kHz	132 mV	0.10%	-86.7	2.55 mA	2.82%	115
Harmonic 37	2.22 kHz	50.5 mV	0.04%	24.3	12.5 mA	13.84%	132
Harmonic 38	2.28 kHz	83.3 mV	0.07%	-166	1.77 mA	1.95%	-83.3
Harmonic 39	2.34 kHz	66.6 mV	0.05%	115	10.6 mA	11.76%	-55.6
Harmonic 40	2.4 kHz	94.6 mV	0.07%	139	1.34 mA	1.48%	122
Harmonic 41	2.46 kHz	70.1 mV	0.06%	79.7	10.8 mA	11.90%	113
Harmonic 42	2.52 kHz	45.3 mV	0.04%	-114	1.1 mA	1.21%	-138
Harmonic 43	2.58 kHz	106 mV	0.08%	35.8	9.78 mA	10.81%	-84.7
Harmonic 44	2.64 kHz	115 mV	0.09%	-30.2	1.52 mA	1.68%	70.7
Harmonic 45	2.7 kHz	96.7 mV	0.08%	-49.5	7.18 mA	7.94%	100
Harmonic 46	2.76 kHz	125 mV	0.10%	60.1	944 uA	1.04%	-178
Harmonic 47	2.82 kHz	64.7 mV	0.05%	-39	8.16 mA	9.02%	-98
Harmonic 48	2.88 kHz	23.7 mV	0.02%	68.7	3.1 mA	3.42%	75.3
Harmonic 49	2.94 kHz	115 mV	0.09%	-89.4	6.82 mA	7.54%	68.7
Harmonic 50	3 kHz	136 mV	0.11%	125	617 uA	0.68%	-87.9
Harmonic 51	3.06 kHz	76.6 mV	0.06%	176	6.01 mA	6.64%	-115

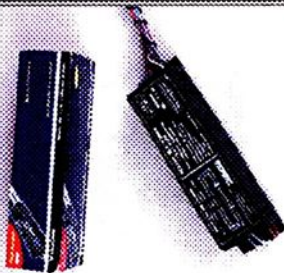


Componentes Harmônicas da Tensão e Corrente de Alimentação

Ref: Lâmpada Yellowstar 10w

	Freq	Voltage RMS	Voltage %I	Voltage Phase	Current RMS	Current %I	Current Phase
Fundamental	59.9 Hz	127 V	100.00%	0.0	76.9 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	368 mV	0.29%	170	1.13 mA	1.47%	149
Harmonic 3	180 Hz	426 mV	0.34%	-106	69.5 mA	90.32%	159
Harmonic 4	240 Hz	154 mV	0.12%	-126	938 uA	1.22%	-79.9
Harmonic 5	299 Hz	161 mV	0.13%	-159	55.8 mA	72.52%	-17
Harmonic 6	359 Hz	46.6 mV	0.04%	91.8	1.21 mA	1.57%	90.4
Harmonic 7	419 Hz	120 mV	0.09%	-149	37.1 mA	48.28%	159
Harmonic 8	479 Hz	104 mV	0.08%	-98.8	607 uA	0.79%	-101
Harmonic 9	539 Hz	123 mV	0.10%	-179	24.7 mA	32.10%	-34
Harmonic 10	599 Hz	53.8 mV	0.04%	-157	1.68 mA	2.19%	45.3
Harmonic 11	659 Hz	120 mV	0.09%	106	18.2 mA	23.71%	116
Harmonic 12	719 Hz	108 mV	0.09%	-113	1.29 mA	1.68%	-31.3
Harmonic 13	778 Hz	44.5 mV	0.04%	142	17.8 mA	23.20%	-88.9
Harmonic 14	838 Hz	161 mV	0.13%	38.7	976 uA	1.27%	1.66
Harmonic 15	898 Hz	92.6 mV	0.07%	161	15.7 mA	20.46%	82.6
Harmonic 16	958 Hz	78.9 mV	0.06%	-84.5	705 uA	0.92%	-82
Harmonic 17	1.02 kHz	56.4 mV	0.04%	-166	12.6 mA	16.33%	-121
Harmonic 18	1.08 kHz	148 mV	0.12%	-144	1.16 mA	1.51%	4.21
Harmonic 19	1.14 kHz	9.15 mV	0.01%	-153	12.3 mA	15.98%	46.9
Harmonic 20	1.2 kHz	145 mV	0.11%	-38.9	788 uA	1.02%	-175
Harmonic 21	1.26 kHz	10 mV	0.01%	25.9	9.76 mA	12.68%	-160
Harmonic 22	1.32 kHz	82.3 mV	0.06%	32.3	1.29 mA	1.67%	-3.88
Harmonic 23	1.38 kHz	110 mV	0.09%	149	9.63 mA	12.51%	-2.38
Harmonic 24	1.44 kHz	212 mV	0.17%	175	347 uA	0.45%	12.7
Harmonic 25	1.5 kHz	62.8 mV	0.05%	160	9.39 mA	12.20%	167
Harmonic 26	1.56 kHz	7.61 mV	0.01%	117	1.76 mA	2.29%	-5.08
Harmonic 27	1.62 kHz	115 mV	0.09%	-139	8.65 mA	11.25%	-31.3
Harmonic 28	1.68 kHz	36.2 mV	0.03%	-68.1	2.27 mA	2.95%	127
Harmonic 29	1.74 kHz	97.2 mV	0.08%	69.7	7.28 mA	9.47%	129
Harmonic 30	1.8 kHz	77.3 mV	0.06%	-166	1.11 mA	1.44%	10.8
Harmonic 31	1.86 kHz	75.9 mV	0.06%	170	7.91 mA	10.28%	-77.8
Harmonic 32	1.92 kHz	48.8 mV	0.04%	-158	1.23 mA	1.60%	164
Harmonic 33	1.98 kHz	71.8 mV	0.06%	-134	8.59 mA	11.17%	93
Harmonic 34	2.04 kHz	14.4 mV	0.01%	-42.7	2.57 mA	3.34%	-140
Harmonic 35	2.1 kHz	120 mV	0.09%	-161	6.71 mA	8.73%	-113
Harmonic 36	2.16 kHz	58.1 mV	0.05%	-25.5	657 uA	0.85%	-96
Harmonic 37	2.22 kHz	101 mV	0.08%	-148	6.82 mA	8.86%	48
Harmonic 38	2.28 kHz	68.9 mV	0.05%	27.6	1.11 mA	1.45%	-166
Harmonic 39	2.34 kHz	71.3 mV	0.06%	-118	6.11 mA	7.94%	-162
Harmonic 40	2.4 kHz	26.5 mV	0.02%	40.9	2.71 mA	3.53%	6.61
Harmonic 41	2.46 kHz	117 mV	0.09%	122	5.36 mA	6.97%	7.9
Harmonic 42	2.51 kHz	190 mV	0.15%	102	2.9 mA	3.77%	136
Harmonic 43	2.57 kHz	119 mV	0.09%	44.1	5.5 mA	7.15%	177
Harmonic 44	2.63 kHz	89.4 mV	0.07%	116	2.13 mA	2.77%	-14.3
Harmonic 45	2.69 kHz	109 mV	0.09%	-27.7	4.22 mA	5.49%	-27.3
Harmonic 46	2.75 kHz	144 mV	0.11%	109	1.65 mA	2.15%	116
Harmonic 47	2.81 kHz	160 mV	0.13%	24	5.29 mA	6.88%	126
Harmonic 48	2.87 kHz	104 mV	0.08%	-158	598 uA	0.78%	13.3
Harmonic 49	2.93 kHz	44.9 mV	0.04%	135	6.32 mA	8.22%	-66.4
Harmonic 50	2.99 kHz	51.9 mV	0.04%	180 m	2.38 mA	3.09%	133
Harmonic 51	3.05 kHz	40 mV	0.03%	-79	6.78 mA	8.81%	107

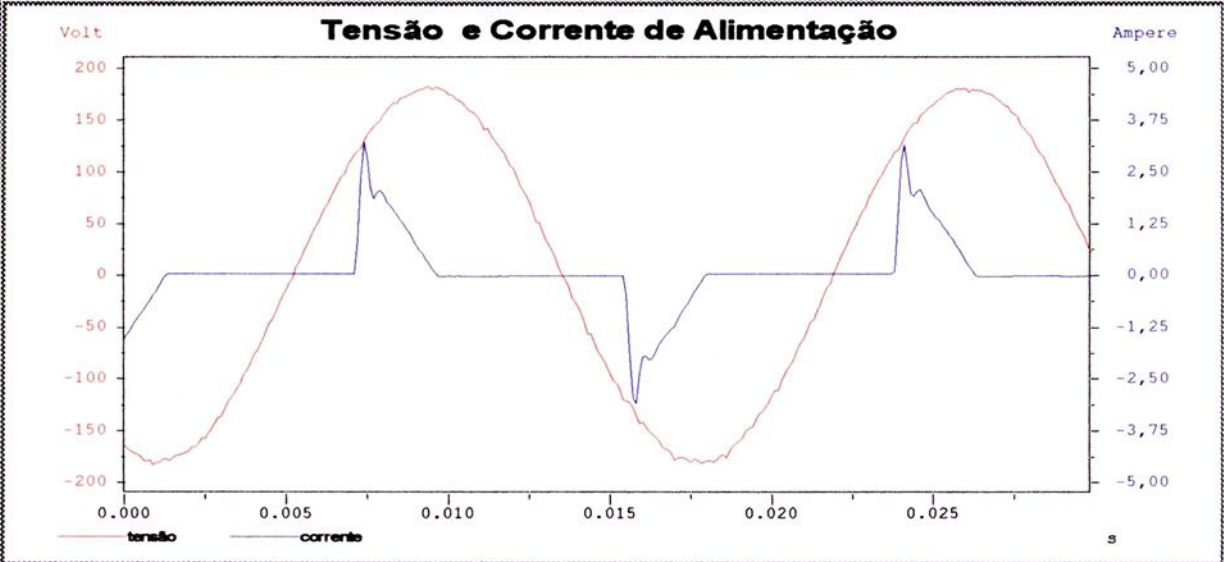


Fabricante	Magirus	Fator de Potência	>0,58	
Origem		THD%		
Lâmpadas	2 x 40 W	Luminosidade		
Tensão	127/220 V	Tonalidade de cor		
Frequência	60 Hz	Vida útil		
Potência	66 W			

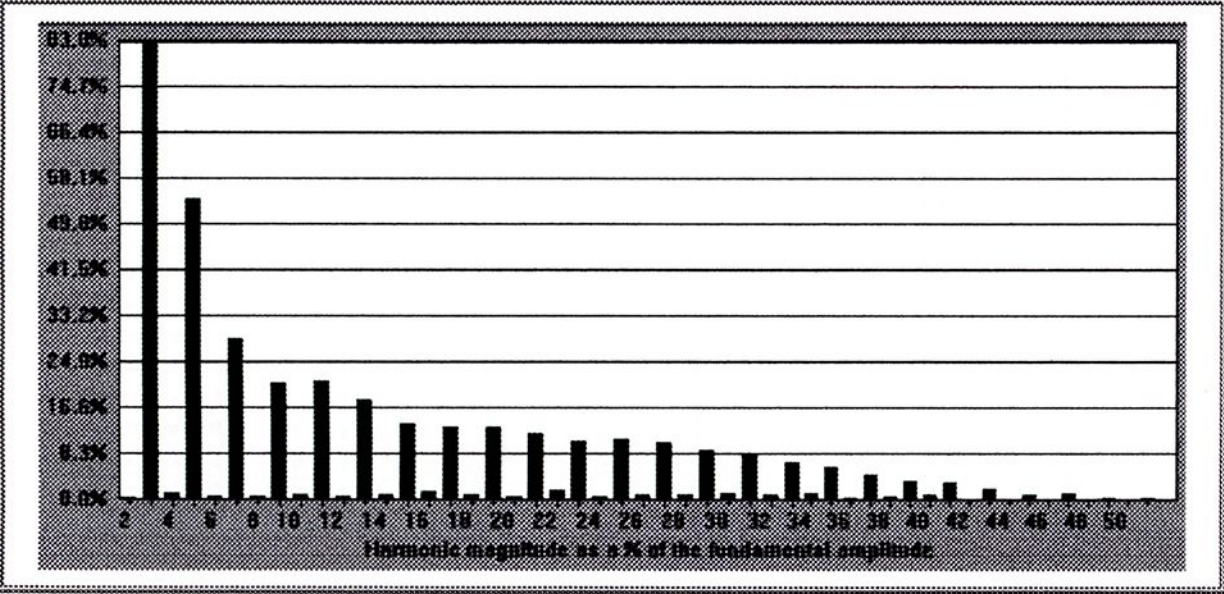
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

	Corrente	Tensão	Potência Ativa	62,8 W
Rms	0,88 A	127 V	Potência Aparente	111,0 VA
Pico	3,16 A	178 V	Potência Reativa	91,7 Var
THD	115,8 %	0,94 %	Fator de Potência (PF)	0,56
Fator de Crista	3,59	1,40	Cos ϕ (DPF)	0,85

FORMAS DE ONDA:



ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO:



Componentes Harmônicas da Tensão e Corrente de Alimentação

Ref: Reator Eletr. Margirius 2x40W-127V

	Freq	Voltage RMS	Voltage % F	Voltage Phase	Current RMS	Current % F	Current Phase
Fundamental	59.9 Hz	127 V	100.00%	0.0	568 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	390 mV	0.31%	164	4.33 mA	0.76%	163
Harmonic 3	180 Hz	646 mV	0.51%	-115	471 mA	82.97%	153
Harmonic 4	240 Hz	261 mV	0.21%	-143	9.33 mA	1.64%	-50.7
Harmonic 5	299 Hz	83.6 mV	0.07%	-112	310 mA	54.59%	-27.8
Harmonic 6	359 Hz	135 mV	0.11%	-87.5	5.73 mA	1.01%	136
Harmonic 7	419 Hz	91.1 mV	0.07%	107	168 mA	29.58%	134
Harmonic 8	479 Hz	139 mV	0.11%	126	5.4 mA	0.95%	-79
Harmonic 9	539 Hz	102 mV	0.08%	166	122 mA	21.50%	-90.3
Harmonic 10	599 Hz	95.3 mV	0.08%	-158	6.62 mA	1.17%	66.6
Harmonic 11	659 Hz	207 mV	0.16%	165	124 mA	21.76%	60.1
Harmonic 12	719 Hz	127 mV	0.10%	-170	5.99 mA	1.05%	-143
Harmonic 13	778 Hz	52.6 mV	0.04%	175	104 mA	18.26%	-140
Harmonic 14	838 Hz	48.1 mV	0.04%	55.8	7.65 mA	1.35%	21.6
Harmonic 15	898 Hz	215 mV	0.17%	113	79.9 mA	14.06%	10.5
Harmonic 16	958 Hz	103 mV	0.08%	-53.3	10.1 mA	1.78%	172
Harmonic 17	1.02 kHz	67.6 mV	0.05%	-92.6	76.3 mA	13.43%	156
Harmonic 18	1.08 kHz	114 mV	0.09%	110	7.51 mA	1.32%	-11
Harmonic 19	1.14 kHz	229 mV	0.18%	-176	76 mA	13.38%	-48.8
Harmonic 20	1.2 kHz	235 mV	0.18%	133	5.3 mA	0.93%	138
Harmonic 21	1.26 kHz	97.1 mV	0.08%	-31.7	69.6 mA	12.26%	108
Harmonic 22	1.32 kHz	32.3 mV	0.03%	82.8	11.5 mA	2.03%	-77.2
Harmonic 23	1.38 kHz	81.3 mV	0.06%	-6.3	62.2 mA	10.96%	-105
Harmonic 24	1.44 kHz	142 mV	0.11%	-66.2	5.39 mA	0.95%	81.7
Harmonic 25	1.5 kHz	72.5 mV	0.06%	-151	63.9 mA	11.26%	48.4
Harmonic 26	1.56 kHz	115 mV	0.09%	35.2	6.85 mA	1.21%	-122
Harmonic 27	1.62 kHz	86.8 mV	0.07%	-32.8	60.3 mA	10.61%	-149
Harmonic 28	1.68 kHz	156 mV	0.12%	-144	6.38 mA	1.12%	31.3
Harmonic 29	1.74 kHz	70.4 mV	0.06%	144	52.6 mA	9.27%	8.63
Harmonic 30	1.8 kHz	48.9 mV	0.04%	-162	8.49 mA	1.49%	173
Harmonic 31	1.86 kHz	154 mV	0.12%	152	47.5 mA	8.37%	167
Harmonic 32	1.92 kHz	74.6 mV	0.06%	-140	6.98 mA	1.23%	-34.5
Harmonic 33	1.98 kHz	226 mV	0.18%	146	39.7 mA	6.99%	-35.3
Harmonic 34	2.04 kHz	108 mV	0.08%	-55.2	8.03 mA	1.41%	155
Harmonic 35	2.1 kHz	25.4 mV	0.02%	-38.6	34.8 mA	6.12%	120
Harmonic 36	2.16 kHz	64.4 mV	0.05%	-2.41	4.6 mA	0.81%	-58.9
Harmonic 37	2.22 kHz	200 mV	0.16%	-30.3	28.1 mA	4.95%	-80
Harmonic 38	2.28 kHz	37.9 mV	0.03%	56.7	5.93 mA	1.04%	72.6
Harmonic 39	2.34 kHz	209 mV	0.16%	25.7	20.7 mA	3.65%	76.3
Harmonic 40	2.4 kHz	177 mV	0.14%	167	6.84 mA	1.20%	-133
Harmonic 41	2.46 kHz	1.08 mV	0.00%	145	19.6 mA	3.45%	-124
Harmonic 42	2.51 kHz	100 mV	0.08%	-68.5	2.15 mA	0.38%	112
Harmonic 43	2.57 kHz	82.9 mV	0.07%	-57.3	14 mA	2.46%	20.3
Harmonic 44	2.63 kHz	102 mV	0.08%	169	2.76 mA	0.49%	-168
Harmonic 45	2.69 kHz	201 mV	0.16%	-17.9	7.69 mA	1.35%	-170
Harmonic 46	2.75 kHz	172 mV	0.14%	-176	2.72 mA	0.48%	-20.7
Harmonic 47	2.81 kHz	106 mV	0.08%	-104	8.66 mA	1.53%	-22
Harmonic 48	2.87 kHz	41.6 mV	0.03%	-103	2.56 mA	0.45%	180
Harmonic 49	2.93 kHz	102 mV	0.08%	-6.43	4.31 mA	0.76%	139
Harmonic 50	2.99 kHz	118 mV	0.09%	69.5	722 uA	0.13%	102
Harmonic 51	3.05 kHz	173 mV	0.14%	170	3.99 mA	0.70%	-113



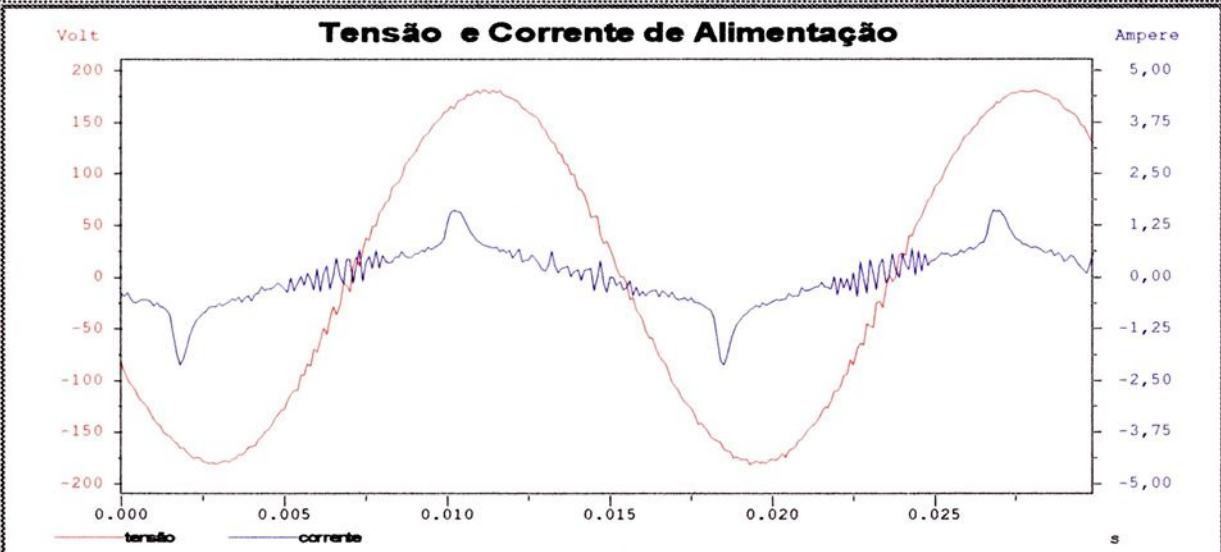
Fabricante	Intral	Fator de Potência	$\geq 0,92$
Origem		THD%	< 32
Lâmpadas	2 x 40 W	Luminosidade	
Tensão	127 V	Tonalidade de cor	
Frequência	50/60 Hz	Vida útil	
Potência	76 W		



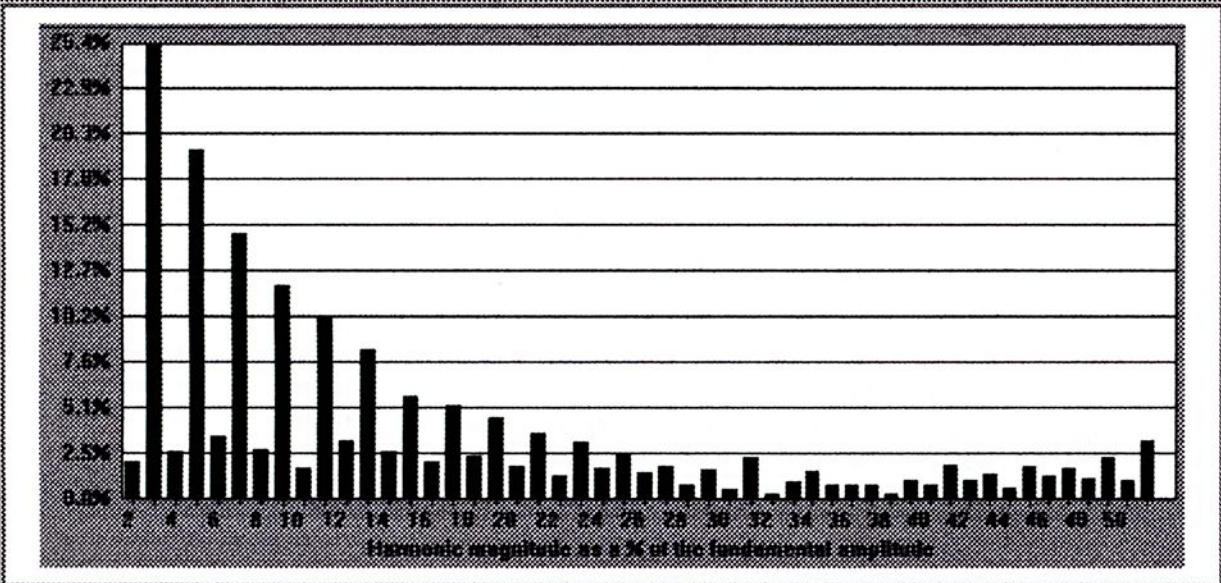
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

	Corrente	Tensão	Potência Ativa	73,80 W
Rms	0,67 A	127 V	Potência Aparente	88,30 VA
Pico	1,62 A	178 V	Potência Reativa	48,50 Var
THD	42,7 %	0,58 %	Fator de Potência (PF)	0,84
Fator de Crista	2,42	1,40	Cos ϕ (DPF)	0,95

FORMAS DE ONDA:



ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO:



Componentes Harmônicas da Tensão e Corrente de Alimentação

Ref: Reator Eletr. Intral 2x40W-127V

	Freq	Voltage RMS	Voltage % I	Voltage Phase	Current RMS	Current % I	Current Phase
Fundamental	60 Hz	127 V	100.00%	0.0	602 mA	100.00%	0.0
Harmonic 2	120 Hz	266 mV	0.21%	157	13.2 mA	2.19%	78.7
Harmonic 3	180 Hz	421 mV	0.33%	-106	153 mA	25.41%	160
Harmonic 4	240 Hz	127 mV	0.10%	-66.6	16.4 mA	2.73%	-163
Harmonic 5	300 Hz	88.7 mV	0.07%	-173	118 mA	19.56%	-22.3
Harmonic 6	360 Hz	111 mV	0.09%	-163	21.9 mA	3.64%	26.9
Harmonic 7	420 Hz	113 mV	0.09%	170	89.6 mA	14.89%	138
Harmonic 8	480 Hz	60.7 mV	0.05%	-127	17.3 mA	2.87%	-157
Harmonic 9	540 Hz	108 mV	0.09%	-34.4	72 mA	11.96%	-40.1
Harmonic 10	600 Hz	88.7 mV	0.07%	173	11.1 mA	1.84%	-8.79
Harmonic 11	660 Hz	125 mV	0.10%	172	61.9 mA	10.29%	130
Harmonic 12	720 Hz	42.1 mV	0.03%	54.1	20 mA	3.33%	176
Harmonic 13	780 Hz	49.1 mV	0.04%	-17.7	50.6 mA	8.41%	-59.2
Harmonic 14	840 Hz	91.2 mV	0.07%	157	16.6 mA	2.77%	-2.44
Harmonic 15	900 Hz	92 mV	0.07%	-117	35 mA	5.82%	110
Harmonic 16	960 Hz	65.5 mV	0.05%	-162	13.1 mA	2.18%	129
Harmonic 17	1.02 kHz	41.6 mV	0.03%	-109	31.6 mA	5.25%	-76.3
Harmonic 18	1.08 kHz	98.9 mV	0.08%	165	14.8 mA	2.46%	-31.3
Harmonic 19	1.14 kHz	33.6 mV	0.03%	12.8	27.5 mA	4.57%	93.8
Harmonic 20	1.2 kHz	71.1 mV	0.06%	-33.1	11.7 mA	1.94%	155
Harmonic 21	1.26 kHz	78 mV	0.06%	58.4	22.5 mA	3.75%	-120
Harmonic 22	1.32 kHz	107 mV	0.08%	54.8	8.35 mA	1.39%	-57.7
Harmonic 23	1.38 kHz	58 mV	0.05%	-67.3	19.7 mA	3.27%	55.6
Harmonic 24	1.44 kHz	107 mV	0.08%	117	11.2 mA	1.85%	135
Harmonic 25	1.5 kHz	80.9 mV	0.06%	-124	15.8 mA	2.62%	-147
Harmonic 26	1.56 kHz	55.6 mV	0.04%	-165	9.54 mA	1.58%	-88.4
Harmonic 27	1.62 kHz	148 mV	0.12%	51.4	11.6 mA	1.92%	37.5
Harmonic 28	1.68 kHz	34.8 mV	0.03%	-171	5.6 mA	0.93%	67.9
Harmonic 29	1.74 kHz	82.7 mV	0.06%	110	10.3 mA	1.72%	-159
Harmonic 30	1.8 kHz	136 mV	0.11%	-126	3.94 mA	0.66%	15.4
Harmonic 31	1.86 kHz	24.2 mV	0.02%	-103	14.4 mA	2.38%	-25
Harmonic 32	1.92 kHz	53.3 mV	0.04%	-113	2.04 mA	0.34%	127
Harmonic 33	1.98 kHz	126 mV	0.10%	-164	6.22 mA	1.03%	134
Harmonic 34	2.04 kHz	58.5 mV	0.05%	-38.3	9.96 mA	1.65%	-66.8
Harmonic 35	2.1 kHz	10.8 mV	0.01%	-85.7	5.49 mA	0.91%	-8.33
Harmonic 36	2.16 kHz	72.9 mV	0.06%	-40.3	5.52 mA	0.92%	36.1
Harmonic 37	2.22 kHz	76.2 mV	0.06%	65.2	5.13 mA	0.85%	65.2
Harmonic 38	2.28 kHz	30.7 mV	0.02%	-58.7	2.1 mA	0.35%	28.8
Harmonic 39	2.34 kHz	76 mV	0.06%	48.1	7.04 mA	1.17%	-18.3
Harmonic 40	2.4 kHz	72 mV	0.06%	-10.4	5.44 mA	0.90%	-9.04
Harmonic 41	2.46 kHz	84.2 mV	0.07%	-63.4	11.8 mA	1.96%	110
Harmonic 42	2.52 kHz	20.9 mV	0.02%	-125	6.63 mA	1.10%	-5.64
Harmonic 43	2.58 kHz	6.8 mV	0.01%	-180	8.78 mA	1.46%	140
Harmonic 44	2.64 kHz	23.2 mV	0.02%	29.3	4.56 mA	0.76%	-18.3
Harmonic 45	2.7 kHz	60.8 mV	0.05%	-46.2	11.6 mA	1.93%	101
Harmonic 46	2.76 kHz	52.2 mV	0.04%	77.3	8.52 mA	1.42%	13
Harmonic 47	2.82 kHz	33.8 mV	0.03%	-158	10.9 mA	1.81%	159
Harmonic 48	2.88 kHz	49.3 mV	0.04%	165	7.34 mA	1.22%	26.7
Harmonic 49	2.94 kHz	47.9 mV	0.04%	-165	14.5 mA	2.40%	161
Harmonic 50	3 kHz	36.6 mV	0.03%	-47.8	7.13 mA	1.18%	11.7
Harmonic 51	3.06 kHz	69.3 mV	0.05%	77.4	20.2 mA	3.36%	-153





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

