

C P G
ÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO

Universidade Federal da Paraíba
ESCOLA POLITÉCNICA
Campina Grande - Paraíba - Brasil



TESTES EM TRANSFORMADOR DE ALTA
E EXTRA ALTA TENSÃO

SIEGBERT DE MORAES RÊGO NETTO



R343t Rêgo Netto, Siegbert de Moraes.
Testes em transformador de alta e extra alta tensão /
Siegbert de Moraes Rêgo Netto. - Campina Grande, 1972.
136 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade
Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1972.
"Orientação : Prof. Dr. John Ernest Jones".
Referências.

1. Transformadores Elétricos. 2. Transformadores de
Tensão (Voltagem). 3. Dissertação - Ciências. I. Jones,
John Ernest. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina
Grande (PB). III. Título

CDU 621.314(043)

TESTES EM TRANSFORMADOR DE ALTA E EXTRA
ALTA TENSÃO

SIEGBERT DE MORAES RÉGO NETTO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS -GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

ORIENTADOR : JOHN ERNEST JONES (PH.D)

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
DEZEMBRO DE 1972

I N D I C E

CAPÍTULO I :

INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO II:

COMO SE FORMA OS SURTOS DE TENSÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO:

2.1. - DESCARGA ATMOSFÉRICA	5
2.2. - SURTOS DE MANOBRA	10
2.3. - COMO O TRANSFORMADOR FICA SOLICITADO A ESTAS SOBRETENSÕES	12
2.4. - SOBRETENSÕES CAUSADAS POR FERRORESONÂNCIA	13
2.5. - OUTROS TIPOS DE SOBRETENSÃO	14

CAPÍTULO III:

ENSAIOS A IMPULSO ATMOSFÉRICO:

3.1. - FORMA DE ONDA	18
3.2. - TIPOS DE ONDA PARA ENSAIO DE IMPULSO	21
3.3. - APLICAÇÃO DE ONDAS NO ENSAIO DE IMPULSO EM TRANSFORMADORES	25
3.4. - CIRCUITO PARA ENSAIO DE IMPULSO	28
3.5. - FRENTE DE ONDA	31
3.6. - CAUDA DE ONDA	33
3.7. - COMENTÁRIOS SOBRE O CIRCUITO DE IMPULSO	35
3.8. - LIGAÇÕES PARA O ENSAIO DE IMPULSO	38
3.9. - DETEÇÃO DE DEFEITOS DURANTE O TESTE DE IMPULSO.	41

3.10. - LOCALIZAÇÃO DOS DEFEITOS	44
3.11. - EXEMPLOS ILUSTRATIVOS DE ENSAIOS DE IMPULSO ..	45

CAPÍTULO IV :

TESTES A SURTO DE MANOBRA:

4.1. - FORMA DE ONDA	48
4.2. - OPERAÇÃO DE ONDAS	49
4.3. - ENSAIO À SURTO DE MANOBRA UTILIZANDO O GERA - DOR DE IMPULSO.....	51
4.4. - ONDA PADRÃO	55
4.5. - AMPLITUDE DA ONDA	55
4.6. - GENERALIDADE SOBRE TESTE DE TENSÃO REDUZIDA ..	60
4.7. - SUGESTÕES PARA REVISÃO DO TESTE DE TENSÃO IN- DUZIDA	61
4.8. - SATURAÇÃO DO NÚCLEO: FATOR LIMITANTE DA DURA - ÇÃO DA ONDA	66
4.9. - DETEÇÃO DOS DEFEITOS	70
4.10. - LOCALIZAÇÃO DOS DEFEITOS	75

CAPÍTULO V:

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL NOS ENROLAMENTOS DO
TRANSFORMADOR:

5.1. - GENERALIDADES	77
5.2. - ESTRUTURAS PARA O ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE PO- TENCIAL.....	78
5.3. - MAIOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO	81
5.4. - MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO.....	89

5.5. - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EM ENROLAMENTOS DE BAIXA IMPEDÂNCIA	95
5.6. - ANÁLISE DAS POSSÍVEIS DISPOSIÇÕES DOS ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS	99
5.7. - DISPOSIÇÕES QUE PERMITEM REDUZIR AS SOBRETENSÕES INTERNAS	105

CAPÍTULO VI:

DISCUSSÃO DE TESTES EM TRANSFORMADORES SOLICITADOS POR SOBRETENSÕES FERRORESONANTES:

6.1. - GENERALIDADES	104
6.2. - CIRCUITO PARA TESTE	118
6.3. - ANÁLISE DOS TESTES PARA VÁRIAS CONEXÕES.....	119
6.4. - PROCEDIMENTOS PARA REDUZIR OS EFEITOS DA FERRORESONÂNCIA	125

CAPÍTULO VII:

CONCLUSÕES:.....	131
BIBLIOGRAFIA	133

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

OS TESTES DE IMPULSO EM TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO COMEÇARAM A TER UMA CERTA SISTEMATIZAÇÃO HÁ CERCA DE QUARENTA ANOS.

AS LINHAS DE TRANSMISSÃO SÃO ALVOS FÁCEIS PARA AS DESCARGAS DE ORIGEM ATMOSFÉRICAS, E QUANDO ATINGIDAS, O SEU ISOLAMENTO PODE VIR A SER DANIFICADO DEVIDO À ELEVADAS SOLICITAÇÕES A QUE FICA SUBMETIDO, CONSEQUENTEMENTE OS TRANSFORMADORES EXISTENTES NO SISTEMA TAMBÉM RESTAM SUJEITOS A ESTES ESFORÇOS.

ANTIGAMENTE QUANDO O TRANSFORMADOR SOFRIA UMA FALHA QUE NÃO FÔSSE DE IDENTIFICAÇÃO ÓBVIA, ERA COMUM ATRIBUI-LA DE IMEDIATO A UM SURTO ELÉTRICO.

DESTA MANEIRA, OS TRANSFORMADORES A FIM DE COMPENSAR ESTAS OCORRÊNCIAS, ERAM DE UMA CONSTRUÇÃO ROBUSTA COM UM ISOLAMENTO FORA DOS LIMITES NORMAIS, E MESMO ASSIM, NÃO DISPUNHAM DE NENHUMA GARANTIA PARA SOBREVIVER EM SERVIÇO POR LONGO TEMPO.

ENTRETANTO, COM OS PROGRESSOS REALIZADOS NO ESTUDO DOS FENÔMENOS TRANSITÓRIOS E COM O RÁPIDO DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO E DA INSTRUMENTAÇÃO NECESSÁRIA PARA MEDIDAS, PERMITIRAM PESQUISAS NO SENTIDO DE ELABORAR UMA SÉRIE DE TESTES EM LABORATÓRIO SIMULANDO CONDIÇÕES REAIS DE OPERAÇÃO, E DE POSSE DOS RESULTADOS OBTIDOS, OS PROJETOS DOS TRANSFORMADORES VIERAM A SE TORNAR MAIS FUNCIONAIS.

COM A EVOLUÇÃO DESTA CIÊNCIA, FOI OBSERVADO QUE OS TESTES INICIALMENTE REALIZADOS, AQUELES A BAIXA FREQUÊNCIA

NÃO ERAM UMA MANEIRA ADEQUADA DE MEDIR-SE A CONFIABILIDADE DO APARELHO AOS ESFORÇOS CAUSADOS QUANDO DAS PERTURBAÇÕES DO SISTEMA, COMO TAMBÉM OS NÍVEIS DE TENSÃO NO ENSAIO DE IMPULSO EM TRANSFORMADORES INSTALADOS EM SISTEMAS DE ALTÍSSIMAS TENSÕES NÃO SERIAM ADEQUADOS PARA ESTABELECEER UMA ADEQUADA MARGEM DE SEGURANÇA CONTRA SURTOS DE MANOBRA QUE PODEM ORIGINAR-SE SOBRE DETERMINADAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO, A MENOS QUE OS NÍVEIS DE TENSÃO PARA ESTES DOIS TESTES FÔSSEM BASTANTE ELEVADOS, ISTO SERÁ ABORDADO COM DETALHES NO CAPÍTULO IV.

PELO FATO DE QUE AS PARTES COMPONENTES DO TRANSFORMADOR SÃO SOLICITADAS DIFERENTEMENTE PARA SURTOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E POR SOBRETENSÕES ORIUNDAS DE MANOBRA, ESTES DOIS ENSAIOS SERÃO TRATADOS SEPARADAMENTE, NOS CAPÍTULOS III E IV, APRESENTAMOS ESTES TESTES, ACOMPANHADOS DE RECENTES SUGESTÕES PARA UM TRATAMENTO ADEQUADO AO ENSAIO DE MANOBRA DE FORMA QUE ÊLE VENHA A SE APROXIMAR DAS SITUAÇÕES REAIS QUANDO DO TRANSFORMADOR EM SERVIÇO.

TAMBÉM DESENVOLVIMENTOS RECENTES INFLUENCIANDO A TECNOLOGIA DO ISOLAMENTO DOS TRANSFORMADORES, TAIS COMO MELHORAMENTOS NA TÉCNICA DOS PARA-RAIOS, AVANÇOS NA TÉCNICA DA DETECÇÃO DO CORONA DURANTE OS TESTES DE ISOLAMENTO A BAIXA FREQUÊNCIA, MOTIVARAM SUGESTÕES ESPECÍFICAS PARA UMA REVISÃO NOS TESTES DIELÉTRICOS PARA TRANSFORMADORES DE EXTRA ALTA TENSÃO.

EM CONSEQUÊNCIA OBJETIVAMOS O NOSSO ESTUDO NO SENTIDO DE ANALISAR ESTES RESULTADOS MAIS NOVOS NA TÉCNICA DESTES ENSAIOS, ONDE OS TESTES DE SURTOS DE MANOBRA E DE IMPULSO SÃO COORDENADOS INDEPENDENTEMENTE COM AS CARACTERÍSTICAS DOS PARA-RAIOS. OS TESTES DE BAIXA FREQUÊNCIA SÃO SEPARADOS DAS EXIGÊNCIAS PARA TENSÕES TRANSITÓRIAS FICANDO RELACIONADOS APENAS COM A TENSÃO DE OPERAÇÃO.

NO CAPÍTULO V ANALISAREMOS AS DISTRIBUIÇÕES DE TENSÃO NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR, ESTUDAREMOS AS MA

LHAS DE MAIOR E MENOR CAPACITÂNCIAS. NOS RESTRINGIREMOS AOS TRANSFORMADORES COM ENROLAMENTO CONCÊNTRICO, POR SEREM OS MAIS UTILIZADOS ATUALMENTE, APRESENTAREMOS TAMBÉM TÉCNICAS PARA MELHORAR ESTAS DISTRIBUIÇÕES DE POTENCIAL NESTES ENROLAMENTOS.

FINALIZANDO ÊSTE TRABALHO, VEREMOS OS ESFORÇOS A QUE FICAM SUBMETIDOS OS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR A SOBRETENSÕES CAUSADAS PELO FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA. MOSTRAREMOS OS RESULTADOS DE TESTE OBTIDOS COM O EMPRÊGO DO T.N.A. E MOSTRAREMOS AO MESMO TEMPO ALGUMAS MANEIRAS PRÓPRIAS PARA EVITAR ESTAS SOBRETENSÕES.

OPORTUNAMENTE RESSALTAMOS O FATO DE QUE AS OPINIÕES SE DIVIDEM QUANTO O EMPRÊGO DOS TESTES DE IMPULSO.

FABRICANTES E USUÁRIOS CONSIDERAM O ENSAIO DE IMPULSO COM A FINALIDADE DE VERIFICAR A RESISTÊNCIA DIELÉTRICA DO PROJETO E DA GRADUAÇÃO DOS NÍVEIS DE ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR. VISAM TRATAR ESTES FATORES DE MODO ADEQUADO DE FORMA TAL QUE A UNIDADE SUPORTE SURTOS ELÉTRICOS DENTRO DE LIMITES ECONOMICAMENTE ACEITÁVEIS.

OUTROS CONSIDERAM QUE O ENSAIO ENFRAQUECE O ISOLAMENTO DA PEÇA SOB ENSAIO, EM VIRTUDE DA DIFICULDADE EM MEDIR O SURTO A SER APLICADO, BEM COMO A COMPLEXIDADE NA DETECÇÃO PRECISA DOS DEFEITOS NÃO VISÍVEIS. SUGEREM ÊLES QUE OS TESTES FÔSSEM REALIZADOS SOMENTE EM PROTÓTIPOS COM A FINALIDADE DE FORNECER DADOS AO PROJETISTA DO EQUIPAMENTO.

ALGUNS SÃO DE OPINIÃO QUE ÊSTES TESTES ASSEGURAM UMA GARANTIA CONTRA POSSÍVEIS FALHAS QUE POSSAM OCORRER NA FABRICAÇÃO, CONSIDERANDO INDISPENSÁVEIS A REALIZAÇÃO DO ENSAIO EM CADA UNIDADE FABRICADA.

INDEPENDENTE DESTAS VÁRIAS CORRENTES DE OPINIÃO!

NO BRASIL OS TESTES DE IMPULSO NA UNIDADE PRODUZIDA TENDQ A
SER UM REQUISITO DE ACEITAÇÃO COMERCIAL.

CAPÍTULO II

COMO SE FORMA OS SURTOS DE TENSÃO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO E SEUS EFEITOS NOS TRANSFORMADORES

2.1: DESCARGA ATMOSFÉRICA

ENTRE UMA NUVEM CARREGADA E A TERRA FORMAM-SE GRADIENTES DE TENSÃO QUE VARIAM ENTRE 50 A 2.500 VOLTS/CM, EM UM CERTO INSTANTE A DIFERENÇA DE POTENCIAL ATINGE UM VALOR TAL QUE SE PROCESSA A DESCARGA OU RAIO.

SUPOMOS UMA NUVEM CARREGADA ELETRICAMENTE SÔBRE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO, CONFORME INDICADO NA FIGURA 2.1.

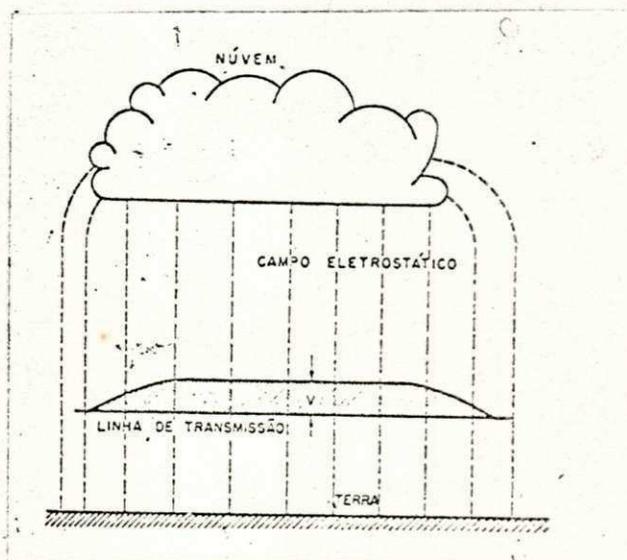


FIG. 2.1.

EM VIRTUDE DOS GRADIENTS DE TENSÃO, HAVERÁ UM ACUMULO DE CARGAS ESTÁTICAS NA LINHA. A DESCARGA DE UM RAIO, ENTRE A NUVEM E A LINHA OU ENTRE A NUVEM E A TERRA ROMPE O

CAMPO ELETROSTÁTICO LIBERANDO A CARGA QUE SE COMPORTAVA COMO SE ESTIVESSE PRESA A LINHA.

ESTA CARGA LIBERADA SE DIVIDE EM AMBAS AS DIREÇÕES AO LONGO DA LINHA A PARTIR DA ZONA DE ACUMULAÇÃO, DO MODO INDICADO NA FIGURA 2.2, ONDE ESTAMOS CONSIDERANDO UM VÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO, SUPOMOS TAMBÉM A INEXISTÊNCIA DE FIO GUARDA. COMO DISSEMOS ACIMA, DO IMPACTO DO RAIO, RESULTA A FORMAÇÃO DE DUAS ONDAS TRANSMISSANTES QUE CAMINHARÃO AO LONGO DA LINHA DE TRANSMISSÃO, DE ACORDO COM A INDICAÇÃO DAS SETAS. PARA FACILITAR NOSSO TRABALHO, CONSIDERAMOS APENAS A ONDA QUE SE DESLOCA NA DIREÇÃO I, A QUAL SUBMETERÁ A CADEIA DE ISOLADORES A POR UM DETERMINADO TEMPO, A UMA SOBRETENSÃO QUE CRESCERÁ DESDE O VALOR ZERO ATÉ O VALOR MÁXIMO E_M .

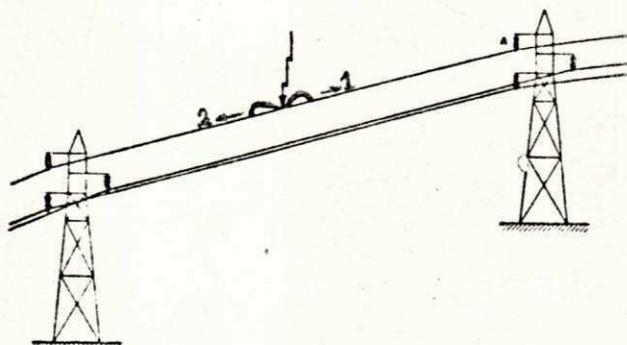


FIGURA 2.2

ESTAS ONDAS DE IMPULSO SUBMETEM O ISOLAMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO A ELEVADOS ESFORÇOS, EM OBSERVAÇÕES REALIZADAS, A CORRENTE ELÉTRICA ASSOCIADA À DESCARGA DE RETORNO É DA ORDEM DE 14.000 AMPÈRES, CUJO VALOR CARACTERIZA PROVAVELMENTE 50% DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, SE CONSIDERARMOS A IMPEDÂNCIA DE SURTO DOS CONDUTORES DA LINHA DE TRANSMISSÃO DA ORDEM DE 500 OHMS, O VALOR DE E_M SERIA IGUAL A 3.500 KV.

NENHUMA LINHA DE TRANSMISSÃO TEM O SEU ISOLAMENTO PROJETADO PARA SUPORTAR TÃO ELEVADAS SOBRETENSÕES, ASSIM A CADEIA DE ISOLADORES "A", DEIXARÁ QUE

SALTE UM ARCO ELÉTRICO ENTRE O CONDUTOR E A TERRA, PARA UMA CERTA FRAÇÃO DE E_M QUE CHAMAREMOS DE "E", ASSIM A ONDA TRANSITANTE IRÁ ATINGIR FINALMENTE OS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS LIGADOS À LINHA DE TRANSMISSÃO, TANTO NAS ESTAÇÕES E NAS SUBESTAÇÕES COMO OS TRANSFORMADORES, FATO ILUSTRADO NA FIGURA 2.3, NÃO COM O SEU VALOR MÁXIMO E_M , MAS COM UM VALOR ATENUADO "E", EM GERAL SUPERIOR AO NÍVEL DE ISOLAMENTO PARA O QUAL OS EQUIPAMENTOS FORAM PROJETADOS.

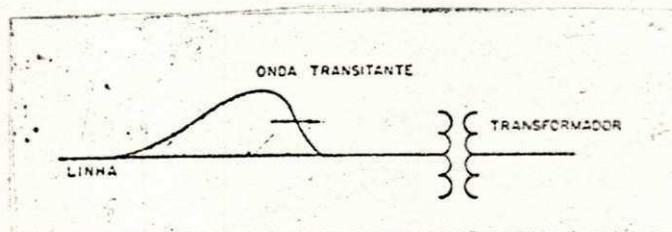


FIG 2.3

OUTRA POSSIBILIDADE SERÁ A QUEDA DE UM RAIO DIRETAMENTE SOBRE UMA TORRE DA LINHA DE TRANSMISSÃO, CONFORME INDICAMOS NA FIGURA 2.4.

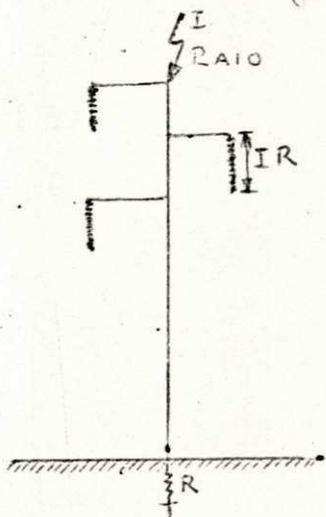


FIG 2.4

CONSIDEREMOS A TORRE REPRESENTADA POR UMA RESISTÊNCIA R , SEJA I A CORRENTE ASSOCIADA AO RAIO E QUE PASSE ATRAVÉS DESTA RESISTÊNCIA R , DESTA MODO HAVERÁ UMA QUEDA DE TENSÃO IR , ESTA TENSÃO SE APLICARÁ ENTRE A

TORRE E CADA CONDUTOR, SUBMETENDO AS CADEIAS DE ISOLADORES A ESTA TENSÃO IR . CASO ESTA TENSÃO SEJA SUPERIOR À TENSÃO DISRUPTIVA DO ISOLAMENTO DAS CADEIAS DE ISOLADORES, HAVERÁ UMA DESCARGA ELÉTRICA DA TORRE PARA O CONDUTOR, FORMANDO-SE ASSIM, ONDAS TRANSITANTES QUE CAMINHARÃO AO LONGO DE UM OU MAIS CONDUTORES, E QUE IRÃO ALCANÇAR OS TRANSFORMADORES DAS SUBESTAÇÕES QUE SE ENCONTREM NAS EXTREMIDADES DA LINHA DE TRANSMISSÃO.

OUTRO CASO QUE PODEMOS CONSIDERAR, É QUANDO A LINHA DE TRANSMISSÃO FOR PROTEGIDA COM FIO TERRA, NESTE CASO HAVERÁ FORMAÇÃO DE TRÊS ONDAS CAMINHANTES, DUAS DAS QUAIS SE PROPAGAM NO FIO TERRA E UMA TERCEIRA NA TORRE, VEJA FIGURA 2-5.

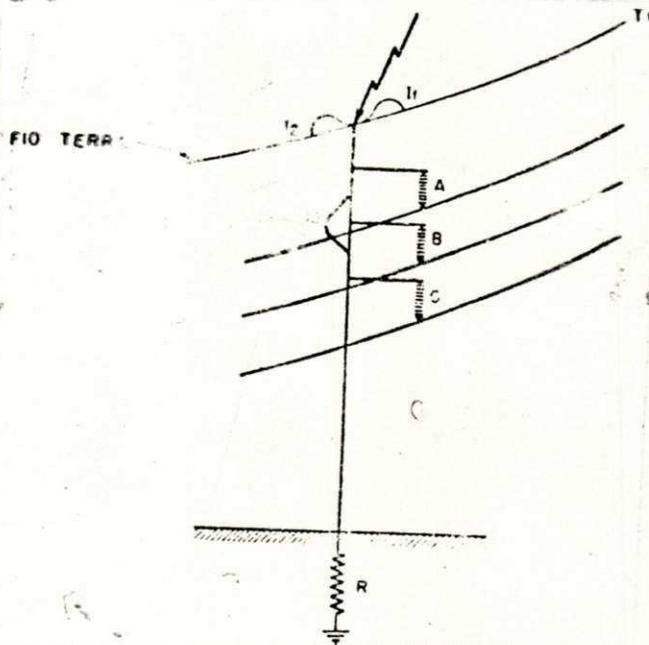


FIG. 2.5

AGORA A CORRENTE I ASSOCIADA AO RAIO ESTARÁ SUBDIVIDIDA, CONSEQUENTEMENTE A QUEDA DE TENSÃO ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA R DA TORRE, AO COMPONENTE I_3 SERÁ INFERIOR DO QUE NO CASO ANTERIOR, ENTRETANTO HAVERÁ UMA INDUÇÃO NOS CONDUTORES DEVIDO ÀS OUTRAS DUAS COMPONENTES I_1 E I_2 DO FIO TERRA.

PARA EFEITO DE ILUSTRAÇÃO, SUPOMOS QUE A RESIS -

TÊNÇÃO DO FIO TERRA, SEJA "R", ASSIM OS SURTOS DE TENSÃO INDUZIDOS NOS CONDUTORES A, B E C, RELATIVOS À ONDA I_1 SERÃO:

$$\begin{aligned} E_A &= K_1 I_1 R \\ E_B &= K_2 I_1 R \\ E_C &= K_3 I_1 R \end{aligned}$$

ONDA K_1 , K_2 , K_3 SÃO FATORES DE ACOPLAMENTO QUE DEPENDEM DAS CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO, CUJA RELAÇÃO É A SEGUINTE : K_3 K_2 K_1

É EVIDENTE QUE CADA CADEIA DE ISOLADORES FICARÁ SUBMETIDA ÀS SEGUINTE SOBRETENSÕES:

$$\text{CADEIA A} \quad E_{TA} = I_3 R - K_1 I_1 R$$

$$\text{CADEIA B} \quad E_{TB} = I_3 R - K_2 I_1 R$$

$$\text{CADEIA C} \quad E_{TC} = I_3 R - K_3 I_1 R$$

FAZENDO-SE $I_3 R = E$, TEREMOS:

$$E_{TA} = E - K_1 I_1 R$$

$$E_{TB} = E - K_2 I_1 R$$

$$E_{TC} = E - K_3 I_1 R$$

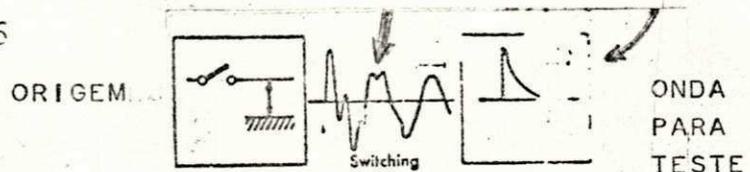
QUANDO A SOBRETENSÃO $E - K_1 I_1 R$ FOR SUPERIOR À TENSÃO DISRUPTIVA DA CADEIA DE ISOLADORES, HAVERÁ UMA DESCARGA ELÉTRICA ENTRE A TORRE E O CONDUTOR, ORIGINANDO-SE ONDAS TRANSITANTES QUE SE PROPAGARÃO AO LONGO DOS CONDUTORES, OBSERVAMOS QUE PARA ISTO ACONTECER A CORRENTE ASSOCIADA AO RAIO DEVE TER UM VALOR MUITO SUPERIOR AO CASO EM QUE NÃO HAVIA FIO TERRA, CONCLUI-SE PORTANTO, QUE O FIO TERRA DIMINUI A PROBABILIDADE DESTAS OCORRÊNCIAS.

OBSERVAMOS EM TEMPO QUE A DESCARGA DISRUPTIVA ATRAVÉS DA CADEIA DE ISOLADORES ENTRE A TORRE E O CONDUTOR ORIGINA UMA ONDA DE FRENTE ÍNGREME E CAUDA LONGA, PORÉM AS CADEIAS DE ISOLADORES INSTALADAS AO LONGO DA LINHA, SOFREM DESCARGAS DISRUPTIVAS DE FORMA QUE O VALOR DO SURTO SE TORNA INFERIOR AO NÍVEL DE ISOLAMENTO DA LINHA, ESTAS SUCESSIVAS DESCARGAS DISRUPTIVAS ATRAVÉS DAS CADEIAS DE ISOLADORES TORNAM A ONDA TRANSITANTE DE CAUDA CURTA.

2.2 - SURTOS DE MANOBRA:

OS SURTOS POR OPERAÇÃO DE MANOBRA, SÃO SOBRETENSÕES QUE SE ORIGINAM DE PERTURBAÇÕES NO SISTEMA, CAUSADOS POR CERTAS OPERAÇÕES DE MANOBRA, TAIS COMO, ABERTURA DE DISJUNTORES. A FIGURA 2.6, REPRESENTA O FENÔMENO E A FORMA DE ONDA PADRONIZADA. - FORMA DE ONDA -

FIGURA 2.6



ESSAS SOBRETENSÕES SÃO DE NATUREZA OSCILATÓRIA DE 1.000 A 100.000 CICLOS/SEGUNDO E SEU VALOR MÉDIO É IGUAL A 3 OU 3,5 VÊZES A TENSÃO ENTRE FASE E NEUTRO DO SISTEMA, PODENDO ATINGIR A 5,5 A 6 VÊZES ESSE VALOR, ENTRETANTO PODEM SER REDUZIDAS DE MANEIRA ADEQUADA, PARA CONTROLAR OU REDUZIR OS SURTOS DE MANOBRA, VÁRIAS SOLUÇÕES SÃO POSSÍVEIS, EQUIPANDO OS DISJUNTORES COM RESISTORES SHUNT:

1 - DISJUNTOR COM RESISTOR EM DEGRAU SIMPLES, QUE POSSIBILITA LIMITAR O SURTO PARA 2,05 PU.

2 - DISJUNTORES COM DOIS RESISTORES EM DEGRAU, TÊM SIDO PROJETADOS PARA UM FECHAMENTO MÚLTIPLO QUE REDUZ O SURTO PARA 1,7 PU.

3 - DISJUNTORES COM TRÊS RESISTORES EM DEGRAU,

TAMBÉM FORAM ESTUDADOS PARA FECHAMENTO MÚLTIPLO, QUE POSSIBILITA UMA REDUÇÃO DO SURTO PARA 1,5 PU.

4 - FECHAMENTO SÍNCRONO, TAMBÉM LIMITA O SURTO, PORÉM AS TOLERÂNCIAS EXIGIDAS PARA O FECHAMENTO, BEM COMO, PROBLEMAS DE CONTROLE E MEDIDAS, FAZEM COM QUE ESTE MÉTODO SEJA POUCO APLICADO.

COM A FINALIDADE APENAS DE ILUSTRAÇÃO, CONSIDEREMOS A FIGURA 2.7 QUE REPRESENTA UM ESQUEMA (MONOFÁSICO) DE UM DISJUNTOR EQUIPADO COM DOIS RESISTORES EM DEGRAU.

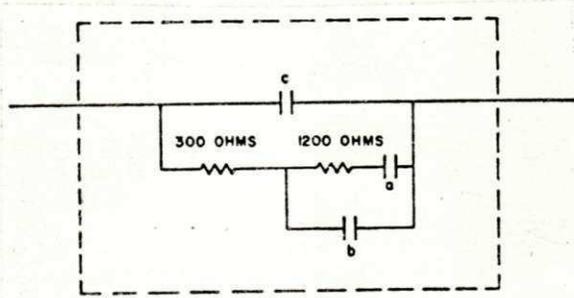


FIGURA 2.7

ADMITAMOS QUE OS DOIS RESISTORES SÃO 1.200 E 300 OHMS, NO DIAGRAMA O CONTACTO A FECHA PRIMEIRO, INSERINDO UMA RESISTÊNCIA TOTAL DE 1.500 OHMS NAS TRÊS FASES, O CONTACTO FECHARÁ, SHUNTANDO O RESISTOR DE 1.200 OHMS E INSERINDO O DEGRAU DE 300 OHMS, A REMOÇÃO FINAL DO RESISTOR ESTÁ RELACIONADA COM O CONTACTO PRINCIPAL.

O CONTROLE IDEAL PARA OS CONTACTOS DO DISJUNTOR DEVE TER UMA DETERMINADA SEQUÊNCIA, SENDO IMPOSSÍVEL OBTER ESTE CONTROLE IDEAL EM VIRTUDE DA TECNOLOGIA DE CONTROLE ATUAL PARA DISJUNTORES.

A SEQUÊNCIA DESTES CONTROLES IDEAL SERIA PARA OCORRER DA SEGUINTE FORMA: O CONTACTO A FECHARIA INSERINDO O RESISTOR DE 1.500 OHMS PARA O INSTANTE DE TEMPO EM QUE A TENSÃO NA BARRA FOSSE IGUAL À TENSÃO, EXISTINDO NA LINHA ABERTA, OU SEJA, A TENSÃO ATRAVÉS DO CONTACTO É

APROXIMADAMENTE ZERO. O CONTACTO FECHARIA QUANDO A TENSÃO ATRAVÉS DO RESISTOR DE 1.500 OHMS FOSSE ZERO E O CONTACTO FECHARIA QUANDO A TENSÃO ATRAVÉS DO RESISTOR DE 300 OHMS FOSSE ZERO.

ESTE DISJUNTOR CONTROLADO TEM SIDO INVESTIGADO E ESTUDOS SÃO FEITOS PARA QUE O FECHAMENTO DOS CONTACTOS PRINCIPAIS SEJA CONTROLADO PARA FECHAR APROXIMADAMENTE EM TORNO DO PONTO DE TENSÃO ZERO ATRAVÉS DO ÚLTIMO DEGRAU DE RESISTÊNCIA.

O MAIOR PROBLEMA CONTUDO, TEM SIDO SOBRE AS DIMENSÕES DO RESISTOR E O TEMPO EM QUE OS RESISTORES DEVEM SER INSERIDOS NO CIRCUITO.

2.3 - COMO O TRANSFORMADOR FICA SOLICITADO A ESTAS SOBRE -

TENSÕES

CONSIDEREMOS A FIGURA 2.8 QUE REPRESENTA ESQUEMATICAMENTE UM ENROLAMENTO UNIFORME DE UM TRANSFORMADOR.

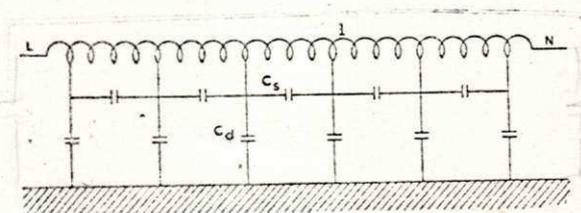


FIGURA 2.8

ONDE C_s REPRESENTA AS CAPACITÂNCIAS SÉRIE ENTRE FUNÇÕES DE PONTOS ADJACENTES DE ELEMENTOS E C_d AS CAPACITÂNCIAS DE ELEMENTOS PARA TERRA COEFICIENTE DE SELF-INDUÇÃO RELATIVO A CADA ELEMENTO.

PARA OS FENÔMENOS DE FREQUÊNCIA MUITO ALTA, AS CORRENTES NAS SELF SÃO DESPREZÍVEIS EM RELAÇÃO ÀS CORRENTES NOS CAPACITORES DESTE MODO O ENROLAMENTO REAGE COMO UM SISTEMA CAPACITIVO.

PARA OS FENÔMENOS A FREQUÊNCIA MAIS BAIXAS, AS CORRENTES NOS CAPACITORES VÊM A SER DESPREZÍVEIS EM RELAÇÃO ÀS CORRENTES NAS SELF, O ENROLAMENTO SE COMPORTA COMO UMA INDUTÂNCIA PURA.

OS FENÔMENOS ORIGINADOS DA QUEDA DO RAI O E DE MANOBRA NOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO, SÃO REPRESENTADAS POR ONDAS TRANSITANTES QUE DIFEREM EM FORMA E EM DURAÇÃO, CONSEQUENTEMENTE ATINGINDO O ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR DE MANEIRA DIFERENTE.

O SURTO DE MANOBRA SE DISTRIBUI NO ENROLAMENTO SOMENTE EM FUNÇÃO DAS INDUTÂNCIAS E NÃO CAUSA OSCILAÇÕES DE ELEVADA MAGNITUDE. ENTRETANTO, DEVIDO A SUA DURAÇÃO SER MAIOR QUE A REFERENTE À TENSÃO DE IMPULSO (QUEDA DE RAI O), AQUELA SOLICITA COM MAIOR SEVERIDADE O ISOLAMENTO CONTRA MASSA.

AS TENSÕES DE IMPULSO AFETAM O ISOLAMENTO PRINCIPALMENTE ENTRE SEÇÕES DO ENROLAMENTO, TAIS COMO (ENTRE ESPIRAS ENTRE BOBINAS, ENTRE CAMADAS, ENTRE TAPS), DEVIDO A TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES. PASSANDO DA DISTRIBUIÇÃO INICIAL À FINAL, EM CUJO PERÍODO INTERMEDIÁRIO A DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL SE PROCESSA POR UMA SÉRIE DE OSCILAÇÕES NO ESPAÇO E NO TEMPO, HAVENDO TROCAS DE ENERGIA ENTRE O CIRCUITO DAS CAPACITÂNCIAS E DAS INDUTÂNCIAS DO ENROLAMENTO.

DO EXPOSTO, CONCLUI-SE QUE OS TRANSFORMADORES DEVEM SER TRATADOS A ESTAS SOBRETENSÕES, DESDE QUE SOLICITAM DIFERENTEMENTE UMA DETERMINADA E DIVERSA PARTE DA SUA ESTRUTURA ISOLANTE INTERNA.

2.4 - SOBRETENSÕES CAUSADAS POR FERRORESONÂNCIA

AS LIGAÇÕES DE CABOS SUBTERRANEOS A TRANSFORMADORES TÊM ASSUMIDO ATUALMENTE UM PAPEL MUITO IMPORTANTE EM SISTEMAS MODERNOS.

OS TRANSFORMADORES CUJOS ENROLAMENTOS DE ALTA TENSÃO ESTÃO LIGADOS EM "DELTA-ESTRÊLA" OU ESTRÊLA, SÃO ALIMENTADOS POR MEIO DE CABOS DE ALGUMAS CENTENAS DE PÉS, A PARTIR DE UM POLO TERMINAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO AÉREA. O CONJUNTO CABO-TRANSFORMADOR É PROTEJIDO POR CHAVES FUSÍVEIS INSTALADAS NESTE POLO TERMINAL. A FIGURA 2.2 ILUSTRA ESTA A-

PLICAÇÃO.

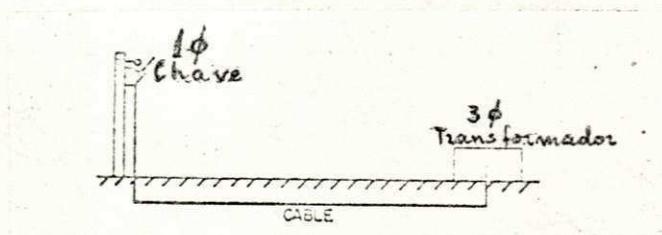


FIGURA 2.9

SISTEMA GERAL

O CABO SUBTERRÂNEO REPRESENTADO PELA SUA CAPACITÂNCIA PARA TERRA, PODE SER PÔSTO EM SÉRIE COM A REATÂNCIA MAGNETIZANTE DO TRANSFORMADOR QUANDO SOMENTE UMA OU DUAS FASES ESTÃO ENERGIZADAS. DESTE MODO ESTE CIRCUITO NÃO LINEAR 2-C ENTRA EM RESSONÂNCIA PRODUZINDO ELEVADAS TENSÕES NO TERMINAL OU TERMINAIS ABERTO(S) DO TRANSFORMADOR.

ESTE FENÔMENO É GERALMENTE CHAMADO DE "FERRO-RESONÂNCIA", DO QUAL TRATAREMOS NO CAPÍTULO VI.

2.5 - OUTROS TIPOS DE SOBRETENSÃO

APESAR DE CONSIDERARMOS NESTE TRABALHO APENAS OS TRÊS TIPOS ANTERIORMENTE MENCIONADOS PARA EFEITO DA ANÁLISE DE TESTES EM TRANSFORMADORES, FAREMOS REFERÊNCIA A TÍTULO DE ILUSTRAÇÃO DE OUTROS TIPOS DE SOBRETENSÃO QUE TAMBÉM SÃO FATORES DE GRANDE IMPORTÂNCIA NO ESTABELECIMENTO DOS DETALHES CONSTRUTIVOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO E DOS EQUIPAMENTOS, BEM COMO NA SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS PROTETORES E PÁRA-RAIOS.

MENCIONAREMOS OS SEGUINTE TIPOS:

- A) SOBRETENSÕES DEVIDAS A FALHAS NO SISTEMA
- B) SOBRETENSÕES RESULTANTES DE UMA FALHA PARA TERRA COM DESCARGAS INTERMITENTES.

- c) SOBRETENSÕES HARMÔNICAS PARA A TERRA
 d) SOBRETENSÕES DEVIDAS A DISPARO DE GERADORES

A) SOBRETENSÕES DEVIDAS A FALHAS NO SISTEMA

NA ANÁLISE BREVE QUE FAREMOS CONSIDEREMOS DOIS CASOS:

- O SISTEMA É DE NEUTRO ISOLADO: SE HOVER UMA FALHA NO SISTEMA COMO EXEMPLO UMA FASE EM CONTATO COM A TERRA RESULTANTE DE UMA FALHA SÓLIDA OU UMA DESCARGA DISRUPTIVA, A TENSÃO ENTRE ESTA FASE DEFEITUOSA E A TERRA TORNA-SE IGUAL A ZERO, ENQUANTO A TENSÃO ENTRE AS OUTRAS DUAS FASES BOAS E A TERRA TORNA-SE IGUAL À TENSÃO ENTRE FASES EM CONDIÇÕES NORMAIS OU MESMO MAIOR.

- O SISTEMA É DE NEUTRO ATERRADO: PARA A MESMA SITUAÇÃO ANTERIOR, A TENSÃO ENTRE A FASE DEFEITUOSA E A TERRA TORNA-SE ZERO, MAS AGORA A TENSÃO ENTRE AS FASES BOAS E A TERRA NÃO ATINGE O VALOR DA TENSÃO ENTRE FASES DO SISTEMA EM CONDIÇÕES NORMAIS.

QUANDO OS NEUTROS DO SISTEMA SÃO ATERRADOS AS TENSÕES QUE PODEM APARECER ENTRE AS FASES NÃO DEFEITUOSAS E A TERRA, DEPENDEM DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA E DO MÉTODO DE ATERRAMENTO EMPREGADO. ESTAS TENSÕES PODEM VARIAR ENTRE GRANDES LIMITES DE UM SISTEMA PARA OUTRO, OU MESMO NO PRÓPRIO SISTEMA PARA FALHAS EM PONTOS DISTINTOS.

OS FATORES PRINCIPAIS QUE MAIS INFLUEM NA MAGNITUDE DE TENSÃO SÃO AS RELAÇÕES ENTRE AS COMPONENTES DA IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO, R_0 E X_0 , E A REATÂNCIA SUBTRANSITÓRIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA X_1 . A RELAÇÃO X_0/X_1 É FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA E DA MANEIRA COMO O NEUTRO OU NEUTROS SÃO ATERRADOS. COMUMENTE NA ANÁLISE CONSIDERA-SE IGUAIS AS COMPONENTES DA IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA, ISTO É, $X_1 = X_2$ E $R_1 = R_2$.

- OS MÉTODOS DE ATERRAMENTO DO NEUTRO SÃO:

- NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO
- NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE REATÂNCIA
- NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE RESISTÊNCIA
- NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE NEUTRALIZADORES DE FALHA PARA TERRA, OU BOBINA DE PETERSEN.

OS TRÊS PRIMEIROS MÉTODOS, FAZEM A REATÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO INDUTIVA, A RELAÇÃO X_0/X_1 , É PORTANTO POSITIVA. EM CONDIÇÕES DE DEFEITO, A TENSÃO ENTRE FASE E TERRA DIFICILMENTE EXCEDE A TENSÃO ENTRE FASES EM CONDIÇÕES NORMAIS, E NA MAIORIA DOS SISTEMAS PROVALVEMENTE É INFERIOR.

O ÚLTIMO MÉTODO DE ATERRAMENTO ATRAVÉS DE NEUTRALIZADORES DE DEFEITO, COM RESISTÊNCIA DESPREZÍVEL, X_0 É INFINITA, COM RESISTÊNCIA, R_0 É MUITO GRANDE, ENQUANTO X_0 É TAMBÉM MUITO GRANDE E POR SINTONIZAÇÃO PODE SER NEGATIVA OU POSITIVA.

EM CONDIÇÃO DE PRECISA SINTONIZAÇÃO, A TENSÃO ENTRE FASE E TERRA EM CONDIÇÕES DE DEFEITO DE SOMENTE UMA FASE PARA A TERRA É IGUAL A TENSÃO ENTRE FASES EM CONDIÇÕES NORMAIS.

COM O SISTEMA FORA DE SINTONIZAÇÃO, A TENSÃO SERÁ SUPERIOR À TENSÃO ENTRE FASES.

PARA SISTEMA DE NEUTRO ISOLADO A REATÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO É CAPACITIVA E A RELAÇÃO X_0/X_1 É PORTANTO NEGATIVA. SOB CONDIÇÕES DE FALHA A TENSÃO ENTRE FASE E TERRA PODE SER SUPERIOR À TENSÃO ENTRE FASES EM CONDIÇÕES NORMAIS.

B) SOBRETENSÕES RESULTANTES DE UMA FALHA PARA TERRA COM DESCARGAS INTERMITENTES

NESTE CASO AS SOBRETENSÕES PODEM ATINGIR ENTRE 2,5 A 4 VÊZES A TENSÃO ENTRE FASE E NEUTRO, EM SISTEMAS NÃO ATERRADOS, PARA SISTEMAS SOLIDAMENTE LIGADOS A TERRA, É PRÁTICA-

MENTE ZERO.

c) SOBRETENSÕES HARMÔNICAS PARA A TERRA

ESTAS SOBRETENSÕES PARA TERRA PODEM SURTIR EM CONDIÇÕES DE FALHA EM LINHAS LEVEMENTE CARREGADAS ENERGIZADAS POR GERADORES COM ENROLAMENTOS AMORTECEDORES NOS QUAIS A RELAÇÃO X''_Q / X''_D É BASTANTE ELEVADA.

d) SOBRETENSÕES DEVIDAS AO DISPARO DE GERADORES ELÉTRICOS

QUANDO GERADORES ELÉTRICOS ALCANÇAM A VELOCIDADE DE DISPARO, A TENSÃO PODE ATINGIR VALORES ELEVADOS DE ORDEM DE L 120 A 200 % DA TENSÃO NORMAL ENTRE FASES.

DO EXPOSTO, VERIFICAMOS QUE PARA O CASO PARTICULAR DE TESTES EM TRANSFORMADORES, QUE NOS PROPOMOS A ESTUDAR, CONSIDERAREMOS SOMENTE AS SOBRETENSÕES CAUSADAS POR DESCARGA ATMOSFÉRICAS, OPERAÇÃO DE MANOBRA E PELO FENÔMENO DA FERRORESONÂNCIA.

CAPÍTULO III

ENSAIOS A IMPULSO ATMOSFÉRICO

3.1- FORMA DE ONDA

DAS PESQUISAS REALIZADAS NO CAMPO, ACOMPANHADAS DE ESTUDOS TEÓRICOS, ESTABELECEU-SE QUE ONDAS DE TENSÃO ASSOCIADAS COM AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS VARIAM CONSIDERAVELMENTE EM FORMA E MAGNITUDE.

COMO RESULTADO, PODEM SER REPRESENTADAS POR UMA CURVA CARACTERIZADA PELOS SEGUINTE PARÂMETROS:

- A) FRENTE DE ONDA: PARTE ASCENDENTE DA CURVA QUE É CARACTERIZADA PELO SEU VALOR MÁXIMO E_M
- B) TEMPO T_1 : TEMPO NECESSÁRIO PARA QUE A TENSÃO CRESÇA DESDE O SEU VALOR 0 ATÉ O VALOR E_M
- C) TEMPO T_2 : TEMPO NECESSÁRIO PARA QUE A TENSÃO DECRESCA ATÉ O VALOR $0,5 E_M$, CARACTERIZANDO A PARTE DESCENDENTE DA CURVA, TAMBÉM CHAMADA DE CAUDA DA ONDA.

A ANÁLISE DOS DADOS COLHIDOS EM LABORATÓRIO, INDICARAM QUE A MAIORIA DAS FRENTE DE ONDA ESTÁ COMPREENDIDA ENTRE 0,1 A 6 MICROSEGUNDOS, E QUE OS TEMPOS ATÉ A METADE DO VALOR, ENTRE 5 E 117 MICROSEGUNDOS, COM MAIOR PREDOMINÂNCIA ENTRE 5 E 50 MICROSEGUNDOS.

DOS FATOS APRESENTADOS, DECIDIU-SE ADOTAR UMA ONDA PADRONIZADA PARA REPRESENTAR OS SURTOS DE TENSÃO DEVIDO AOS RAIOS, DE TAL FORMA A SER UTILIZADA NA INDUSTRIA PELA SUA REPRODUÇÃO EM LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO.

DUAS FORMAS DE ONDA FORAM PADRONIZADAS NOS ESTADOS UNIDOS, UMA DAS QUAIS ESTÁ INDICADA NA FIGURA 3.1.

ASA - 1.5×40 MICROSEGUNDOS

IEC - 1.2×50 MICROSEGUNDOS

ONDE (ASA 1.5 - IEC 1.2), REPRESENTA O TEMPO DE FRENTE E (ASA 40 - IEC 50), É O TEMPO DE CAUDA.

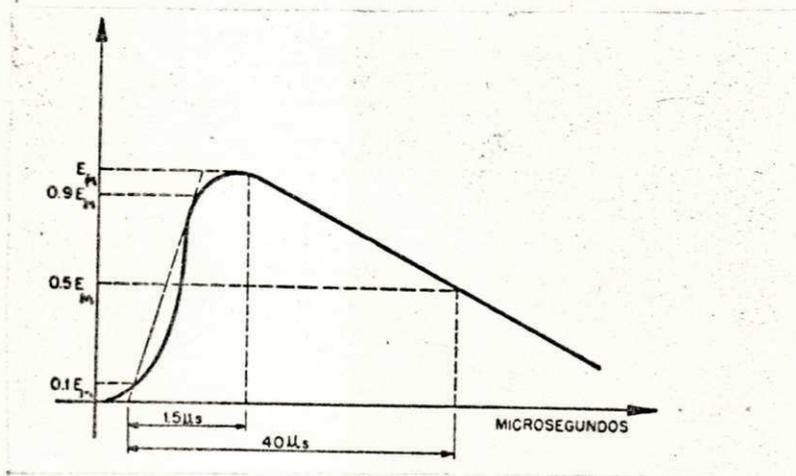


FIG. 3.1
ONDA PADRÃO

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS A DOTOU A ONDA 1.5×40 MICROSEGUNDOS PARA ESTE TIPO DE ENSAIO.

DE CONFORMIDADE COM A NORMA MB 128 DA ABNT É PERMITIDO UM TEMPO DE FRENTE DE ONDA DE NO MÁXIMO 2,5 MICROSEGUNDOS, CONSIDERADO DESDE O ZERO VIRTUAL ATÉ O PICO DA ONDA. O TEMPO A PARTIR DO ZERO VIRTUAL ATÉ O PONTO NA CAUDA CORRESPONDENTE A $0.5 E_M$, NÃO DEVE SER INFERIOR A 40 MICROSEGUNDOS, GERALMENTE A CAUDA NÃO ULTRAPASSA 60 MICROSEGUNDOS, VIDE FIGURA 3.2.

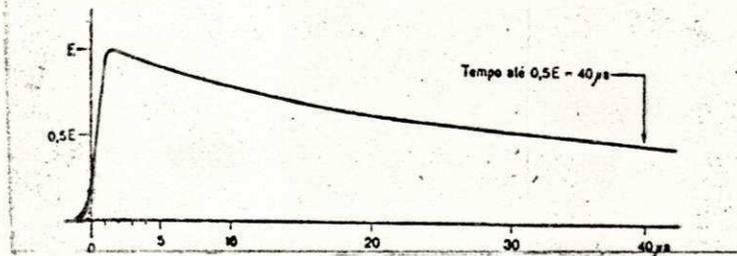


FIG. 3.2

ZERO VIRTUAL E TEMPO DE CRISTA

O VALOR DE PICO DA TENSÃO É ESTABELECIDO EM FUNÇÃO DA CLASSE DE TENSÃO DE ISOLAMENTO.

ESTES VALORES SÃO ESTABELECIDOS PELA NORMA EB-91 DA ABNT, CONFORME A TABELA (3.1).

(VIDE TABELA 3.1 NA FOLHA SEGUINTE)

TABELA 3,1

Classe de Tensão de Isolamento	Ensaio Dielétrico de Impulso		
	Onda Plena	Onda Cortada	
	kV Valor Eficaz	kV Tensão de Crista	kV Tensão de Crista
1.2	45	54	1.5
2.5	—	—	—
5.0	75	88	1.6
8.66	95	110	1.8
15	110	130	2.0
25	150	175	3.0
34.5	200	230	3.0
46	250	290	3.0
69	350	400	3.0
92	450	520	3.0
115	550	630	3.0
138	650	750	3.0
161	750	865	3.0
196	900	1035	3.0
230	1050	1210	3.0
287	1300	1500	3.0
345	1550	1785	3.0

ASSIM, POR EXEMPLO, UM ENROLAMENTO DO TRANSFORMADOR DA CLASSE DE TENSÃO DE 69 KV, RECEBERÁ UMA ONDA DE 1.5 X 40 MICROSEGUNDOS COM VALOR DE CRISTA DE 350 KV.

3.2 - TIPOS DE ONDA PARA ENSAIO DE IMPULSO

OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA PARA IMPULSO, PARA TRANSFORMADORES, INCLUEM TRÊS TIPOS DE ONDA:

- 1) ONDA PLENA
- 2) ONDA CORTADA
- 3) ONDA ESCARPADA

CONFORME INDICADO NA FIGURA 3.3.

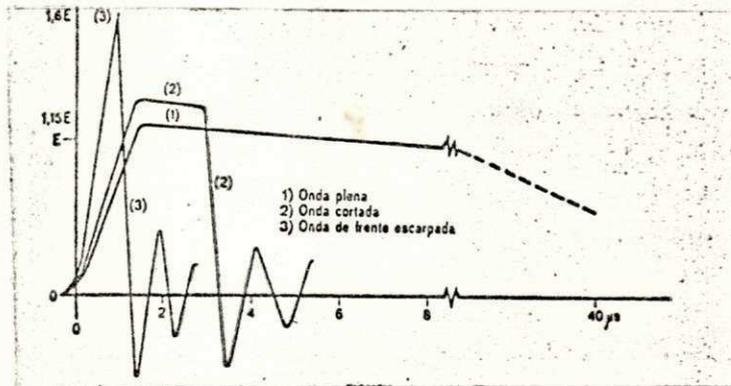


FIG.3.3.

A ONDA PLENA DE IMPULSO TEM UMA TENSÃO DE CRISTA MAIS BAIXA QUE UMA ONDA DE $1,5 \times 40$ MICROSEGUNDOS QUE CAUSA UMA DESCARGA DISRUPTIVA.

A ONDA QUE É CORTADA NA CRISTA OU LIGEIRAMENTE APÓS A CRISTA PELA DESCARGA DISRUPTIVA DE UM CENTELHADOR EM PARALELO COM O TRANSFORMADOR, É CHAMADA DE ONDA CORTADA. COMPREENDE UMA ONDA DE TENSÃO DE IMPULSO DE $1,5 \times 40$ MICROSEGUNDOS, CERCA DE 15% SUPERIOR À TENSÃO DE CRISTA DA ONDA PLENA.

A DESCARGA DISRUPTIVA DO CENTELHADOR E RESULTANTE CORTE DA ONDA, NÃO DEVE OCORRER ANTES DE UM TEMPO ESPECIFICADO, NA TABELA (1), O QUAL VARIA ENTRE 1,5 A 3 MICROSEGUNDOS, DEPENDENDO DA CLASSE DE TENSÃO DO TRANSFORMADOR.

QUANDO O VALOR DA TENSÃO DE CRISTA DA ONDA FOR MUITO MAIOR QUE O VALOR DA TENSÃO DE DESCARGA DISRUPTIVA CRÍTICA, (OU CERCA DE 50% OU 60% DA TENSÃO DE CRISTA DA ONDA PLENA), A ONDA É CORTADA NA FRENTE ANTES DE ALCANÇAR A

CRISTA, ELA É ENTÃO CHAMADA DE ONDA ESCARPADA.

O ENSAIO COM ESTE TIPO DE ONDA, TINHA JUSTIFICATIVA QUANDO TENSÕES DE IMPULSO COM FRENTES DE ONDA MUITO RÁPIDAS PODIAM ENTRAR NAS SUBESTAÇÕES E DESCARREGAREM-SE NAS BUCHAS DOS TRANSFORMADORES OU NOS "ROD-GAP" DAS MESMAS.

ATUALMENTE OS TRANSFORMADORES DE ALTISSÍMAS TENSÕES SÃO INSTALADOS EM MODERNAS SUBESTAÇÕES BLINDADAS E PROTEGIDOS TAMBÉM POR MODERNOS PÁRA-RAIOS DE CARACTERÍSTICAS TENSÃO-TEMPO PRATICAMENTE ACHATADAS, DE TAL FORMA QUE NÃO FICAM EXPOSTOS A TAIS TENSÕES E TRANSITÓRIOS DE MAGNITUDES ELEVADAS.

ESTA PROTEÇÃO EFETIVAMENTE ELIMINA A POSSIBILIDADE DO APARECIMENTO DESTES TRANSITÓRIOS TÃO SEVEROS AO TRANSFORMADOR.

ASSIM SENDO, O ENSAIO DE IMPULSO COM ONDA ESCARPADA, PODE SER CONSIDERADO UM ANACRONISMO E DEVERIA SER EXTINTO DE TODAS AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS.

O TESTE DE IMPULSO COM ONDA CORTADA TEM JUSTIFICAÇÃO, POIS UM EQUIPAMENTO NA SUBESTAÇÃO PODE DESCARREGAR, PRODUZINDO UMA TENSÃO DE IMPULSO COM UMA FORMA DE ONDA ANÁLOGA.

QUANDO ISTO OCORRE, O VALOR DE CRISTA DA TENSÃO DE IMPULSO É IGUAL OU INFERIOR AO NÍVEL DE PROTEÇÃO DO PÁRA-RAIO, MOTIVO PELO QUAL A MAGNITUDE DA TENSÃO DE ENSAIO COM ONDA CORTADA DEVERIA SER IGUAL A DO ENSAIO COM ONDA PLENA.

O VALOR DA TENSÃO DE ENSAIO COM ONDA PLENA NÃO DEVERIA EXCEDER A MAIS QUE UMA RAZOÁVEL MARGEM DE SEGURANÇA DO NÍVEL DE PROTEÇÃO DO PÁRA-RAIO QUE PROTEJE O TRANSFORMADOR, CUJA ESCOLHA DEPENDE DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA E PARTICULARMENTE DA EFICIÊNCIA DO ATERRAMENTO.

COMO REGRA GERAL, O SISTEMA DEVE SER CONSIDERADO COMO EFETIVAMENTE ATERRADO, A FIM DE PERMITIR A APLICAÇÃO

ÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE 80% OU 75%.

O PÁRA-RAIO DE 80%, CORRESPONDENDO APROXIMADAMENTE 140% DA TENSÃO ENTRE FASE-TERRA DO SISTEMA, PODE SER USADO QUANDO A RELAÇÃO ENTRE A IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO E A IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA DO SISTEMA ESTÁ COMPREENDIDA ENTRE 1 (UM) E 3 (TRÊS), E A RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO E A RESISTÊNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA ESTÁ COMPREENDIDA ENTRE 0.5 A 1.5.

O PÁRA-RAIO DE 75%, CORRESPONDENDO APROXIMADAMENTE A 130% DA TENSÃO FASE-TERRA DO SISTEMA, PODE SER USADO QUANDO AS RELAÇÕES SEQUÊNCIAS SÃO MENORES; POR EXEMPLO

$$\frac{X_0}{X_1} = 0 \text{ A } 1.0$$

$$\frac{R_0}{X_1} = + 0.5$$

UM VALOR QUE É ATRIBUÍDO COMO SENDO UMA SUFICIENTE MARGEM DE SEGURANÇA É DE 1.20, QUE PODE SER REDUZIDO PARA 1.15, CASO SE LEVE EM CONTA, AS QUEDAS DE TENSÃO NO BARRAMENTO DE ALTA TENSÃO E NO CIRCUITO DE TERRA.

OBSERVAMOS QUE ESTAS ONDAS DIFEREM EM FORMA E EM DURAÇÃO, PORTANTO SOLICITAM DIFERENTEMENTE O ISOLAMENTO INTERNO DO TRANSFORMADOR.

A ONDA PLENA, DEVIDO A SUA MAIOR DURAÇÃO, CAUSA MAIORES OSCILAÇÕES, SOLICITANDO O ISOLAMENTO NÃO SÓ ENTRE ESPIRAS, ENTRE SEÇÕES, MAS ESTABELECE TENSÕES RELATIVAMENTE ELEVADAS EM GRANDE PARTE DO ENROLAMENTO E SOLICITANDO-O CONTRA A MASSA.

A ONDA CORTADA PRODUZ MENOS OSCILAÇÕES, POR TER

DURAÇÃO MENOR, NÃO PRODUZINDO TÃO ELEVADAS TENSÕES ENTRE ENROLAMENTO-MASSA, MAS PELO FATO DE TER MAIOR AMPLITUDE, PRODUZ DESCARGA NO ROD-GAP, CAUSANDO MAIORES SOLICITAÇÕES AO ISOLAMENTO ENTRE ESPIRAS E ENTRE SEÇÕES.

QUANTO À ONDA ESCARPADA, POR TER DURAÇÃO AINDA MAIS CURTA, PRODUZ PORISSO MENORES TENSÕES ENTRE ENROLAMENTO-MASSA, CONTUDO A SUA AMPLITUDE É MAIS ELEVADA, SOLICITANDO PORTANTO MAIS SEVERAMENTE O ISOLAMENTO ENTRE ESPIRAS E ENTRE SEÇÕES, DO QUE A ONDA CORTADA.

NA TABELA II, (PÁGINA SEGUINTE), ESTÃO LISTADOS OS VALORES DE TENSÃO DE ENSAIO DE IMPULSO E AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS PÁRA-RAIOS MODERNOS.

3.3 - APLICAÇÃO DE ONDAS NO ENSAIO DE IMPULSO EM TRANSFORMADORES

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, RECOMENDA PELA NORMA MB-128, A SEGUINTE ORDEM DE APLICAÇÃO DE ONDAS DE IMPULSO:

1º) APLICAÇÃO DE UMA ONDA PLENA REDUZIDA, CUJO VALOR DE CRISTA ESTÁ COMPREENDIDO ENTRE 50% A 70% DO VALOR DE CRISTA DE ONDA PLENA.

ESTA ONDA TEM A FINALIDADE DE VERIFICAR A RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DO GERADOR DE IMPULSO E A FORMA DE ONDA REGISTRADA NO OSCILÓGRAFO. FORNECE INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA UMA CORREÇÃO NA FORMA DA ONDA, POIS ESTA PODE SER DISTORCIDA DEVIDO ÀS CAPACITÂNCIAS E INDUTÂNCIAS DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR.

2º) APLICAÇÃO DE DUAS ONDAS CORTADAS

3º) APLICAÇÃO DE UMA ONDA PLENA

EVENTUALMENTE PODERÁ SER EXIGIDO A APLICAÇÃO DE UMA ONDA ESCARPADA, QUANDO FÔR O CASO, ELA É APLICA-

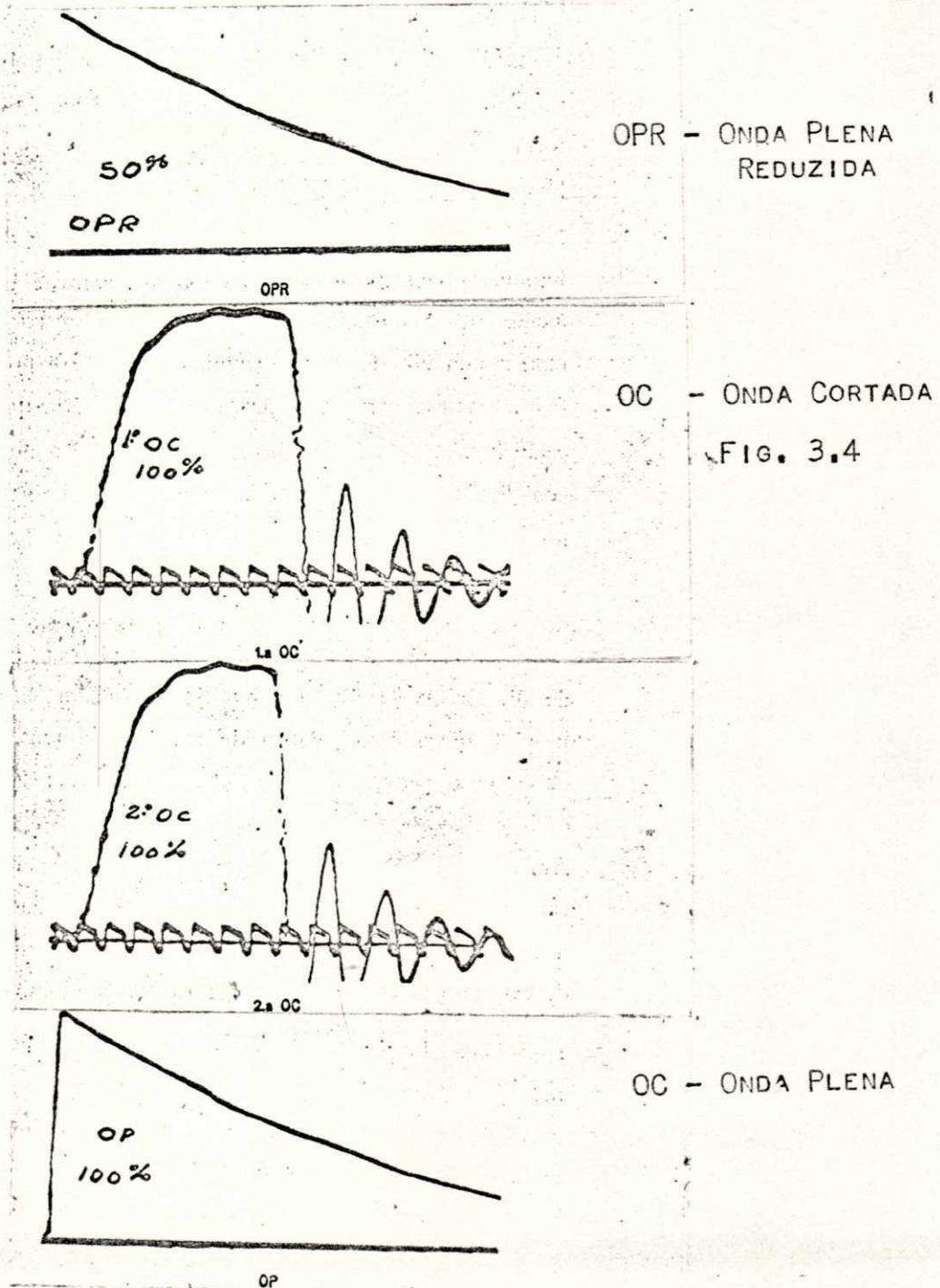
BIBLIOTECA
CENTRO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA

TABELA 3.2.

TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA KV	TENSÃO NOMINAL DO PÁRA-RAIO		TENSÃO MÁX. DE DESCARGA	TENSÃO RESIDUAL A IMPULSO		1.2 X TENSÃO DA COLUNA 6	VALORES DE TESTE ESCOLHIDO ENTRE OS DO IEC
	COEF. FALHA PARA TERRA KV	%	A IMPULSO	COM 10 KA	COM 15 KA	KV	À IMPULSO
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
245	180	75	440	406	428	514	550
	192	80	460	434	457	548	550
	228	94	550	500	545	654	750
362	258	71	623	584	615	738	750
	276	76	672	624	658	790	850
	312	86	761	706	738	885	950
420	336	80	810	750	780	937	950
525	396	76	955	885	950	1140	1175
	420	80	1010	940	1005	1205	1300
	468	89	1130	1040	1110	1330	1425
765	588	77	1400	1332	1410	1690	1800
	636	83	1590	1465	1560	1870	1950

DA ANTES DAS ONDAS CORTADAS.

A FIGURA (3,4) , INDICA A SEQUÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ONDAS DE IMPULSO, QUANDO DO ENSAIO DE UM TRANSFORMADOR.



3.4 - CIRCUITO PARA ENSAIO DE IMPULSO

AS ONDAS SÃO PRODUZIDAS POR UM GERADOR DE IMPULSO, REPRESENTADO POR CIRCUITO MARX (VIDE FIGURA 3.5) CUJO CIRCUITO CONSISTE BASICAMENTE DE UMA COMBINAÇÃO DE CAPACITORES, RESISTORES E CENTELHADORES.

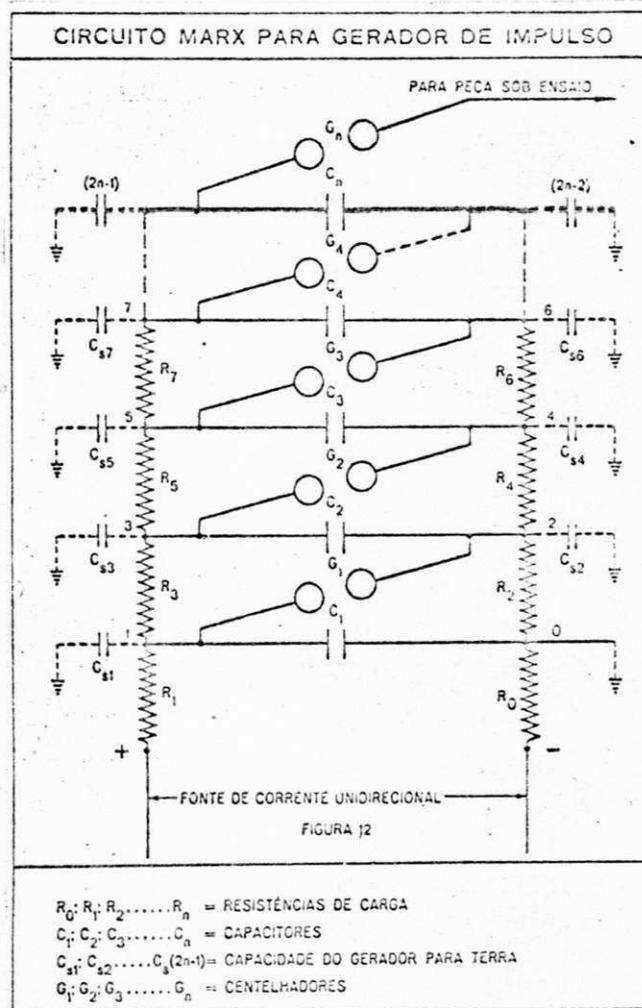


FIG. 3.5.

UM GRUPO DE (N) CAPACITORES É CARREGADO EM PARALELO ATÉ UMA TENSÃO (E) DE CORRENTE CONTÍNUA E DEPOIS DESCARREGAM EM SÉRIE ATRAVÉS DE UM GRUPO DE CENTELHADORES.

A MAGNITUDE DA TENSÃO (E) DE DESCARGA É DETERMINADA PELA TENSÃO INICIAL (E) NECESSÁRIA PARA CARREGAR OS CAPACITORES, E PELO NÚMERO (N) DE CAPACITORES, E PELO NÚMERO DE CENTELHADORES.

SEM LEVAR EM CONTA AS OSCILAÇÕES PODEMOS ESCREVER:

$$E = N \cdot e$$

A FORMA DE ONDA É DETERMINADA PELOS PARÂMETROS DO GERADOR DE IMPULSO E PELA IMPEDÂNCIA DA CARGA,

A IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR PODE SER REPRESENTADA POR UMA MALHA DE INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA,

A FIGURA (3.6.) REPRESENTA O CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR E INDICA TAMBÉM OS PARÂMETROS DO GERADOR DE IMPULSO.

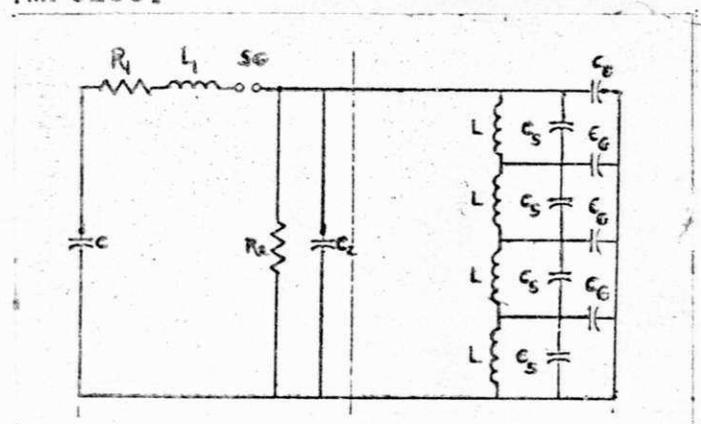


FIG. 3.6

PARA SE FAZER A ANÁLISE DO CIRCUITO, CONSIDERA-SE UM CAPACITOR C REPRESENTANDO O TOTAL DE CAPACITÂNCIAS SÉRIES DO GERADOR E UMA INDUTÂNCIA L_S O TOTAL DAS INDUTÂNCIAS SÉRIE.

A FIGURA(3.7) REPRESENTA O CIRCUITO DE IMPULSO.

ONDE OS ELEMENTOS:

C_G = CAPACIDADE DO GERADOR DE IMPULSO

L_S = INDUTÂNCIA DISTRIBUIDA DO GERADOR DE IMPULSO

R_D = RESISTÊNCIA PARALELA E DIVISOR DE TENSÃO

R_S = RESISTÊNCIA SÉRIE

C_L = CAPACIDADE DE CARGA E DA PEÇA SOB ENSAIO

L_L = INDUTÂNCIA DO CIRCUITO E DA CARGA

G = CENTELHADOR

PE = PEÇA SOB ENSAIO

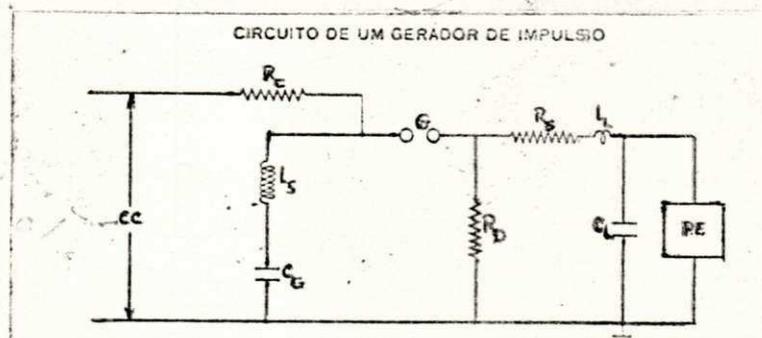


FIG. 3.7.

DIVISORES DE TENSÃO SÃO EMPREGADOS PARA REDUZIR AS ALTAS TENSÕES DE IMPULSO A VALORES QUE POSSAM SER REGISTRADOS POR UM OSCILÓGRAFO. TRÊS TIPOS DE DIVISORES PODEM SER USADO: RESISTIVO, CAPACITIVO E COMPENSADO.

NO DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO A TENSÃO VARIARIA DIRETAMENTE COM A RESISTÊNCIA, ENQUANTO NO DIVISOR DE

TENSÃO CAPACITIVO A TENSÃO VARIA INVERSAMENTE COM A CAPACITÂNCIA. O DIVISOR DE TENSÃO COMPENSADO É UMA COMBINAÇÃO DE RESISTÊNCIAS, CAPACITÂNCIAS E ALGUMAS VÊZES INDUTÂNCIAS.

EM REFERÊNCIA À FIGURA (3.7), DEPOIS DA CAPACITÂNCIA C_G DO GERADOR DE IMPULSO SER CARREGADA A UMA TENSÃO ESTIPULADA, É INICIADA A DESCARGA DOS CENTELHADORES (G), PROVOCANDO UMA DESCARGA DO GERADOR DE IMPULSO NO CIRCUITO RESTANTE.

A TENSÃO DE DESCARGA ATRAVÉS DO DIVISOR DE TENSÃO R_D CRESCE ATÉ QUE A CAPACIDADE DO GERADOR DE IMPULSO E DA PEÇA SOB ENSAIO FICAM SUBMETIDAS AO MESMO NÍVEL DE TENSÃO. ESTA É A TENSÃO DE CRISTA E A PARTE DA ONDA ATÉ ESTE PONTO É A FRENTE DA ONDA.

DEPOIS DE SER ALCANÇADO ESTE PONTO, A CAPACIDADE DO GERADOR DE IMPULSO E DA PEÇA SOB ENSAIO AGEM EM PARALELO E DESCARREGAM ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA SÉRIE R_S E DO DIVISOR DE TENSÃO R_D . ESTA PARTE DA ONDA É DENOMINADA CAUDA.

3.5 - FRENTE DE ONDA

CONSIDERANDO-SE A FIGURA (3.7), A FRENTE DE ONDA É AFETADA PELOS PARÂMETROS: C_L , R_S , L_S , C_G RESPECTIVAMENTE CAPACITÂNCIA DA CARGA, RESISTÊNCIA SÉRIE, AUTO INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA DO GERADOR DE IMPULSO.

A RESISTÊNCIA R_S , AGE PRINCIPALMENTE NO SENTIDO DE EVITAR OSCILAÇÕES NA CRISTA DA ONDA.

O PERÍODO DAS OSCILAÇÕES É DADO POR:

$$T = 2\pi \sqrt{L_S C}$$

ONDE, $C = \frac{C_L \times C_G}{C_L + C_G}$ (ISTO SE CONSIDERARMOS NO EN -

SAIO DE IMPULSO COM ONDA PADRÃO DE $1,5 \times 50$ MICROSEGUNDOS, A CAUDA MUITO LONGA COMPARADA COM A FRENTE, SE RETIRARMOS A RESISTÊNCIA R_D , UM ÉRRO DESPREZÍVEL OCORRERÁ QUANDO DO CÁLCULO DO TEMPO DE FRENTE DE ONDA, O CIRCUITO SE SIMPLIFICA CONFORME A FIGURA (3.8).

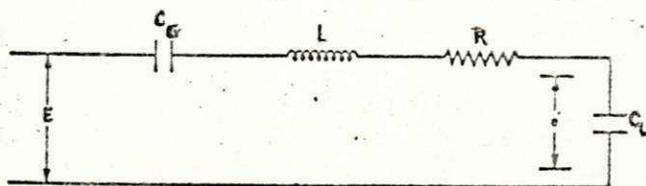


FIG. 3.8

C_G : Capacidade do gerador de impulso
 L : Indutância do circuito
 R : Resistência do circuito
 C_L : Capacidade de carga
 E : Tensão de carga
 e : Tensão de impulso

A FIGURA (3.9) MOSTRA O COMPORTAMENTO DAS OSCILAÇÕES NA FRENTE DA ONDA EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA R_S , ONDE QUATRO CASOS SÃO POSSÍVEIS DE SE REGISTRAR.

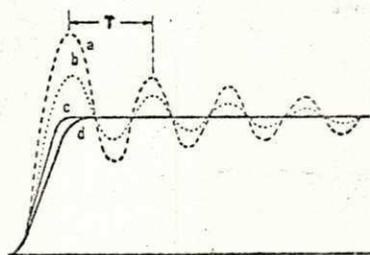


FIG. 3.9:

A) CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO SE A RESISTÊNCIA R_S FÔR OMITIDA, HAVENDO OSCILAÇÕES ENTRE L_S E C_G .

B) A DURAÇÃO E MAGNITUDE DAS OSCILAÇÕES SÃO REDUZIDAS, PELA INTRODUÇÃO NO CIRCUITO DE UMA RESISTÊNCIA R_S

C) NÃO HÁ OSCILAÇÃO, CONDIÇÃO DE AMORTECIMENTO CRÍTICO, QUANDO $R_S = 2\sqrt{L_S/C}$

D) PARA $R_S \geq \sqrt{2 L_S / C}$, HÁ UM AUMENTO DO TEMPO DESDE O ZERO ATÉ A CRISTA DA ONDA, E UMA DIMINUIÇÃO NA INCLINAÇÃO DA FRENTE DA ONDA.

A ONDA PADRONIZADA 1,5 x 40 MICROSEGUNDOS, REQUER UMA CRISTA SUAVE, PORTANTO A RESISTÊNCIA SÉRIE SATISFAZENDO ESTA EXIGÊNCIA DEVE TER UM VALOR DE $R_S \geq \sqrt{2 L_S / C}$.

FOI VERIFICADO EXPERIMENTALMENTE QUE O TEMPO DE FRENTE DA ONDA É APROXIMADAMENTE IGUAL A (3) TRÊS VÊZES A CONSTANTE DE TEMPO, OU SEJA:

TEMPO DE FRENTE = $3 R_S \times C$
CONFORME PODEMOS OBSERVAR NA FIGURA (3.10).

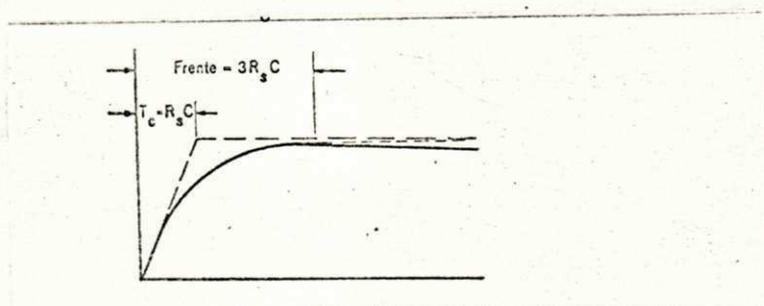


FIG. 3.10.

GERALMENTE NA PRÁTICA, A CAPACITÂNCIA C_L É CÊRCA DE 1% A 10% DE C_G , DE MODO QUE, O TEMPO DE CRISTA PODE SER DADO POR:

$$\text{TEMPO DE FRENTE} = 3 R_S \times C_G$$

3.6 - CAUDA DE ONDA

OS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM DIRETAMENTE A CAUDA ONDA, SÃO A RESISTÊNCIA (R_D) DO DIVISOR DE TENSÃO E A CAPACIDADE C_G DO GERADOR DE IMPULSO.

COMUMENTE A CAPACITÂNCIA DA CARGA C_L É PEQUE - NA COMPARADA COM C_G , E A RESISTÊNCIA R_S É DESPREZÍVEL EM RELA

ÇÃO À RESISTÊNCIA R_D DO DIVISOR DE TENSÃO, PODE-SE CONSIDERAR A CAPACITÂNCIA C_L LIGADA EM PARALELO COM A CAPACITÂNCIA C_G , O CIRCUITO FICARÁ REPRESENTADO DE ACÔRDO COM A FIGURA (3.11).

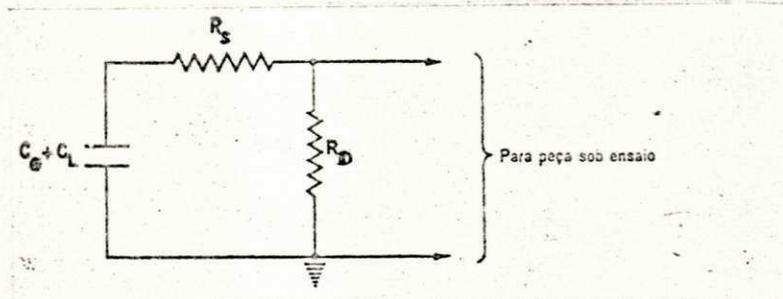


FIG. 3.11.

O TEMPO NECESSÁRIO PARA A TENSÃO DE DESCARGA ATINGIR A METADE DO VALOR, É DADO POR:

$$\text{TEMPO DE CAUDA} = 0,7 (R_D + R_S) (C_L + C_G)$$

ONDE O PRODUTO DOS TÊRMO ENTRE PARENTESIS É A CONSTANTE DE TEMPO, E PELO FATO DE R_S E C_L SEREM DE VALORES PEQUENOS, A DURAÇÃO ATÉ A METADE DO VALOR DA TENSÃO, FICARÁ ESTABELECIDO. POR:

$$\text{TEMPO DE CAUDA} = 0,7 R_D \times C_G$$

3.7. COMENTÁRIOS SOBRE O CIRCUITO DE IMPULSO

OS TRANSFORMADORES SE COMPORTAM COMO UMA CARGA INDUTIVA PARA OS GERADORES DE IMPULSO. O CIRCUITO EQUIVALENTE ESTÁ SIMPLIFICADAMENTE REPRESENTADO NA FIGURA (3.12).

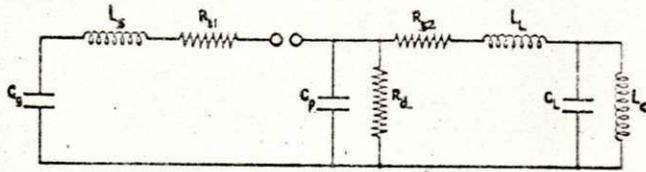


FIGURA 13

- C_g : Capacidade do gerador de impulso
- L_g : Indutância do gerador de impulso
- R_{g1} e R_{g2} : Resistências série
- C_p : Capacidade parasita para terra
- R_d : Resistência paralela (div. tensão)
- L_c : Indutância do circuito
- C_c : Capacidade de carga
- L_c : Indutância de carga

FIG. 3.12.

NESTE CIRCUITO O AMORTECIMENTO DAS OSCILAÇÕES ENTRE AS CAPACITÂNCIAS EM PARALELO E A INDUTÂNCIA DE CARGA (L_c) DEVE SER CONSEGUÍDO.

SUPONDO DESPREZÍVEL A CAPACITÂNCIA PARASITA PARA TERRA C_p E AS INDUTÂNCIAS L_L E L_S TEREMOS:

$$R_D \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_c}{C_g + C_c}}$$

PARA O CÁLCULO DA CAPACIDADE DE IMPULSO A CONDIÇÃO SEGUINTE DEVE SER SATISFEITA:

$$R_D^2 = (C_g + C_c) \leq \frac{1}{4} L_c \quad (1)$$

LA :

A INDUTÂNCIA DE CARGA É OBTIDA PELA FÓRMULA -

$$L_c = \frac{3}{2} \times \frac{U \cdot Z}{\omega P}$$

ONDE

Z = IMPEDÂNCIA

U = TENSÃO NOMINAL

P = POTÊNCIA NOMINAL

PARA A FORMA DE ONDA PADRONIZADA A RESISTÊNCIA R_D É APROXIMADAMENTE CALCULADA PELA EXPRESSÃO:

$$R_D = \frac{T_2 \times \sqrt{Z}}{C_g + C_L}$$

$T_2 = 40 \mu s$ (TEMPO ATÉ A METADE DO VALOR DA ONDA)

SUBSTITUINDO ESTE VALOR DE R_D EM (1) E FAZENDO A SIMPLIFICAÇÃO NECESSÁRIA, PODEMOS ADMITIR EM VALOR MÍNIMO PARA A CAPACIDADE DO GERADOR DE IMPULSO C_G DADO POR:

$$C_g \geq \frac{P}{U^2 Z} \quad \text{em } \mu F$$

COM O CRESCIMENTO DAS POTÊNCIAS NOMINAIS, ALGUMAS VÊZES, TORNA-SE DIFÍCIL OBTER-SE CAUDAS DE ONDA PARA 40 MICROSEGUNDOS, HAVENDO NECESSIDADE DO USO DE UMA CAPACITÂNCIA C_g MÁXIMA.

ESTA CAPACITÂNCIA MÁXIMA PODE SER OBTIDA, AJUSTANDO-SE O GERADOR DE IMPULSO DE TAL FORMA QUE AS ETAPAS SERIAM LIGADAS EM VÁRIAS DAS POSIÇÕES SÉRIE-PARALELO.

COM A FINALIDADE DE CONTORNAR ESTA DIFICULDADE, FORAM SUGERIDOS VALORES MÍNIMOS DE CAPACITÂNCIAS PARA OS VÁRIOS NÍVEIS BÁSICOS DE ISOLAMENTO, DE ACÔRDO COM A TABELA ABAIXO:

BIL (KV)	CAPACITÂNCIA MÍNIMA SUGERIDA (μF)
110	0.6
150	0.5
200	0.4
250	0.46
350	0.12
450	0.10
550	0.08
650	0.05
750	0.05
825	0.018
900	0.018
1050	0.018
1175	0.015
1300	0.015
1425	0.012
1550	0.012

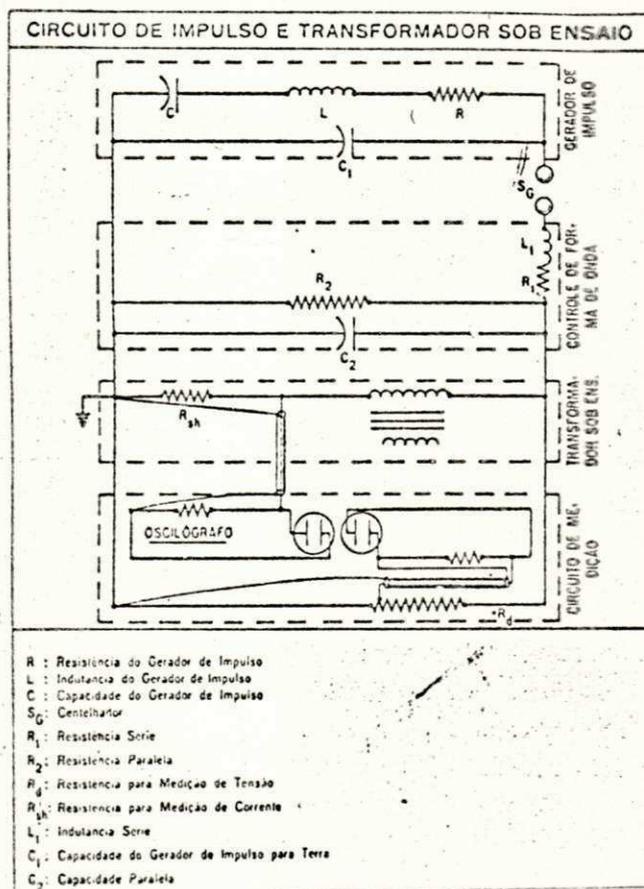
COM A FINALIDADE DE CONTORNAR ESTA DIFICULDADE, FORAM SUGERIDOS VALORES MÍNIMOS DE CAPACITÂNCIAS PARA OS VÁRIOS NÍVEIS BÁSICOS DE ISOLAMENTO, DE ACÔRDO COM A TABELA ABAIXO:

BIL (KV)	CAPACITÂNCIA MÍNIMA SUGERIDA (μF)
110	0.6
150	0.5
200	0.4
250	0.46
350	0.12
450	0.10
550	0.08
650	0.05
750	0.05
825	0.018
900	0.018
1050	0.018
1175	0.015
1300	0.015
1425	0.012
1550	0.012

3.8 - LIGAÇÕES PARA O ENSAIO DE IMPULSO

A NORMA MB-L28 DA ABNT, RECOMENDA QUE SEJAM REALIZADOS OS ENSAIOS DE IMPULSO EM CADA TERMINAL, ISOLADA - MENTE.

O TERMINAL DO ENROLAMENTO QUE ESTIVER SOB ENSAIO, DEVE SER ATERRADO DIRETAMENTE, SE FÔR NECESSÁRIO MEDI - DAS DE CORRENTES, O ATERRAMENTO SERÁ REALIZADO POR MEIO DE UM RESISTOR SHUNT, DE PEQUENA RESISTÊNCIA COMO MOSTRA A FIGU - RA(3.13).



PULSO EM QUALQUER TERMINAL DE LINHA, COM O NEUTRO ATERRADO A TRAVÉS DE IMPEDÂNCIA APROPRIADA, DE MANEIRA QUE A TENSÃO DE ONDA PLENA REQUERIDA, APAREÇA NO TERMINAL DO NEUTRO PARA TERRA. OS OUTROS ENROLAMENTOS DEVEM SER POSTOS EM CURTO-CIRCUITO PARA ESTE ENSAIO.

3.9. - DETECÇÃO DE DEFEITOS DURANTE O TESTE DE IMPULSO

DIVERSAS TÉCNICAS PARA DETECTAR DEFEITOS NOS TRANSFORMADORES FORAM DESENVOLVIDAS, ATUALMENTE OS SEGUIN -
TES MÉTODOS SÃO APLICADOS PARA ESTA FINALIDADE.

1 - EXAME DOS OSCILOGRAMAS DA ONDA DE TENSÃO DURAN -
TE O TESTE DE IMPULSO EM UMA DAS BUCHAS DO TRANSFORMADOR. QUAN -
DO O TRANSFORMADOR SOB ENSAIO APRESENTAR DESCARGA DO ENROLA -
MENTO DE A.T PARA TERRA, CURTO-CIRCUITO ENTRE CAMADAS, ETC.,
ESTES DEFEITOS PODEM SER OBSERVADOS EM PARTES DOS OSCILOGRA -
MAS DE TENSÃO DA ONDA DE IMPULSO, POIS A TENSÃO DE IMPULSO EN -
TRÁ SUBITAMENTE EM COLAPSO.

QUANDO A FALHA OCORRER NUM PONTO DISTANTE DO TER -
MINAL DE ENTRADA A TENSÃO NÃO ENTRA POR COMPLETO EM COLAPSO,
HAVERÁ UMA OSCILAÇÃO NO OSCILOGRAMA.

Um RIGOROSO EXAME DENTRE OS OSCILOGRAMAS DE ON -
DA PLENA REDUZIDA E DE ONDA PLENA DEVE SER FEITO, PARA A CONS -
TATAÇÃO DE DIFERENÇAS.

QUANDO ESTAS DIFERENÇAS EXISTEM O DEFEITO NEM SEM -
PRE ESTÁ NO TRANSFORMADOR, MAS AS VÊZES NO CIRCUITO DE IMPUL -
SO.

COMPARA-SE TAMBÉM EM TODOS OS DETALHES, OS OSCI -
LOGRAMAS DE ONDA CORTADA DE TENSÃO, PRINCIPALMENTE APÓS O COR -
TE, A PARTE ANTES DO CORTE É COMPARADA COM A ONDA PLENA REDU -
ZIDA.

2 - PRESENÇA DE BÔLHAS E FORMAÇÃO DE GÁS NO LÍQUIDO I -
SOLANTE DO TRANSFORMADOR, PODEM INDICAR UMA FALHA CONTUDO,
SE ESTAS BÔLHAS FOREM CLARAS E LÍMPIDAS NÃO SÃO NECESSARIAMEN -
TE UMA CONDIÇÃO DE DEFEITO, PODEM OCORRER EM VIRTUDE DO AR AR -
MAZENADO NO INTERIOR DO TRANSFORMADOR, NO ENTANTO DEVE SER LAN -
ÇADO MÃO DE MEIOS PARA ELIMINAR ESTE AR.

FORMAÇÃO DE GÁS (FUMAÇA), SEMPRE É UM INDICIO DE
FALHA OU DESCARGA INTERNA, QUANDO ESTE ÚLTIMO OCORRE, UM RUÍ -

DO ANORMAL É PRODUZIDO.

3 - OSCILOGRAMAS DA CORRENTE DE TERRA (MÉTODO DE CORRENTE DO NEUTRO).

CONSISTE EM INSERIR UMA RESISTÊNCIA SHUNT DE MEDIÇÃO DE CORRENTE ENTRE O TERMINAL ATERRADO DO ENROLAMENTO SOB ENSAIO E TERRA E REGISTRAR OS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE DURANTE A APLICAÇÃO DE UMA ONDA PLENA REDUZIDA E UMA ONDA PLENA.

SOBREPONDO-SE OS OSCILOGRAMAS VERIFICA-SE SE ELES CONCORDAM PLENAMENTE, SE ASSIM ACONTECER O TRANSFORMADOR PODE SER CONSIDERADO COMO ISENTO DE DEFEITOS, CASO CONTRÁRIO, HAVERÁ FALHAS NOS ENROLAMENTOS, POR MENORES QUE SEJAM AS DIVERGÊNCIAS DOS OSCILOGRAMAS.

SE A DIFERENÇA NO OSCILOGRAMA DE CORRENTE, CORRESPONDE A UMA QUEDA DE TENSÃO NO OSCILOGRAMA DE TENSÃO, ENTÃO UM SÉRIO DEFEITO EXISTE, GERALMENTE TRATA-SE DE UM CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.

É COMUM NOS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE, OCORRER PERTURBAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA, ESTAS ALTERAÇÕES PODEM SER MOTIVADAS POR:

- MAU ATERRAMENTO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR
- MAU CONTATO NO TERMINAL DA BUCHA
- CORONA NA BUCHA
- CORONA NO TRANSFORMADOR
- DEFEITO NO CIRCUITO DE IMPULSO
- DEFEITO NO OSCILÓGRAFO
- NÍVEL BAIXO DO ÓLEO
- DEFEITO NO TRANSFORMADOR
- BÔLHA DE AR

PARA A ANÁLISE DESTAS CONDIÇÕES, INICIALMENTE APLICA-SE NO MÁXIMO TRÊS ONDAS PLENAS, E OBSERVA-SE SE O

DEFEITO ENTRA EM DEGENERAÇÃO PROGRESSIVA. SE NÃO HOVER DE GERAÇÃO, A PERTURBAÇÃO PROVALVEMENTE É DEVIDA À CORONA EM ALGUM TERMINAL OU PARAFUSO NÃO ATERRADO, NÃO CAUSANDO PERIGO AO FUNCIONAMENTO NORMAL DO TRANSFORMADOR.

UM OUTRO MÉTODO MUITO EMPREGADO É O DO DETETOR ACÚSTICO, QUE INDICA COM MUITA SENSIBILIDADE, A OCORRÊNCIA DE PEQUENAS DESCARGAS ELÉTRICAS NO ÓLEO DOS TRANSFORMADORES.

QUANDO UMA FALHA INTERNA NO TRANSFORMADOR OCORRE, DENTRO DO ÓLEO PEQUENAS DESCARGAS PRODUZIRÃO ONDAS DE PRESSÃO HIDRODINÂMICAS QUE SERÃO TRANSMITIDAS PELO ÓLEO. COM ESSES DADOS FOI DESENVOLVIDO ESTE NOVO MÉTODO. A FIGURA 3.14 NOS MOSTRA O DETETOR JUNTAMENTE COM SEUS ELEMENTOS COMPONENTES. POR MEIO DE UMA PELÍCULA FOTOGRÁFICA SÃO REGISTRADAS AS DEFLEXÕES DO GALVANOMETRO, GRANDES DEFLEXÕES EM GERAL INDICAM DESCARGAS DENTRO DO ÓLEO.

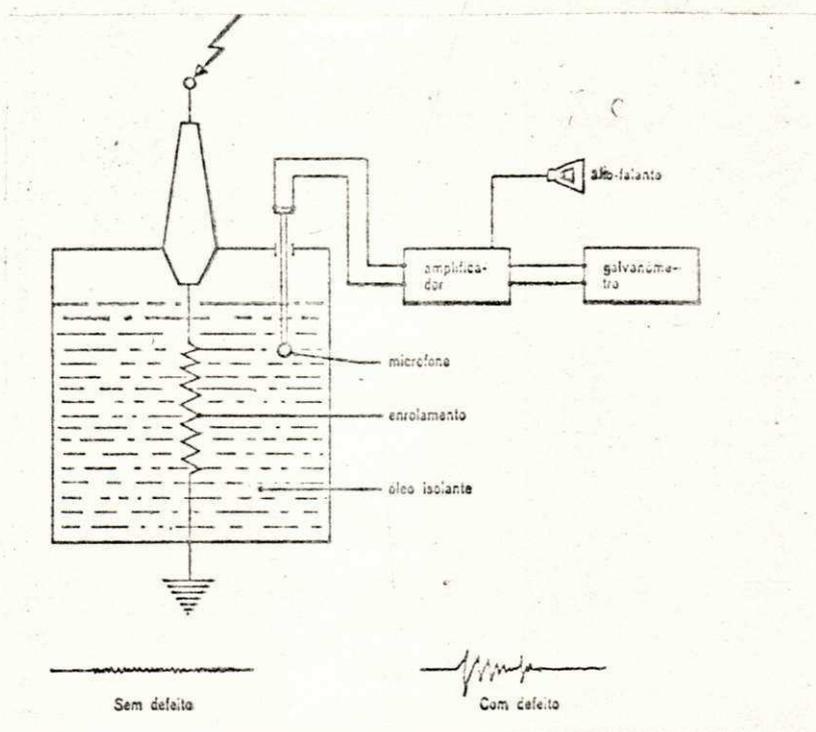


FIG. 3.14.

3.10 - LOCALIZAÇÃO DOS DEFEITOS

A LOCALIZAÇÃO DOS DEFEITOS DURANTE OS TESTES DE IMPULSO PODE SER FEITO A PARTIR DOS OSCILOGRAMAS, ATRAVÉS DE CÁLCULO.

COMO É SABIDO, A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA ELÉTRICA TRAPEZOÍDAL NO ENROLAMENTO DO TRANSFORMADOR, É OBTIDO PELA FÓRMULA:

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 0.5 V_0$$

ONDE $V_0 = 300$ M/MICROSEGUNDOS (VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NOS CONDUTORES).

SUPONDO O ENROLAMENTO SOB ENSAIO COM UM COMPRIMENTO TOTAL L , O TEMPO PARA QUE A ONDA PERCORRA ESTE ENROLAMENTO SERÁ:

$$T = \frac{L}{150} \text{ MICROSEGUNDOS.}$$

PODEMOS OBTER O TEMPO NECESSÁRIO PARA ONDA ALCANÇAR O DEFEITO A PARTIR DO OSCILOGRAMA, CONSEQUENTEMENTE ENCONTRAMOS COM APROXIMAÇÃO A PERCENTAGEM DE COMPRIMENTO DO ENROLAMENTO ONDE SE LOCALIZA O DEFEITO.

A INTERPRETAÇÃO DO DEFEITO É SEMPRE COMPLEXA, ELA SE BASEIA PRINCIPALMENTE NA EXPERIÊNCIA E NA COMPARAÇÃO DE OSCILOGRAMAS OBTIDOS EM TESTES ANTERIORES QUE INDICARAM DEFEITOS ANÁLOGOS.

3.11 - EXEMPLOS ILUSTRATIVOS DE ENSAIOS DE IMPULSO

NESTA SEÇÃO APRESENTAMOS UMA ILUSTRAÇÃO DE ENSAIO DE IMPULSO EM TRANSFORMADORES, QUANDO TESTADOS NOS LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO DA GENERAL ELETRIC, A FIM DE UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO DO QUE FOI TRATADO NESTE CAPÍTULO.

DO ENSAIO REALIZADO EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, 15 MVA, ENROLAMENTO DE A.T. 138 KV Δ - 69 KV Δ . BAIXA TENSÃO 23.6 Y / 13.8 KV FREQUÊNCIA 60 HZ, FORAM OBTIDOS OS OSCILOGRAMAS DA FIG. (3.15) .

(VIDE FIGURA EM OUTRA FOLHA)

A ANÁLISE DOS OSCILOGRAMAS INDICOU, CONFORME PODEMOS OBSERVAR, PEQUENAS IRREGULARIDADES NA ONDA PLENA REDUZIDA, A QUAL FOI APLICADA NA BUCHA H₁, ISTO FOI COMPROVADO PELA APLICAÇÃO DA ONDA PLENA REDUZIDA DE CORRENTE (OPRC), CUJO OSCILOGRAMA APRESENTOU CONCORDÂNCIA NAS OSCILAÇÕES.

COMO ISSO NÃO INDICA NADA ESPECIAL, APLICOU-SE UMA ONDA PLENA NA MESMA BUCHA, CUJO OSCILOGRAMA MOSTRA UMA SÉRIE DE QUEDAS DE TENSÃO, ENQUANTO A APLICAÇÃO DA ONDA PLENA DE CORRENTE CONFIRMA ESTE FATO, POIS APRESENTOU GRANDES PERTURBAÇÕES.

NOTE-SE QUE O DEFEITO NÃO ENTROU EM DEGENERAÇÃO, SENDO SUSPEITADO OCORRÊNCIA DE DESCARGAS INTERNAS.

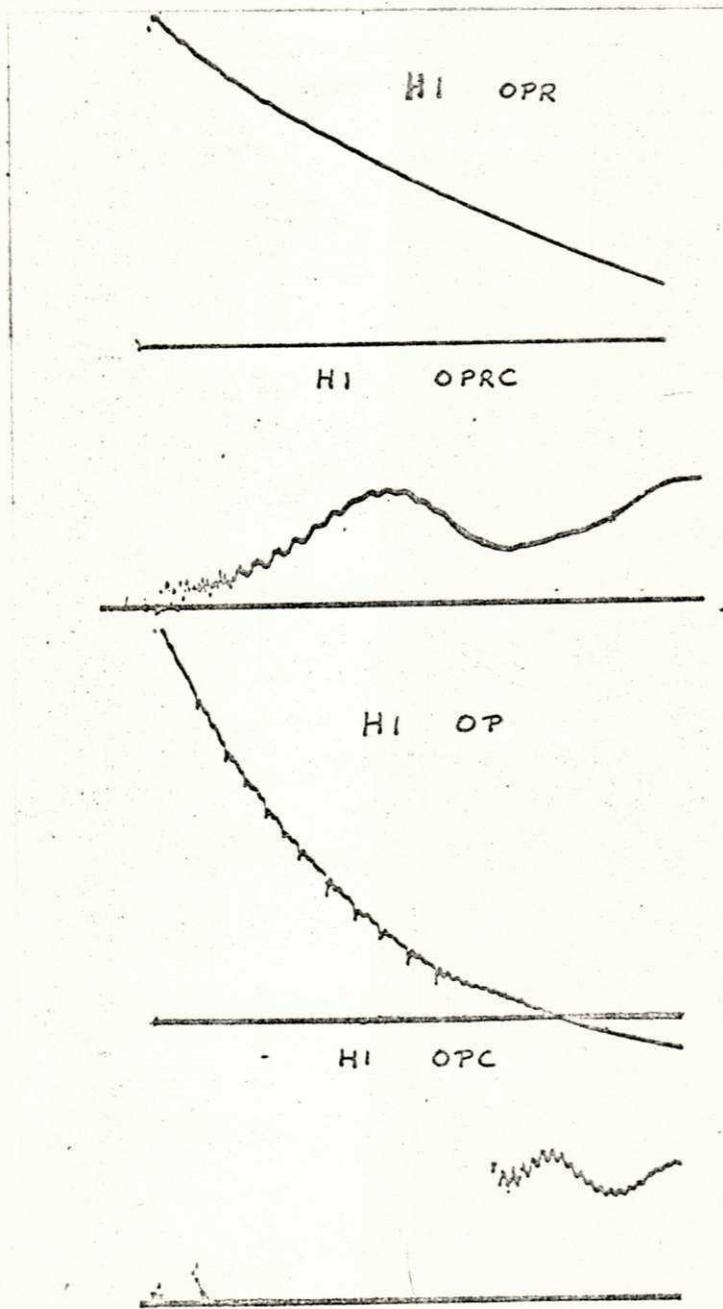
APÓS TER SIDO EXAMINADO O TRANSFORMADOR, FOI ENCONTRADO A PRESENÇA DE DESCARGAS NA MADEIRA DE SUPORTE DO COMUTADOR DO AJUSTADOR DE TENSÃO.

OUTRA ILUSTRAÇÃO ESTÁ NOS OSCILOGRAMAS DA FIG. (3.16) .

(VIDE FIGURA EM OUTRA FOLHA)

VEMOS QUE A APLICAÇÃO DE ONDA PLENA NO ENROLAMENTO H₃, INDICOU UMA DESCARGA COM QUEDA DE TENSÃO, CONFIRMADA PELO OSCILOGRAMA DE ONDA PLENA DE CORRENTE.

APLICADA A ONDA PLENA NO ENROLAMENTO H₂ A QUEDA VIOLENTA DE TENSÃO É NOVAMENTE INDICADA, A QUAL FOI



*
OPR - ONDA PLE
 NA REDUZIDA A-
 PPLICADA À BU -
 CHA H_1 .

OPRC - ONDA
 PLENA REDUZIDA
 DE CORRENTE A-
 PPLICADA À BU -
 CHA H_1 .

OP - ONDA PLE-
 NA APLICADA À
 BUCHA H_1 .

OPC - ONDA PLE
 NA DE CORRENTE
 APLICADA À BU-
 CHA H_1 .

FIG. 3.15.

NOVAMENTE RETIFICADA PELO OSCILOGRAMA DE ONDA PLENA DE CORRENTE.

O EXAME DO TRANSFORMADOR MOSTROU DESCARGAS NA PLACA DE LIGAÇÃO SÉRIE-PARALELO.

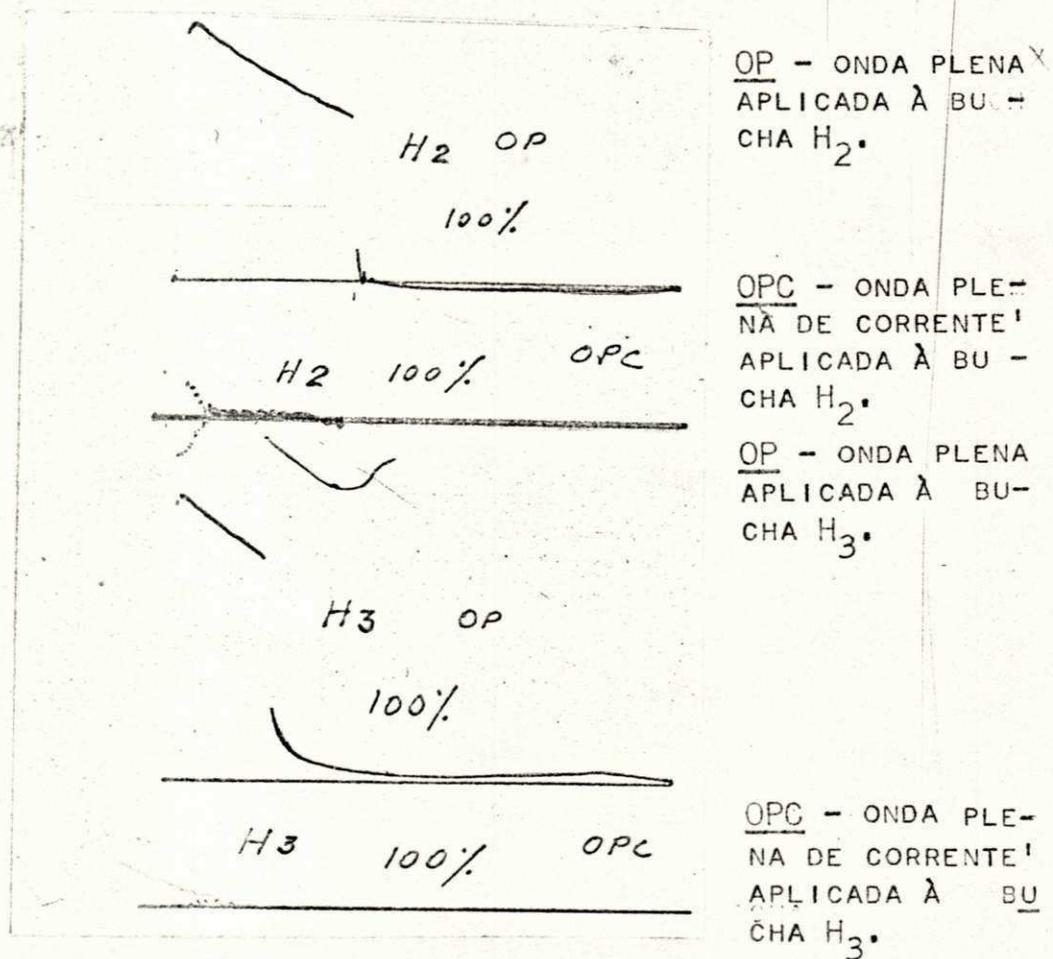


FIG. 3.16.

CAPÍTULO IV

TESTES A SURTO DE MANOBRA

4.1- FORMA DE ONDA

A ONDA A SER PADRONIZADA PARA ÊSTE ENSAIO, DEVE TER UMA FORMA SEMELHANTE ÀQUELA QUE OCORRE EM OPERAÇÃO E DEVE SER DE MANEIRA TAL, QUE FACILMENTE SEJA APLICADO NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR UTILIZANDO OS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO EXISTENTES.

SURTOS DE MANOBRA OCORREM PARA TODOS OS TIPOS DE OPERAÇÃO CHAVEAMENTO, CONSEQUENTEMENTE A MAGNITUDE E A FORMA DA ONDA DIFEREM PARA CADA CASO.

APESAR DOS SURTOS DE MANOBRA TEREM UM NÚMERO QUASE INFINITO DE FORMAS DE ONDA, AS SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS PODEM SER GRUPADAS EM TRÊS CATEGORIAS.

1º: ONDA ESCARPADA:

SEMELHANTE ÀS SOBRETENSÕES PRODUZIDAS PELO FECHAMENTO DE DISJUNTORES OU "RESTRIKING".

2º: SURTOS OSCILATÓRIOS VAGAROSAMENTE AMORTECIDOS :

COM DURAÇÃO ENTRE 1.000 A 2.000 MICROSEGUNDOS.

3º: SURTOS OSCILATÓRIOS LIGEIRAMENTE AMORTECIDOS :

VARIANDO DE UMAS POUCAS CENTENAS A POUCOS MILHARES DE CICLOS POR SEGUNDO. DO TIPO ASSOCIADO COM O "RESTRIKING" DURANTE A MANOBRA DE UMA LINHA EM VAZIO.

O ENSAIO COM ONDA ESCARPADA É REALIZADO PELAS CONDIÇÕES DO ENSAIO DE IMPULSO COM ONDA PADRÃO DE 1,5 X 40 MICROSEGUNDOS.

OS ENSAIOS COM OUTROS DOIS TIPOS DE ONDA TRATAREMOS NO DECORRER DÊSTE CAPÍTULO.

4.2 - GERAÇÃO DE ONDAS

AS POSSIBILIDADES DE PRODUZIR AS ONDAS QUE SIMULAM UM SURTO DE MANOBRA SÃO AS SEGUINTEs:

1. INTERRUPTÃO D.C. NO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO.
2. ONDA MÉDIA SENOIDAL DE TENSÃO DE SERVIÇO APLICADA AO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO.
3. DESCARGA DE UM BANCO DE CAPACITORES NO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO.
4. PRODUÇÃO DE ONDAS POR MEIO DE UM GERADOR DE IMPULSO CONVENCIONAL.

O PRIMEIRO MÉTODO CONSISTE EM SIMULAR UM SURTO DE TENSÃO DE MANOBRA, ALIMENTANDO UM DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR COM CORRENTE CONTÍNUA, POR MEIO DE UM INTERRUPTOR DE RUPTURA BRUSCA (CHAVE A VÁCUO), ESTA CORRENTE É CORTADA APARECENDO DESTA MANEIRA, UMA OSCILAÇÃO ACOMPANHADA DE SOBRETENSÕES.

FUNDAMENTALMENTE CONSISTE EM CONVERTER ENERGIA MAGNÉTICA ARMazenADA EM ENERGIA ELETROSTÁTICA NA CAPACITÂNCIA EFETIVA DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR.

ESTE MÉTODO POSSUI SUAS LIMITAÇÕES, POIS A GRANDEZA DA TENSÃO PRODUZIDA DEPENDERÁ DE :

- 1º: VELOCIDADE PARA A QUAL A CORRENTE É REDUZIDA A ZERO.
- 2º: DA DIMENSÃO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR.
- 3º: DA CURVA DE SATURAÇÃO DO NÚCLEO (B-H) E DO PONTO DA CURVA PARA A QUAL A CORRENTE É CORTADA.
- 4º: DA CAPACITÂNCIA EFETIVA DOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES (C_{EF})
- 5º: PERDAS POR CORRENTE DE FOUCAULT.

DE TODOS ÊSSES FATORES, O QUE MAIS LIMITA ÊSTE MÉTODO É A MÁXIMA CORRENTE QUE A CHAVE A VÁCUO CORTARÁ.

VEMOS FACILMENTE QUE A TENSÃO DE TESTE V_T , REQUER PARA SER PRODUZIDA UMA ENERGIA IGUAL A :

$$\frac{1}{2} C_{EF} \times V_T^2$$

PORÉM A ENERGIA MAGNÉTICA ÚTIL DISPONÍVEL DO NÚCLEO É PROPORCIONAL A ÁREA HACHUREADA DA FIGURA (4.1):

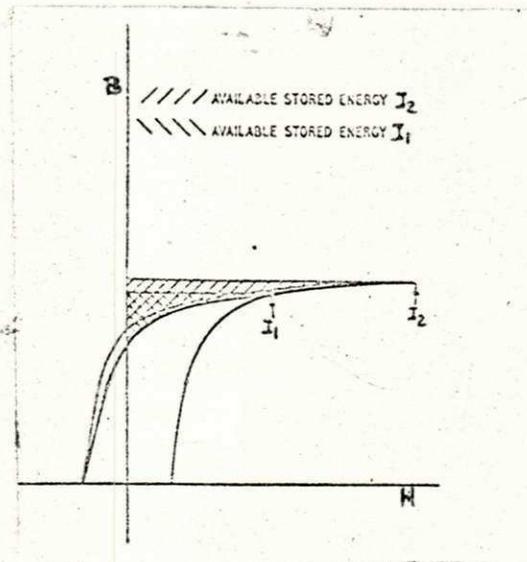


FIG. 4.1.

ALÉM DO MAIS, UM AUMENTO NA CORRENTE CORTADA NÃO CORRESPONDE A UM AUMENTO PROPORCIONAL NA TENSÃO DE TESTE V_T . ISTO PORQUE, ATUALMENTE, OS TRANSFORMADORES DE POTENCIA TÊM NÚCLEO INTERFOLEADOS FEITO DE AÇO LAMINADO ORIENTADO. A ENERGIA MAGNÉTICA QUE PODE SER ARMAZENADA EM UM NÚCLEO DESSE TIPO, CONSTRUÍDO DE LÂMINAS ORIENTADAS E QUE É CONVERTIDA EM ENERGIA ELÉTRICA QUANDO A ALIMENTAÇÃO É INTERROMPIDA, É MUITO PEQUENA.

ISTO SIGNIFICA QUE COM TRANSFORMADORES MODERNOS, A UTILIZAÇÃO DÊSTE MÉTODO NÃO É CONVENIENTE PARA OBTENÇÃO DAS ONDAS DE SURTOS PARA O ENSAIO DO TRANSFORMADOR. PELO FATO DE QUE A AMPLITUDE DAS SOBRETENSÕES, QUE PODEM APARECER NESTAS CONDIÇÕES, DEPENDEM DA GRANDEZA DA ENERGIA LIVRE.

BIBLIOTECA

CENTRO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA

O SEGUNDO MÉTODO DE PRODUÇÃO DE ONDAS MÉDIAS, FOI DENOMINADO ENSAIO POR UMA ALTERNÂNCIA DE TENSÃO SENOIDAL. A MONTAGEM DO ENSAIO, COMPREENDENDO UM IGNITRON PERMITE APLICAR AO TRANSFORMADOR SOB TESTE UMA ALTERNÂNCIA DE UMA TENSÃO ALTERNADA À 50 OU 250 HZ, VIDE FIGURA 4.2.

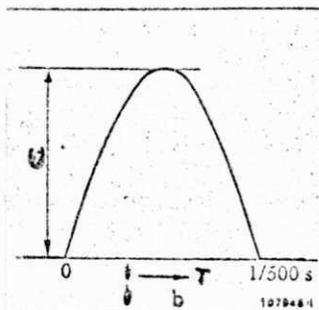


FIG. 4.2

U = VALOR DE PICO DA TENSÃO DE TESTE

T = TEMPO

ESTE MÉTODO FOI APERFEIÇOADO ULTIMAMENTE, EM VISTA DE MODIFICAR A FORMA DESTA ALTERNÂNCIA DE TENSÃO. MAS A CAPACIDADE DO DISJUNTOR TORNA-SE O FATOR LIMITANTE.

PARA TRANSFORMADORES DE GRANDE POTÊNCIA NOMINAL E EXTRA ALTA TENSÃO, A CAPACIDADE DE RUPTURA NECESSÁRIA SERIA TÃO GRANDE, QUE O EMPREGO DESTA MÉTODO SE TORNARIA IMPRATICÁVEL.

O MÉTODO DE PRODUIR A ONDA DE SOBRETENSÃO DE MANOBRA POR INDUÇÃO NO ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO DO TRANSFORMADOR, ATRAVÉS DA DESCARGA DE CAPACITORES NO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO É MAIS ADEQUADO PARA O ENSAIO DO TRANSFORMADOR NO LOCAL DE INSTALAÇÃO.

PARA O TESTE DO TRANSFORMADOR EM LABORATÓRIO, É MELHOR E MAIS CONVENIENTE A UTILIZAÇÃO DO GERADOR DE IMPULSO PADRÃO.

DESTE MÉTODO NOS OCUPAREMOS A SEGUIR.

4.3- ENSAIO A SURTO DE MANOBRA UTILIZANDO O GERADOR DE IMPULSO .

ESTE MÉTODO É SEMELHANTE AO JÁ APRESENTADO PARA O ENSAIO DE IMPULSO COM PEQUENA MODIFICAÇÃO. CONSISTE EM SIMU-

LAR A SOBRETENSÃO DE MANOBRA COM A AJUDA DE UM GERADOR DE IMPULSO, CUJAS RESISTÊNCIAS CONVENIENTEMENTE DIMENSIONADAS INFLUENCIAM A " FRENTE " E A " CAUDA " DA ONDA DE IMPULSO.

O GERADOR DE IMPULSO É DESCARREGADO EM UM DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR, CONTRARIAMENTE AO QUE FOI FEITO PARA O ENSAIO DE IMPULSO COM ONDA $1,5 \times 40$ MICROSEGUNDOS NO QUAL OS ENROLAMENTOS QUE NÃO ESTAVAM SOB TESTE ERAM CURTO-CIRCUITADOS.

PARA OS TESTES DE SURTO DE MANOBRA, ÊSTE ENROLAMENTO É DEIXADO EM CIRCUITO ABERTO. ISTO É FEITO, PORQUE A IMPEDÂNCIA DE CARGA PARA CURTO-CIRCUITO É MUITO PEQUENA E IMPEDE A APLICAÇÃO DA TENSÃO DE ENSAIO DE DURAÇÃO E MAGNITUDE EXIGIDAS PARA ESTAS NOVAS CONDIÇÕES.

O ESQUEMA BASTANTE SIMPLIFICADO DAS CONEXÕES ESTÁ INDICADO CONFORME O CIRCUITO EQUIVALENTE DA FIGURA 4.3.

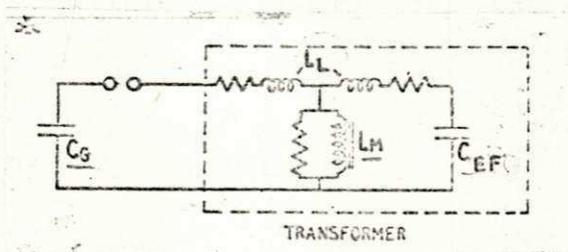


FIG. 4.3.

ONDE :

C_G = CAPACITÂNCIA DO GERADOR DE IMPULSO

L_L = REATÂNCIA DE DISPERSÃO

L_M = REATÂNCIA MAGNETIZANTE

C_{EF} = CAPACITÂNCIA EFETIVA DO TRANSFORMADOR.

A FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL SERÁ PRODUZIDA POR OSCILAÇÕES VAGAROSAMENTE AMORTECIDAS, ENTRE A CAPACITÂNCIA C_G DO GERADOR E A REATÂNCIA MAGNETIZANTE L_M DO TRANSFORMADOR. HAVERÁ TAMBÉM UMA ALTA FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÕES LIGEIRAMENTE AMORTECIDAS, ENTRE A REATÂNCIA DE DISPERSÃO L_L E AS CAPACITÂNCIAS SÉRIES C_G E C_{EF} .

O VALOR DE C_{EF} É A SOMA DAS CAPACITÂNCIAS EFETIVAS DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO E DO SECUNDÁRIO REFERIDA AO PRIMÁRIO PELO QUADRADO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DO TRANSFORMADOR.

A FIG. 4.4, MOSTRA AS FORMAS TÍPICAS DESTAS DUAS FREQUÊNCIAS OBTIDAS PELA DESCARGA NÃO AMORTECIDA DE UM CAPACITOR NO ENROLAMENTO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR.

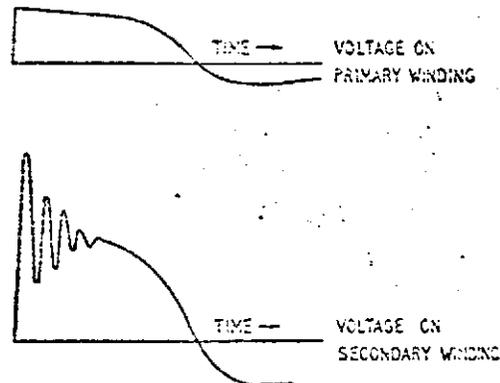


FIG. 4.4.

OBSERVAMOS QUE A FORMA DA ONDA DE TENSÃO APARECENDO NO ENROLAMENTO SECUNDÁRIO CONTÉM UMA MAIS ALTA FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO LIGEIRAMENTE AMORTECIDA E UMA BAIXA FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO VAGAROSAMENTE AMORTECIDA, ENQUANTO NO ENROLAMENTO PRIMÁRIO APARECE UMA ONDA DE TENSÃO CONTENDO APENAS FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO AMORTECIDA.

FORMAS DE ONDA DE OSCILAÇÃO DE ALTA FREQUÊNCIA, NÃO CONVÉM PARA SER UM TIPO PADRÃO, PELO FATO DE NÃO APARECEREM NOS DIFERENTES ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR, ALÉM DO MAIS, ELAS VARIAM DA MANEIRA PARA A QUAL O TRANSFORMADOR FOI PROJETADO, POIS A FREQUÊNCIA E A AMPLITUDE DESTAS OSCILAÇÕES SÃO CONTROLADAS PELOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR.

NO QUE DIZ RESPEITO ÀS OSCILAÇÕES VAGAROSAMENTE AMORTECIDAS, ELAS APARECEM NOS DOIS ENROLAMENTOS, NA RAZÃO DO NÚMERO DE ESPIRAS, SENDO POSSÍVEL OBTER-SE ESTAS OSCILAÇÕES PARA DIFERENTES TRANSFORMADORES, MEDIANTE ARRANJOS NO GERA -

DOR DE IMPULSO, ADICIONANDO-SE EM SEU CIRCUITO RESISTORES DE AMORTECIMENTO E CAPACITÂNCIA CONTROLADORAS DE FRENTE DE ONDA. A FIGURA 4.5 INDICA ÊSTE CIRCUITO.

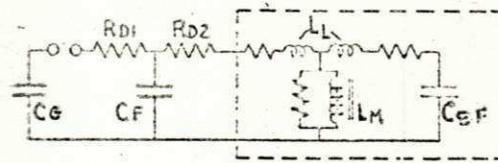


FIG. 4.5.

COM ÊSSES ARRANJOS, A FRENTE DA ONDA DE TENSÃO PO DE SER PROLONGADA E AS FREQUÊNCIAS DE GRANDES OSCILAÇÕES PO DEM SER ELIMINADAS. A FORMA DE ONDA OBTIDA DÊSTE MODO, É CONVENIENTE PARA SER A FORMA DE ONDA PADRÃO PARA OS ENSAIOS DE TRANSFORMADORES A SURTO DE MANOBRA, DE ACORDO COM O QUE É MOSTRADO NA FIGURA 4.6

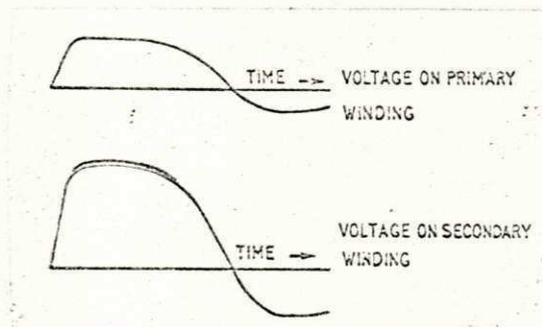


FIG. 4.6

ENTÃO O MÉTODO PRÁTICO DE PRODUZIR A TENSÃO DE ENSAIO PARA SIMULAR ESTAS SOBRETENSÕES É APLICAR UMA ONDA DE TENSÃO POR MEIO DO GERADOR DE IMPULSO A UM ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO, OU COMO AS TENSÕES SÃO TRANSFERIDAS DE UM ENROLAMENTO PARA OUTRO, PRATICAMENTE NA MESMA RELAÇÃO DAS ESPIRAS, AO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO,

SE A TENSÃO FOR APLICADA DIRETAMENTE AOS TERMINAIS DE ALTA TENSÃO, SERÁ NECESSÁRIO O USO DE RESISTÊNCIAS SÉRIES MUITO ELEVADAS.

O VALOR DA TENSÃO APLICADA OU INDUZIDA AO ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO, PODE SER MEDIDO COM UM DIVISOR DE TENSÃO OU, QUANDO HOUVER O TAP CAPACITIVO DA BUCHA DE ALTA

TENSÃO.

POR RAZÕES DE ORDEM PRÁTICA, DE PREFERÊNCIA A ONDA DE TENSÃO DEVE SER APLICADA NOS TERMINAIS DO ENROLAMENTO DE TENSÃO INFERIOR, USUALMENTE RESISTENCIAS SÉRIE E SHUNT PADRÕES DE 500 A 5.000 OHMS PODEM SER USADAS NO LADO DE BAIXA TENSÃO, A FIM DE QUE, ONDAS DE LONGA DURAÇÃO, SEJAM OBTIDAS.

A DESCARGA NOS TERMINAIS DE BAIXA TENSÃO JUSTIFICA-SE, PORQUE A GERAÇÃO DA ONDA LONGA É MAIS FACILITADA POIS O GERADOR DE IMPULSO É USADO COM TODOS OS CAPACITORES EM PARALELO (MAIOR CAPACITÂNCIA), POUCO RESISTORES INTERNOS SERÃO SUBSTITUIDOS.

UM OUTRO FATO, QUE AJUDA ESSA SUGESTÃO É QUE OS SURTOS DE LONGA DURAÇÃO CAUSAM MAIOR PERIGO DE CENTELHAMENTO NOS "GAP ELETRODOS" DO QUE OS SURTOS DE IMPULSO NORMAIS, O EMPREGO DA ESCALA DE TENSÃO INFERIOR DO GERADOR DE IMPULSO, PERMITE QUE UM SIMPLES "GAP" EXTERNO SEJA ADICIONADO AO CIRCUITO.

4.4- ONDA PADRÃO:

PELAS RAZÕES JÁ APRESENTADAS, A FORMA DE ONDA QUE FOI PROPOSTA PARA SER PADRONIZADA, FOI AQUELA DA OSCILAÇÃO VAGAROSAMENTE AMORTECIDA, DEFINIDA EM SEDE INTERNACIONAL COM AS SEGUINTE CARACTERÍSTICAS:

- 1º: UMA FRENTE DE ONDA DE 100 A 300 MICROSEGUNDOS .
- 2º: UMA CAUDA QUE ALCANÇA O SEMI-VALOR EM UM TEMPO NÃO INFERIOR A 1.000 MICROSEGUNDOS.
- 3º: A TENSÃO DESTA ONDA PERMANECE ACIMA DE 90% DO VALOR DE CRISTA, PARA UM TEMPO MAIOR OU IGUAL A 200 MICROSEGUNDOS.

4.5- AMPLITUDE DA ONDA

CONTRARIAMENTE A SOBRETENSÕES OCASIONADAS POR DES CARGAS ATMOSFÉRICAS, AS SOBRETENSÕES ORIUNDAS DAS OPERAÇÕES DE MANOBRA CRESCEM NA AUSENCIA DE QUAISQUER CONTRA MEDIDAS, PROPORCIONALMENTE À TENSÃO DE SERVIÇO.

APESAR DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO CÁLCULO A PRESENTAREM VALORES MUITO ELEVADOS DE SOBRETENSÕES, NA PRÁTICA, A MÁXIMA TENSÃO REGISTRADA, ATÉ ENTÃO, FOI DE APROXIMADAMENTE 3,5 VEZES A TENSÃO DE SERVIÇO.

ESTA CONSTANTE É A RELAÇÃO ENTRE A MÁXIMA TENSÃO DE SURTO DE MANOBRA E A TENSÃO ENTRE A FASE E NEUTRO DO SISTEMA, CHAMADA DE FATOR DE SOBRETENSÃO.

COM O CRESCIMENTO DAS TENSÕES DE SERVIÇO, ESTE FATOR PODE SER REDUZIDO PARA 2,1 A 2,3, TOMANDO-SE EVIDENTEMENTE PRECAUÇÕES ADEQUADAS.

TAMBÉM, OS VALORES DE TENSÃO DE ENSAIO SÃO RELACIONADAS PARA CADA NÍVEL DE TENSÃO, AOS VALORES DAS TENSÕES DE ENSAIO DE IMPULSO PELO COEFICIENTE 0,83, CONFORME TABELA I.

TABELA I

TENSÕES DE TESTE PARA SURTO DE MANOBRA PROPOSTA PELO I.E.E.E.

B I L	K V PARA TESTE DE SURTO DE MANOBRA
350	280
450	375
550	460
650	540
750	620
825	685
900	745
975	810
1050	870
1175	975
1300	1080
1425	1180
1550	1290
1675	1390
1800	1500
1925	1600
2050	1700
2175	1800
2300	1900
2425	2010

ATUALMENTE, PESQUISAS VÊM SENDO DESENVOLVIDAS E SUGESTÕES SÃO APRESENTADAS NO SENTIDO DE NÃO HAVER VÍNCULO ENTRE OS VALORES DAS TENSÕES DOS ENSAIOS DE MANOBRA E DE IMPULSO, UMA VEZ QUE É O PRÓPRIO PARA-RAIO QUE DETERMINA O NÍVEL DE TENSÃO QUE EVENTUALMENTE PODE ATINGIR O TRANSFORMADOR.

O COEFICIENTE 0,83, QUE REPRESENTA A RELAÇÃO ENTRE A MÁXIMA TENSÃO DE MANOBRA E AQUELE DEVIDO A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS, SUPORTADO POR UMA ESTRUTURA ISOLANTE BEM IMPREGNADA EM OLEO, NÃO PODE SER UM MODO ADEQUADO DE DEFINIR OS VALORES DE TENSÃO DOS DOIS ENSAIOS. (OBSERVEMOS , QUE POR ESTRUTURA ISOLANTE ENTENDE-SE PEQUENOS PROTÓTIPOS!

DE VÁRIAS NATUREZAS E NÃO ENROLAMENTOS COMPLETOS OU TRANSFORMADORES).

DESTE MODO, NÃO SE DEVE CONFUNDIR OS VALORES DE TENSÕES DE ENSAIO COM A RELAÇÃO ENTRE AS MÁXIMAS TENSÕES SUPOSTAS NOS ENSAIOS ACIMA, APLICADOS SOBRE A MESMA ESTRUTURA ISOLANTE.

A PROPOSTA DE APROXIMAR OS NÍVEIS DE ENSAIOS A SITUAÇÕES REAIS DE OPERAÇÃO, É MOSTRADA NA TABELA 2 (INDICADA NA PÁGINA SEGUINTE), ONDE FOI TOMADA UMA MARGEM DE SEGURANÇA 1,15 EM RELAÇÃO A TENSÃO MÁXIMA DE DESCARGA DO PARA-RAIO ÀS SOBRETENSÕES DE MANOBRA E DE 1,20 EM RELAÇÃO A TENSÃO RESIDUAL A IMPULSO COM 15 K A.

NESTA TABELA ESTÃO INCLUIDOS OS VALORES DE TENSÃO PARA IMPULSOS ATMOSFÉRICOS LIMITADOS NA TABELA 2 DO CAPÍTULO 3

COMO SE PODE VERIFICAR OS NÍVEIS PROPOSTOS PARA OS DOIS ENSAIOS COINCIDEM, COM EFEITO, NÃO SE EXPLICA PORQUE SÃO DIFERENTES, DESDE QUE OS PARA-RAIOS APRESENTAM O MESMO NÍVEL DE PROTEÇÃO PARA AMBAS SOLICITAÇÕES.

PODEMOS ARGUMENTAR TAMBÉM, MOSTRANDO QUE QUANDO O ENSAIO A IMPULSO ATMOSFÉRICO (1,5 X 40 MICROSEGUNDOS), A REPARTIÇÃO DA TENSÃO NO ENROLAMENTO SUBMETIDO AO IMPULSO (ESTUDO DO QUAL NOS OCUPAREMOS NO CAPÍTULO 5), NA GRANDE MAIORIA DOS CASOS NÃO É LINEAR E OS PONTOS MAIS SOLICITADOS SE ENCONTRAM NO PRÓPRIO ENROLAMENTO.

AO CONTRÁRIO, QUANDO DO ENSAIO A SURTOS DE MANOBRA, NO QUAL A DURAÇÃO DA FRENTE DA ONDA É NO MÍNIMO IGUAL A 100 MICROSEGUNDOS, A REPARTIÇÃO DA TENSÃO É PRATICAMENTE LINEAR. OS PONTOS MAIS PERIGOSAMENTE SOLICITADOS NÃO SERÃO OS MESMOS.

PELA SUA NATUREZA, O ENSAIO A SOBRETENSÃO DE MANOBRA SE APROXIMA MUITO MAIS DO ENSAIO POR TENSÃO INDUZIDA (NA PRÓXIMA SESSÃO FAREMOS COMENTÁRIO) QUE AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÀS ONDAS DE IMPULSO NORMAIS.

TABELA 4.2

TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA KV	TENSÃO NOMINAL DO PÁRA-RAIO	TENSÃO MÁX. DE DESCARGA	TENSÃO RESIDUAL A IMPULSO	1,2 XTENSÃO DE COLUNA 5	1,5 XTENSÃO DE COLUNA 4	VALORES DE TESTES ESCOLHIDOS ENTRE A DO I E C		RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA COL.(9) E COL.(8).	
	COEF. DE FALHA PARA TERRA %	KV	A SOBRETENSÃO DE MANOBRA	15 KA	KV	A IMPULSO	A MANOBRA		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
245	75	180	425	428	514	488	550	550	1
	80	192	453	457	548	520	550	550	1
	94	228	439	545	654	620	750	650	0,87
362	71	258	609	615	738	700	750	750	1
	76	276	650	658	790	747	850	750	0,885
	86	312	737	738	885	846	950	850	0,895
420	80	336	765	780	937	878	950	950	1
	76	396	885	950	1140	1016	1175	1050	0,895
525	80	420	940	1005	1205	1080	1300	1175	0,905
	89	468	1049	1110	1330	1205	1425	1300	0,91
765	77	588	1335	1410	1690	1535	1800	1550	0,865
	83	636	1520	1560	1870	1748	1950	1800	0,925

4.6 - GENERALIDADES SOBRE TESTE DE TENSÃO INDUZIDA

O ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR QUANDO EM SERVIÇO FICA SUBMETIDO A ESFORÇOS CAUSADOS PELA APLICAÇÃO CONTÍNUA DA TENSÃO NOMINAL DE OPERAÇÃO, A QUAL APRESENTA VARIAÇÕES DE MAIS OU MENOS 5% SOBRE O VALOR NOMINAL E POR TENSÕES MANTIDAS NA FREQUÊNCIA DA REDE OU EM TORNO DESTA, AS QUAIS INICIALMENTE SÃO ACOMPANHADAS POR SOBRETENSÕES DE MANOBRA.

A CAPACIDADE DO TRANSFORMADOR RESISTIR A TAIS TENSÕES É VERIFICADA PELO ENSAIO DE TENSÃO INDUZIDA A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL E COM MEDIÇÃO DE CORONA.

NO PASSADO, OS NÍVEIS DAS TENSÕES DESTE TIPO DE ENSAIO FORAM SUFICIENTES PARA ESTABELECEER UMA MARGEM DE SEGURANÇA ADEQUADA CONTRA SURTOS DE MANOBRA QUE OCORRIAM EM OPERAÇÕES, POIS AS TENSÕES DOS SISTEMAS ERAM DA ORDEM DE 230 k V A 270 k V.

COM O CRESCIMENTO DAS TENSÕES DE TRANSPORTE PARA 400 k V E ACIMA DESTE NÍVEL E COM AS VANTAGENS ORIUNDAS DA REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE ISOLAMENTO, ESTE ENSAIO NÃO EXPRIME UMA SITUAÇÃO REAL, A MENOS QUE ESTE TESTE SEJA MANTIDO PARA NÍVEIS DESNECESSARIAMENTE ALTOS, DETERMINANDO ASSIM, ESFORÇOS MUITO MAIORES, DO QUE AQUELES QUE O TRANSFORMADOR REALMENTE EXPERIMENTARIA EM FUNCIONAMENTO.

DESTA FORMA, PROPOSTAS PARA UMA REVISÃO DOS ENSAIOS DE TENSÃO INDUZIDA FORAM APRESENTADAS, OBJETIVANDO TORNÁ-LOS MAIS COMPATÍVEIS COM AS EXIGÊNCIAS DE SERVIÇO.

DE ACORDO COM ESSAS RECENTES PROPOSTAS O ENSAIO DE TENSÃO INDUZIDA À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL, DEVERIA SER EXECUTADO OBEDECENDO OS SEGUINTE PRINCÍPIOS GERAIS :

A: RELACIONAR O TESTE APENAS COM A TENSÃO NOMINAL DE OPERAÇÃO.

- B: AUMENTAR A DURAÇÃO DO TESTE, REDUZIR A SUA MAGNITUDE E REQUERER A AUSÊNCIA DE CORONA.
- C: CONECTAR O TRANSFORMADOR PARA O TESTE, DO MESMO MODO COMO É CONECTADO EM SERVIÇO, TAL QUE A SUA ESTRUTURA ISOLANTE SEJA SOLICITADA EM TODOS OS PONTOS, DE MANEIRA PROPORCIONAL À SOLICITAÇÃO GERADA PELA TENSÃO DE OPERAÇÃO.

4.7 - SUGESTÕES PARA REVISÃO DO TESTE DE TENSÃO INDUZIDA

O ENSAIO DE TENSÃO INDUZIDA À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL NÃO FAZ DISTINÇÃO QUANTO AO TIPO DO ISOLAMENTO DO ENROLAMENTO, SE PLENO OU GRADUADO, SUBMETENDO DIFERENTES PONTOS DO ISOLAMENTO A DIFERENTES ESFORÇOS.

ESTA INCONSISTÊNCIA NA RELAÇÃO ENTRE AS SOLICITAÇÕES RELATIVAS A TENSÃO DE ENSAIO E A TENSÃO DE OPERAÇÃO, APARECE NÃO SOMENTE NA COMPARAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR COM OUTRO EM RELAÇÃO AO TIPO DE LIGAÇÃO DOS ENROLAMENTOS, MAS TAMBÉM NO MESMO TRANSFORMADOR, EM FUNÇÃO DO PONTO CONSIDERADO NO PRÓPRIO ENROLAMENTO (ISOLAMENTO CONTRA MASSA, ENTRE FASES, ENTRE BOBINAS, ENTRE ESPIRAS).

CONCLUIMOS PORTANTO QUE ESTES PODEM MUITAS VEZES CRIAR PONTOS VULNERÁVEIS NO ISOLAMENTO, PREJUDICANDO FUTURAMENTE O EQUIPAMENTO, EM LUGAR DE TORNAR EVIDENTES OS PONTOS FRACOS DO ISOLAMENTO, EM CONSEQUÊNCIA DE POSSÍVEIS FALHAS NA FABRICAÇÃO.

DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO PARA INDUZIR 460 K V, ENTRE FASE-TERRA E ENTRE FASE-FASE EM UM TRANSFORMADOR DE 345 K V, PODEMOS COMPREENDER ESTAS DIFERENTES SOLICITAÇÕES NAS VÁRIAS PARTES DO ISOLAMENTO.

NESTE CASO, O ISOLAMENTO ENTRE FASE-TERRA, FOI SOLI

CITADO PARA 2,3 VEZES A TENSÃO DE OPERAÇÃO, O ISOLAMENTO ENTRE FASE-FASE PARA 1,33 E O ISOLAMENTO INTERNO ENTRE ESPIRAS, ENTRE TAPS E ENTRE OUTRAS SESSÕES DO ENROLAMENTO PARA 1,55 VEZES A TENSÃO OPERANTE.

RECENTEMENTE A A.S.A APROVOU UMA MUDANÇA NAS NORMAS DÊSTES ENSAIOS, NA QUAL A TENSÃO DE ENSAIO ENTRE FASE-FASE REQUERIDA É DE 1,65 VEZES A TENSÃO DE OPERAÇÃO, ENTRETANTO ÊSTE PROCEDIMENTO NÃO ELIMINA ESTAS INCONSISTÊNCIAS.

ASSIM SENDO, CONFORME OS CONCEITOS MODERNOS, O ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR DEVERIA SER SOLICITADO EM TODOS OS PONTOS PARA A MESMA TENSÃO DE OPERAÇÃO E A DURAÇÃO DO TESTE DEVERIA SER TÃO LONGA QUANTO POSSÍVEL, A GRANDEZA DA TENSÃO DE TESTE DEVERIA SER SELECIONADA COM O TEMPO DE APLICAÇÃO DA MESMA.

A SUGESTÃO APRESENTADA, FOI DE INDUZIR UMA TENSÃO ENTRE 1,4 A 1,5 DA NOMINAL, PARA UMA OU DUAS HORAS, DURANTE CUJO TEMPO O TRANSFORMADOR DEVERÁ ESTAR LIVRE DE CORONA.

O MÉTODO MAIS CORRETO DE SOLICITAR TODO O ISOLAMENTO É INDUZIR NO ENROLAMENTO DE A.T. DO TRANSFORMADOR, POR EXEMPLO, 1,5 DA TENSÃO NOMINAL, COM O NEUTRO DO TRANSFORMADOR ATERRADO.

OS VALORES DA TENSÃO E DA DURAÇÃO, TECNICAMENTE MAIS CORRETOS SÃO MUITO DIFÍCEIS DE DETERMINAR.

DE ACORDO COM A NORMA EB-91 E MB-128 DA ABNT É PERMITIDO UMA DURAÇÃO DE ENSAIO DE 7.200 CICLOS, OU NO MÁXIMO 60 SEGUNDOS, A TENSÃO PARA ENSAIO INICIALMENTE É DE 25% DO SEU VALOR, E É ELEVADA GRADUALMENTE ATÉ O VALOR ESPECIFICADO EM 15 SEGUNDOS, O QUAL É MANTIDO DURANTE 7.200 CICLOS, PARA EM SEGUIDA SER REDUZIDO GRADATIVAMENTE.

UM ESTUDO INTERESSANTE SÔBRE A RELAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO OBSERVADA DA APLICAÇÃO DA TENSÃO EM UM LONGO TEMPO E AQUELAS DEVIDO A APLICAÇÃO DA TENSÃO EM UM CURTO TEMPO FOI FEITA POR M.G. CRAMP, DO QUAL FAREMOS UM RESUMO A SEGUIR.

ESTE ESTUDO EVIDENTEMENTE QUE, PARA UM VALOR FIXO DA TENSÃO, ATRAVÉS DE UMA ESPESSURA DE ÓLEO EM CONDIÇÕES LIVRE DE CORONA, A POSSIBILIDADE DE RUPTURA COMO FUNÇÃO DO TEMPO É REPRESENTADA POR:

$$P(t) = 1 - e^{-t/t_1}$$

ONDE T_1 É O TEMPO MÉDIO DE RUPTURA PARA UM VALOR FIXO DA TENSÃO.

A PROBABILIDADE DE RUPTURA EM UM TEMPO FIXADO (POR EXEMPLO, UM MINUTO), EM FUNÇÃO DA TENSÃO É REPRESENTADO PE LA RELAÇÃO:

$$P(v) = 1 - e^{-(v/v_0)^m}$$

ONDE V_0 É O VALOR (MODA) DA TENSÃO DE RUPTURA.

DA COMBINAÇÃO DESTAS RELAÇÕES OBTEM-SE A CARACTERÍSTICA TENSÃO-TEMPO:

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^m$$

PARA UMA DADA PROBABILIDADE DE RUPTURA.

O EXPOENTE m USADO NOS ENSAIOS, ASSUMIU VALORES COMPREENDIDOS ENTRE 15 E 30, ÉSTES VALORES SÃO VÁLIDOS PARA UM INTERVALO DE TEMPO DE VÁRIOS SEGUNDOS A VÁRIAS SEMANAS.

A DEGRADAÇÃO E A LEI DA PROBABILIDADE DESEMPENHAM UM PAPEL NA RELAÇÃO TENSÃO-TEMPO.

MUITOS PROJETISTAS TÊM COMPROVADO QUE UMA ESTRUTURA ISOLANTE SUPORTA A TENSÃO DE TESTE DURANTE A MAIOR PARTE DO ENSAIO, SEM QUE SE MANIFESTE DESCARGAS PARCIAIS, DESCARREGANDO SOMENTE NOS ÚLTIMOS SEGUNDOS, ESTE TIPO DE DESCARGA GERALMENTE, NÃO PODE SER ATRIBUÍDA À DEGRADAÇÃO DO ISOLAMENTO, MAS DEMONSTRA A NATUREZA PROBABILÍSTICA DA DESCARGA.

ESTAS DESCARGAS QUE OCORREM DEPOIS DE CURTOS ESPAÇOS DE TEMPO (MINUTO-HORA), DISTINGUEM-SE DAQUELAS QUE SE MANIFESTAM DEPOIS DE LONGO TEMPO (ANOS), PORQUE NORMALMENTE SÃO CAUSADAS POR:

- A) DEFICIÊNCIAS DE PROJETO
- B) DEFICIÊNCIAS DE FABRICAÇÃO
- C) CONTAMINAÇÕES OU OBJETOS EXTERNOS

DESCARGAS QUE SURGEM DEPOIS DE ALGUNS ANOS SÃO GERALMENTE ATRIBUÍDAS À DEGRADAÇÃO OU À CONDIÇÕES ANORMAIS QUE NÃO PODEM SER REVELADAS POR UM ENSAIO DE CURTO TEMPO (MINUTO), REALIZADO NA FÁBRICA.

UM TRANSFORMADOR QUE FUNCIONA NORMALMENTE DURANTE OS PRIMEIROS 6 OU 12 MÊSES, TEM MUITA POSSIBILIDADE DE FUNCIONAR 25 OU MAIS ANOS. UM TRANSFORMADOR QUE FUNCIONA DUAS HORAS LIVRE DE CORONA A 40% OU 50% ACIMA DA TENSÃO DE OPERAÇÃO TEM GRANDES POSSIBILIDADES DE FUNCIONAR NORMALMENTE NOS PRIMEIROS 6 OU 12 MÊSES.

ESTAS POSSIBILIDADES DE MAIOR SEGURANÇA, DECORRENTES DA APLICAÇÃO DURANTE DUAS HORAS DE UMA TENSÃO SUPERIOR A 50% DA TENSÃO DE SERVIÇO, EVIDENTEMENTE SÃO MAIORES DO QUE AQUELAS DE UM ENSAIO NA TENSÃO PLENA.

É IMPORTANTE OBSERVAR QUE ESTAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE RUPTURA COM O TEMPO SÃO EM CONDIÇÕES LIVRE DE CONA .

SE A TENSÃO DE OPERAÇÃO NORMAL É ESCOLHIDA COMO TENSÃO UNITÁRIA E A UNIDADE DE TEMPO, UM ANO, FAZENDO $N = 25$ A RELAÇÃO (III) SE TORNA:

$$\text{LOG } V = - 0,04 \text{ LOG } T$$

ONDE V É A TENSÃO APLICADA PARA UM TEMPO T , O QUAL EQUIVALE A UM ANO À TENSÃO NORMAL COM A MESMA PROBABILIDADE DE RUPTURA.

A FIGURA 4.7, É UM DIAGRAMA DA CARACTERÍSTICA TENSÃO -TEMPO, ÊLE MOSTRA QUE UMA TENSÃO DE ENSAIO IGUAL A 170% DA TENSÃO NOMINAL DE OPERAÇÃO, APLICADA DURANTE UM MINUTO, É EQUIVALENTE À TENSÃO DE 145% APLICADA DURANTE UMA HORA, OU AINDA, IGUAL A UMA TENSÃO DE 117% APLICADA DURANTE UMA SEMANA.

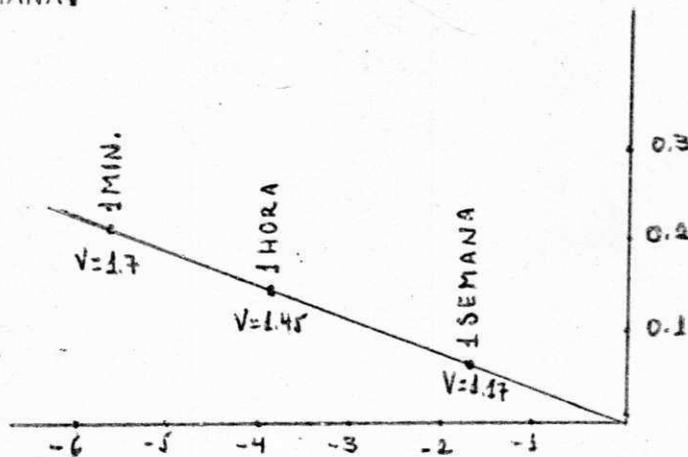


FIGURA 4.7

A VANTAGEM DE UM ENSAIO LONGO SÔBRE UM DE CURTA DURAÇÃO, ENCONTRA CONFIRMAÇÃO NA EXTRAPOLAÇÃO NECESSÁRIA PARA ASSEGURAR UM FUNCIONAMENTO NORMAL DE 6 A 12 MÊSES, DEPOIS DÊSTE TEMPO, SE OCORRER DESCARGAS, SÃO CAUSADAS POR CONDIÇÕES ANORMAIS QUE NÃO FORAM REVELADAS NUM ENSAIO, MESMO DE UM DIA DE DURAÇÃO.

4.8- SATURAÇÃO DO NÚCLEO: FATOR LIMITANTE DA DURAÇÃO DA ONDA :

A FIGURA 4.8 MOSTRA DE QUE MODO, O FLUXO NO NÚCLEO E A CORRENTE ATRAVÉS DO ENROLAMENTO VARIA COM O TEMPO, ESTAMOS SUPONDO A CONDIÇÃO DE FLUXO INICIAL 0.

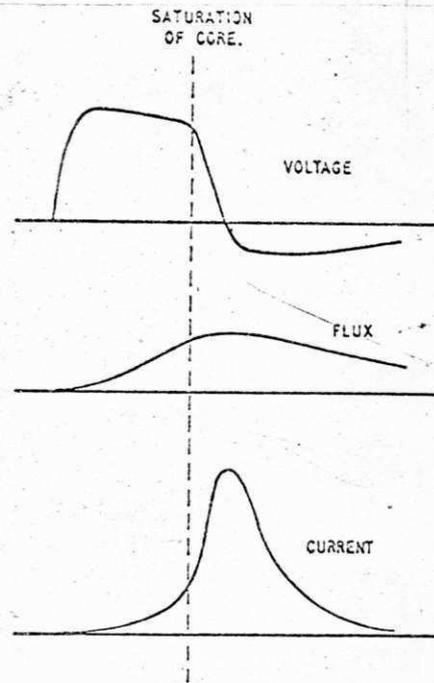


FIG. 4.8

IMEDIATAMENTE APÓS A CRISTA SER ALCANÇADA, A TENSÃO DE ENSAIO PERMANECE PRATICAMENTE CONSTANTE.

POR ESTA RAZÃO, SEGUE-SE QUE:

$$U = \frac{D\phi}{D T}$$

ONDE: U = TENSÃO DE ENSAIO

ϕ = FLUXO MAGNÉTICO

T = TEMPO

PARA $\phi < \phi_s$, SENDO ϕ_s IGUAL AO FLUXO DE SATURAÇÃO,

$$\phi = U \cdot T$$

ONDE U = VALOR DE CRISTA DA TENSÃO DE ENSAIO.

O FLUXO ϕ CRESCE LINEARMENTE E ALCANÇA, DEPOIS DE UM CERTO TEMPO T_s , O VALOR ϕ_s QUE CORRESPONDE AO FLUXO DE SATURAÇÃO PARA A CORRESPONDENTE TENSÃO DE ENSAIO. NESTE INSTANTE, A IMPEDÂNCIA DO ENROLAMENTO E CONSEQUENTEMENTE A TENSÃO DE ENSAIO, ENTRAM EM COLAPSO. A CORRENTE NO ENROLAMENTO CRESCE RAPIDAMENTE E ALCANÇA SEU VALOR DE CRISTA QUANDO A TENSÃO ATINGE O ZERO. PARA UMA TENSÃO DE ENSAIO MAIS ELEVADA, O PONTO DE SATURAÇÃO É ATINGIDO MAIS RAPIDAMENTE E CONSEQUENTEMENTE A DURAÇÃO DA ONDA TORNA-SE MAIS CURTA. ($\phi = \phi_s =$ CONSTANTE, U MAIOR VALOR, POR ISSO T MENOR).

UMA SÉRIE DE ENSAIOS PARA DIFERENTES NÍVEIS DA TENSÃO DE TESTES FORAM REALIZADAS PARA UM TRANSFORMADOR DE 400/132/13 K V, 240 MVA.

A SAÍDA DO GERADOR DE IMPULSO FOI APLICADA AO ENROLAMENTO TERCIÁRIO DE 15 KV, TENDO SIDO UTILIZADO O CIRCUITO APRESENTADO NA FIGURA 4.5 COM OS SEGUINTE PARÂMETROS :

$$C_G = 2.16 \mu F$$

$$C_F = 0.5 \mu F$$

$$R_{D1} = 100 \text{ OHMS}$$

$$R_{D2} = 50 \text{ OHMS}$$

$$C_{EF} = 2214 \text{ PF} \times 17.8^2 \text{ OU } 0.7 \mu F$$

OS OSCILOGRAMAS OBTIDOS NO TERMINAL DE 400 KV, MOSTRAM A REALIDADE DA NOSSA AFIRMATIVA, VIDE FIGURA 4.9.

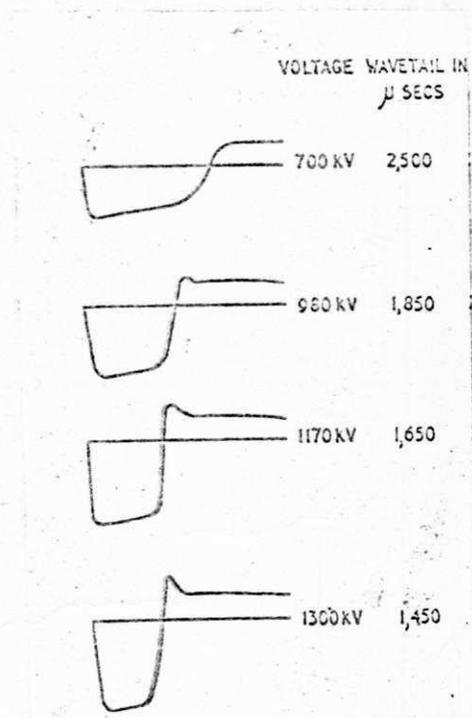


FIG. 4.9

PORTANTO A SATURAÇÃO DO NÚCLEO É UM FATOR LIMITANTE PARA A DURAÇÃO DA ONDA.

UMA PREMAGNETIZAÇÃO OU UM FLUXO REMANESCENTE COM POLARIDADE OPOSTA PODE TRAZER UM AUMENTO CONSIDERÁVEL NA DURAÇÃO DA ONDA.

DA EQUAÇÃO $\int u dt = \int d\phi = \phi_2 - \phi_1$ A DIFERENÇA ENTRE ϕ_2 FLUXO DE SATURAÇÃO E ϕ_1 FLUXO REMANESCENTE, É O FATOR QUE DETERMINA A ÁREA FECHADA NA FIGURA 4.10, ENTRE A LINHA PERIMETRAL DA CURVA E O EIXO DO TEMPO. EM OUTRAS PALAVRAS, PARA QUALQUER TENSÃO DE ENSAIO, A DURAÇÃO É PROPORCIONAL À DIFERENÇA ENTRE OS FLUXOS.

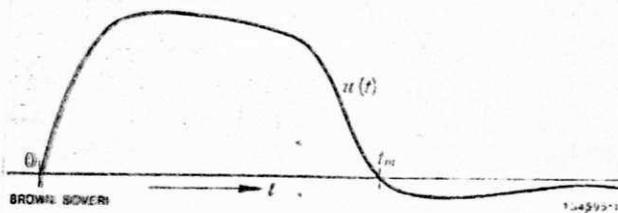


FIG. 4.10.
CURVA ARBITRÁRIA REPRESENTANDO
A EVOLUÇÃO DE UM SURTO DE MANOBRA.

POR ÊSTE MOTIVO É EVIDENTE QUE UM FLUXO REMANESCENTE DE POLARIDADE OPOSTA (ϕ_r NEGATIVO), PODE AUMENTAR A DURAÇÃO DA ONDA, PARA UMA DADA TENSÃO DE ENSAIO.

EM MODERNOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, COM NÚCLEO INTERFOLEADO DE LÂMINAS ORIENTADAS, O FLUXO REMANESCENTE É TÃO ELEVADO, QUE SE O SURTO DE MANOBRA DE MESMA POLARIDADE É APLICADO, A DURAÇÃO DA ONDA CAI ABAIXO DE 1000 MICROSEGUNDOS. SE UM FLUXO REMANESCENTE DE POLARIDADE CONTRÁRIA FOR APLICADO POR MEIO DE UMA DESCARGA PRÉVIA DE POLARIDADE OPOSTA, COM APROXIMADAMENTE METADE DO VALOR DA TENSÃO DE TESTE, PODE-SE OBTER ONDAS DE DURAÇÃO APROXIMADAMENTE DUPLICADAS.

UMA PREMAGNETIZAÇÃO DE POLARIDADE OPOSTA INDUZIDA POR INJEÇÃO D.C. EM UM DOS ENROLAMENTOS QUE NÃO ESTIVER SOB ENSAIO, TEM EFEITO SEMELHANTE. A OPINIÃO GERAL É DE QUE UM FLUXO REMANESCENTE DE POLARIDADE OPOSTA INDUZIDO POR UM SURTO DE VALOR APROXIMADO A METADE DA TENSÃO DE ENSAIO É UMA MANEIRA SIMPLES E EFICIENTE DE AUMENTAR SUFICIENTEMENTE A DURAÇÃO DA ONDA.

A FIGURA 4.11 ILUSTRA O PROLONGAMENTO NA CAUDA DA ONDA, UTILIZANDO O FLUXO REMANESCENTE NO NÚCLEO.

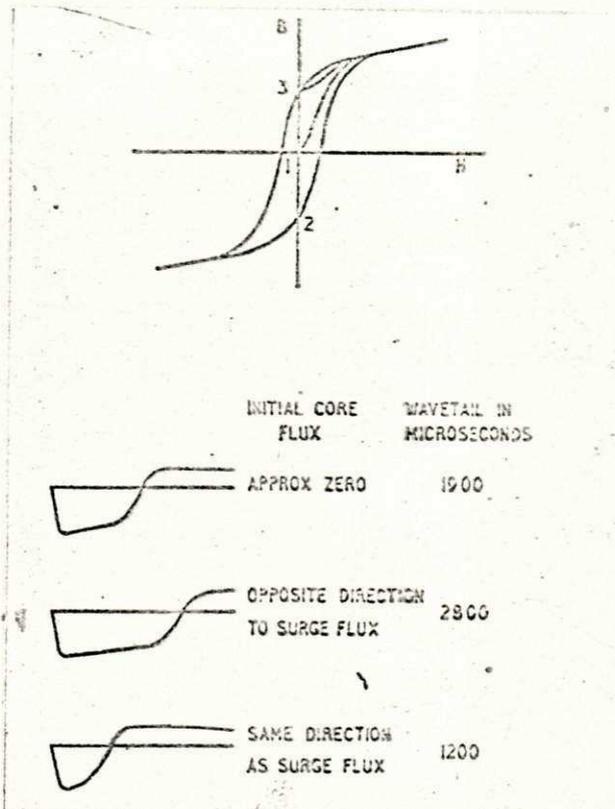


FIG. 4.11.1.

EFEITO DO FLUXO REMANESCENTE SOBRE A DURAÇÃO DA CAUDA DA ONDA.

ESTES OSCILOGRAMAS FORAM OBTIDOS NO TERMINAL DE ALTA TENSÃO DE UM TRANSFORMADOR DE 400/132/13 KV, 240 MVA, PARA UM NÍVEL REDUZIDO DE TENSÃO DE ENSAIO IGUAL A 600 KV.

4.9 - DETECÇÃO DOS DEFEITOS :

A RELAÇÃO NÃO LINEAR ENTRE A CORRENTE NO ENROLAMENTO E A INDUÇÃO PARA A CORRESPONDENTE TENSÃO DE ENSAIO É SIGNIFICANTE. O MÉTODO USUAL DE DETECÇÃO DE DEFEITOS, PARA TESTES DE IMPULSO $1,5 \times 40$ MICROSEGUNDOS, POR COMPARAÇÃO DOS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO, NÃO PODE SER APLICADO NO CASO DE ENSAIO A SURTO DE MANOBRA.

DEVIDO AS CARACTERÍSTICAS NÃO LINEARES OS OSCILOGRAMAS INICIAL E FINAL DE CORRENTE E TENSÃO, NUNCA PODERIAM SER OS MESMOS. ÊLES DIFEREM PARA CADA SURTO E ALGUMAS VÊZES, ATÉ PARA A MESMA TENSÃO DE ENSAIO, DEPENDENDO DO MAGNETISMO REMANESCENTE, DA SATURAÇÃO, BEM COMO DO INTERVALO ENTRE CADA IMPULSO.

COMO O TRANSFORMADOR NÃO PODE SER TESTADO EM CURTO CIRCUITO, É EVIDENTE QUE EM TODOS OS OUTROS ENROLAMENTOS QUE NÃO ESTÃO SOB ENSAIO, UMA TENSÃO APROXIMADAMENTE PROPORCIONAL À RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO, E UMA DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO SERÁ INDUZIDA NÊLES.

ANALIZANDO-SE AO MESMO TEMPO OS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO NO ENROLAMENTO, PODEMOS PROCEDER A DETECÇÃO DO DEFEITO.

É SABIDO QUE QUALQUER FALHA NO ISOLAMENTO DE QUALQUER ENROLAMENTO, CAUSARÁ UMA VARIAÇÃO NA CORRENTE E NO FLUXO NO NÚCLEO. ASSIM, AMBOS OS OSCILOGRAMAS INDICARÃO SINAIS DE FALHAS E DEPENDENDO DA MAGNITUDE E DO TIPO DE DISTORÇÃO DAS ONDAS, PODEMOS TER UMA IDEIA MESMO GROSSEIRA DA REGIÃO ONDE O DEFEITO OCORREU.

SOMENTE A EXPERIÊNCIA E A PRÁTICA NOS CONDUZIRÁ A DETERMINAÇÃO E A ANÁLISE BEM PRECISAS.

COMO EXEMPLO ILUSTRATIVO VEJAMOS A ANÁLISE E O RESULTADO DOS ENSAIOS OBTIDOS EM UM TRANSFORMADOR TRIFÉRICO A.T. 1 230 KV / 138 KV - B.T. 69 KV / 13.8 KV FREQUENCIA 60 HZ, CAPACIDADE 60 MVA, COM APLICAÇÃO DO GERADOR DE IMPULSO NOS ENROLAMENTOS DE ALTA TENSÃO. O CIRCUITO DE ENSAIO ESTÁ INDICADO NA FIGURA 4.12.

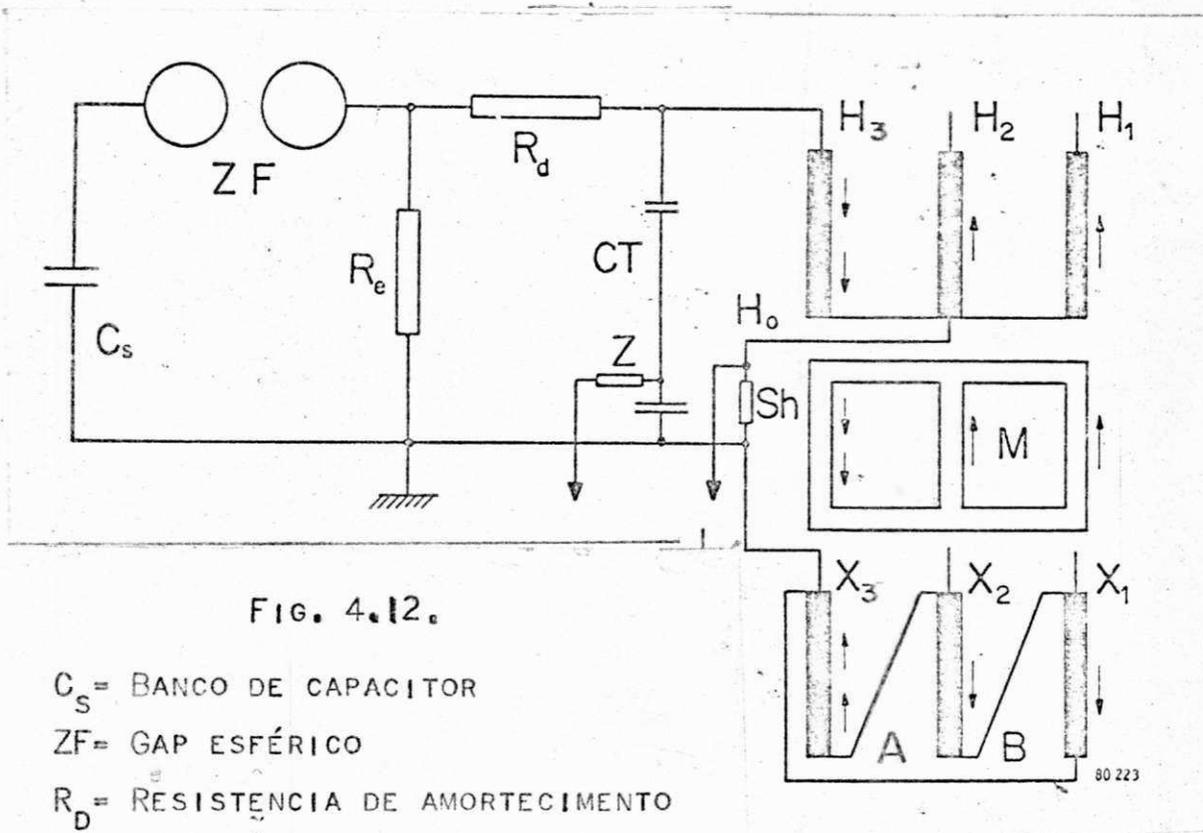


FIG. 4.12.

C_s = BANCO DE CAPACITOR

ZF = GAP ESFÉRICO

R_D = RESISTÊNCIA DE AMORTECIMENTO

R_E = RESISTÊNCIA DE DESCARGA

CT = DIVISOR CAPACITIVO DE TENSÃO

Z = IMPEDÂNCIA DE SURTO

SH = SHUNT PARA MEDIDAS DE CORRENTES

H_1, H_2, H_3 = TERMINAIS DE ALTA TENSÃO

H_0 = NEUTRO

X_1, X_2, X_3 = TERMINAIS DE BAIXA TENSÃO

M = NÚCLEO DE FERRO

A = DEFEITO PARA A

D = DEFEITO PARA B

A ANÁLISE DOS OSCILOGRAMAS INDICADO NA FIGURA 4.13, LEVAM A CONCLUSÃO DE UMA FALHA EM B, OCORRENDO ENTRE AS CO NEXÕES DOS ENROLAMENTOS DE BAIXA TENSÃO, PRODUZINDO UM CURTO CIRCUITO NO ENROLAMENTO COMPROVADO QUANDO DA ABERTURA DO TRANSFORMADOR PARA EXAME.

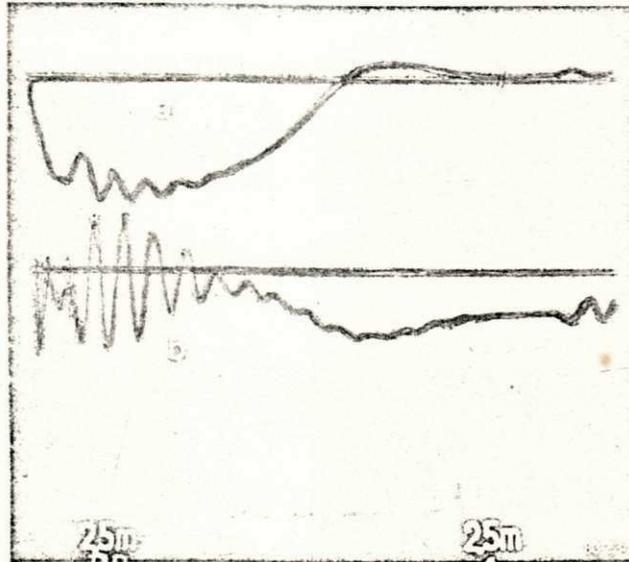


FIG. 4.13-A

FIG. 4.13.B

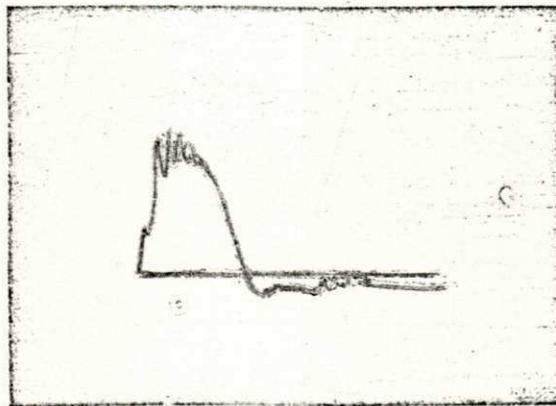


FIG. 4.13.C

FIGURA 4.13

AS CONCLUSÕES PODEM SER TIRADAS DA SEGUINTE MANEIRA :

QUANDO UM DEFEITO DÊSTE TIPO OCORRE, O FLUXO MAGNÉTICO NA PERIFERIA DO NÚCLEO DE UM DOS ENROLAMENTOS QUE NÃO ESTIVER SOB TESTE, TORNA-SE COMPLETAMENTE ANULADO, EM CONSEQUÊNCIA A TENSÃO DE ENSAIO CAI ABRUPTAMENTE.

RAPIDAMENTE ÊSTE FLUXO ENCONTRA UM CAMINHO ATRAVÉS DA PERIFERIA DA OUTRA FASE QUE TAMBÉM NÃO ESTÁ SENDO!

ENSAIADA A TENSÃO DE TESTE RETOMA O SEU VALOR, SEGUIDA POR OSCILAÇÕES, CONFORME FIGURA 4.13 A. O OSCILOGRAMA DA CORRENTE CORRESPONDENTE ESTÁ INDICADO NA FIGURA 4.13 B. PO DEMOS OBSERVAR CLARAMENTE UM "RESTRIKE" PARA O PONTO DE DE FEITO.

O NÚCLEO DE FERRO TORNA-SE SATURADO TAMBÉM NÊSTE CASO, DESDE QUE O FLUXO PODE FLUIR EM DIREÇÃO CONTRÁRIA À FALHA. DISTO RESULTA UMA DUPLICAÇÃO NA TENSÃO INDUZIDA NO ENROLAMENTO VIZINHO DEVIDO AO AUMENTO DO FLUXO. A FIGURA 4.13 C, MOSTRA A TENSÃO NÊSTE ENROLAMENTO.

A FIGURA 4.14, MOSTRA A PRESENÇA DE DESCARGAS OCORRENDO EM VIRTUDE DE MAL ATERRAMENTO DO NÚCLEO.

ESTAS DESCARGAS TAFETAM O INÍCIO DO TRAÇO DE CORRENTE PARA O COMEÇO DO SURTO DE MANOBRA, PORÉM NA REALIDADE NADA TEM A HAVER COM FALHA NO ISOLAMENTO.

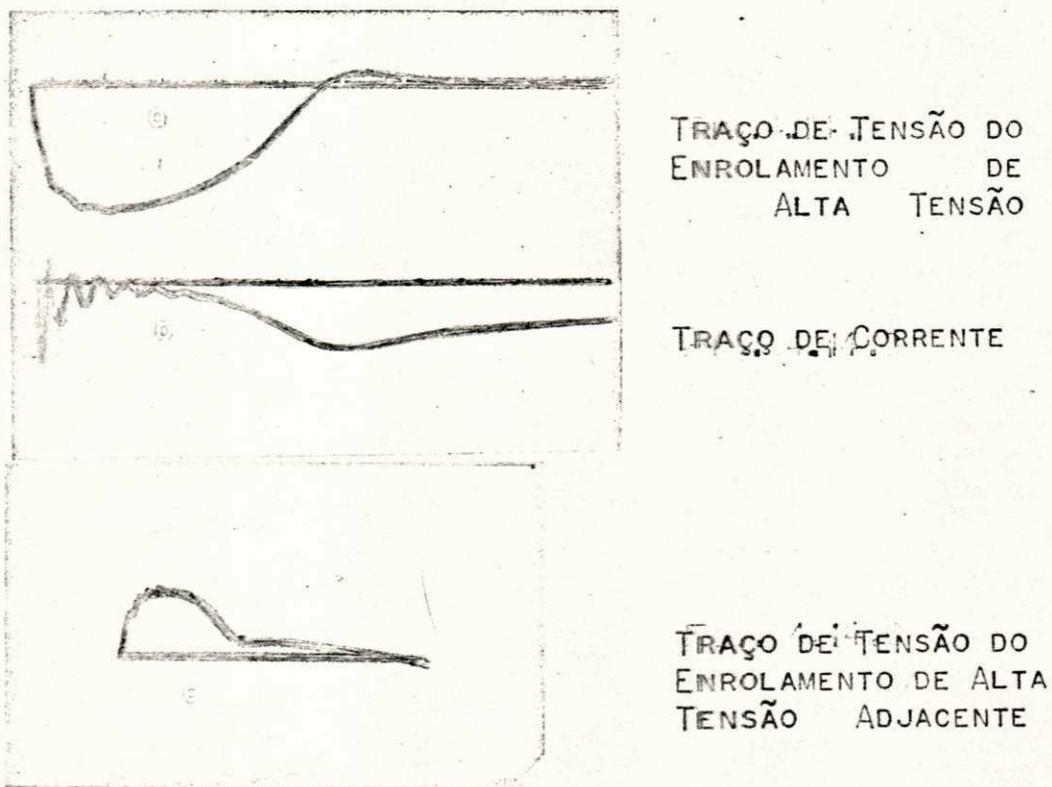


FIG.4.14

É SEMPRE DISCUTÍVEL DISTINGUIR ESTAS DESCARGAS, ESPECIALMENTE PARA ELEVADOS SURTOS DE MANOBRA, DAS DESCARGAS QUE PODEM OCORRER NO EQUIPAMENTO DE ENSAIO.

É OPORTUNO OBSERVAR QUE SE DURANTE O ENSAIO FÔR PRODUZIDO UM RUÍDO, NÃO SIGNIFICA NECESSARIAMENTE A OCORRÊNCIA DE UM DEFEITO, POIS O TRANSFORMADOR ESTAVA SEM TENSÃO E A IMANTAÇÃO BRUSCA NO INSTANTE EM QUE O TRANSFORMADOR É LIGADO AO GERADOR DE IMPULSO, QUASE SEMPRE PRODUZ UM RUÍDO QUE É NITIDAMENTE AUDÍVEL, MESMO PARA OS TRANSFORMADORES SEM DEFEITO.

4.10 - LOCALIZAÇÃO DOS DEFEITOS :

VIMOS ENTÃO, QUE A OCORRÊNCIA DE UM DEFEITO PODE SER EVIDENCIADA DE MODO SEGURO A PARTIR DOS OSCILOGRAMAS.

VEJAMOS AGORA COMO PODE SER DADA UMA INDICAÇÃO SOBRE A LOCALIZAÇÃO DO DEFEITO PELA ANÁLISE MINUCIOSA DOS OSCILOGRAMAS DE CORRENTE E TENSÃO.

OS OSCILOGRAMAS DA FIGURA 4.15 (VIDE PÁGINA SEGUINTE), OBTIDOS QUANDO DO ENSAIO DE UM TRANSFORMADOR, REGISTROU A OCORRÊNCIA DE UMA FALHA QUE CONSISTIU EM UM CURTO CIRCUITO DE UMA PARTE DO ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO.

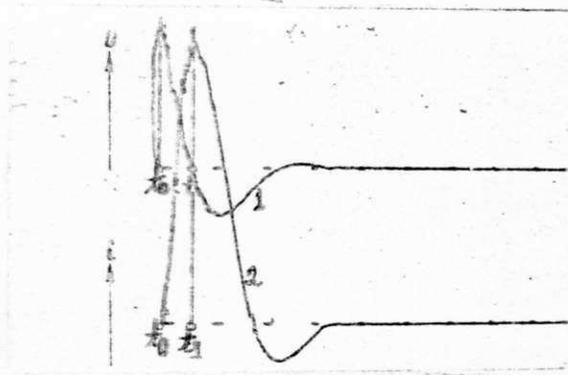


FIG. 4.15.

OSCILOGRAMA DE UM ENSAIO À SOBRETENSÕES DE MANOBRA NO QUAL SE REGISTROU UM DEFEITO

t_0 = INSTANTE DA OCORRÊNCIA DO DEFEITO

t_1 = INSTANTE ONDE A CORRENTE É MÁXIMA E A TENSÃO PASSA POR UM ZERO.

ESTE OSCILOGRAMA SUGERE QUE O DEFEITO OCORREU NO INSTANTE EM QUE A TENSÃO ATINGE SEU VALOR MÁXIMO. A PARTIR D'ESTE INSTANTE, QUE DESIGNAREMOS POR t_0 , A CORRENTE NO ENROLAMENTO CRESCE RAPIDAMENTE E ALCANÇA SEU VALOR MÁXIMO NO TEMPO t_1 , CORRESPONDENDO A UM ZERO NA TENSÃO. NO TEMPO t_0 A IMPEDÂNCIA DO CIRCUITO DECRESCERAPIDAMENTE PARA UM VALOR DADO PELA INDUTÂNCIA DE CERTO CIRCUITO, L .

A EXPRESSÃO
$$L = \frac{\int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot dt}{i(t_1)}$$

PERMITE DETERMINAR APROXIMADAMENTE ESTA INDUTÂNCIA A PARTIR DO OSCILOGRAMA.

O VALOR DESTA INDUTÂNCIA FORNECE UMA INFORMAÇÃO COM CERTA EXATIDÃO, DA REGIÃO ONDE O DEFEITO SE LOCALIZA, ANTES DA DESMONTAGEM DO TRANSFORMADOR.

CAPÍTULO VESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL
NOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR :5.1- GENERALIDADES :

COMO VIMOS NO CAPÍTULO I, AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS CRIAM NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO ONDAS TRANSITANTES QUE PODEM ATINGIR OS EQUIPAMENTOS TAIS COMO TRANSFORMADORES SOLICITANDO O ISOLAMENTO DOS ENROLAMENTOS.

ASSIM ÊSTES EQUIPAMENTOS DEVEM TER UM ISOLAMENTO TAL QUE RESISTA A ÊSSES ESFORÇOS, LOGO A CONSTRUÇÃO (PÊSO E TAMANHO) TORNA-SE FUNÇÃO DA DIMENSÃO DO ISOLAMENTO.

OS ESFORÇOS DE TENSÃO NOS ENROLAMENTOS RESULTAM DAS ITERAÇÕES ENTRE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS QUE SURGEM SOB CONDIÇÕES ANORMAIS, TORNAMDO-SE ASSIM FUNÇÃO DO ESPAÇO E DO TEMPO.

ÊSTE PROBLEMA DE CAMPO VEM SENDO TRATADO COMO UM PROBLEMA DE CIRCUITO NO QUAL A RESPOSTA AO SURTO VEM SENDO ESTUDADA EM UMA MALHA DE INDUTÂNCIAS E CAPACITÂNCIAS.

PARA ANALIZAR O COMPORTAMENTO DESTAS TENSÕES, INEVITÁVEIS APROXIMAÇÕES SÃO FEITAS, DESTE MODO: DIVIDE-SE O TEMPO APÓS O IMPACTO DO SURTO NO ENROLAMENTO EM TRÊS INTERVALOS DE TEMPO.

O PRIMEIRO DÊSTES PERÍODOS É EXTREMAMENTE CURTO, GERALMENTE UMA FRAÇÃO DE MICROSEGUNDO. O FLUXO DE CORRENTE SERÁ PARA O CARREGAMENTO DAS CAPACITÂNCIAS E CORRENTES MAGNETIZANTES SÃO POUCO SIGNIFICANTES DEVIDO A PRÓPRIA INDUTÂNCIA DO ENROLAMENTO.

NESTAS CONDIÇÕES A FORMA DE TENSÃO NO ENROLAMENTO É DENOMINADA "DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE SURTO", O ENROLAMENTO REAGE COMO UM SISTEMA CAPACITIVO, FICANDO DÊSTE MODO REDUZIDO A UM MODELO ELETROSTÁTICO.

NO TERCEIRO PERÍODO É SUPOSTO QUE A DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NO ENROLAMENTO APROXIMA-SE DO ESTADO CONTÍNUO, O ENROLAMENTO REAGIRIA COMO UMA RESISTÊNCIA.

O PERÍODO INTERMEDIÁRIO, DURANTE O QUAL A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO PÁSSA DA REPARTIÇÃO INICIAL À FINAL, ESTA TRANSFERÊNCIA SE PROCESSA ATRAVÉS DE MUITAS INTRINCADAS CONTORÇÕES, ISTO É, SE FAZ POR UMA SÉRIE DE OSCILAÇÕES COMPLEXAS.

5.2- ESTRUTURAS PARA O ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL :

A DISCUSSÃO SERÁ LIMITADA PARA O COMPORTAMENTO DOS ENROLAMENTOS CONCENTRICOS, ILUSTRADOS NA FIGURA 5.1, POIS SÃO OS MAIS UTILIZADOS ATUALMENTE NA CONSTRUÇÃO DOS TRANSFORMADORES.

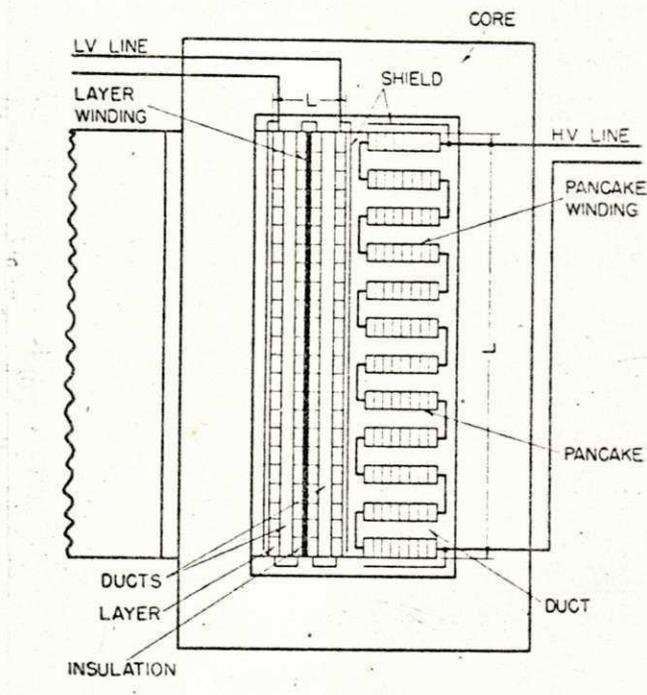


Fig. 5.1 - ENROLAMENTO COCÊNTRICO DO TRANSFORMADOR

A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA CONSISTE EM DETERMINAR AS SOLICITAÇÕES DE TENSÃO ENTRE ELEMENTOS E TERRA, ENTRE ELEMENTOS E ENTRE ESPIRAS, PRINCIPALMENTE PARA AQUELAS LOCALIZADAS NA EXTREMIDADE DA LINHA.

DE ACORDO COM O QUE JÁ FOI MENCIONADO, ESTE PROBLEMA SERÁ RESOLVIDO POR APROXIMAÇÃO, CONVERTENDO UM PROBLEMA DE CAMPO A UM PROBLEMA DE CIRCUITO PELA INTRODUÇÃO DE CAPACITÂNCIAS CONCENTRADAS (LUMPED).

ESTAS CAPACITÂNCIAS SÃO SUPOSTAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS AO LONGO DOS ENROLAMENTOS, DE MANEIRA QUE OS ESFORÇOS DE TENSÃO POSSAM SER ASSOCIADOS COM PONTOS INDIVIDUAIS DO ENROLAMENTO E REPRESENTADOS POR FUNÇÕES ANALÍTICAS.

O ESTUDO DAS ESTRUTURAS É FACILITADO, DISTINGUINDO - SE A MAIOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO, CORRESPONDENDO AOS NÍVEIS DE TENSÃO PARA A JUNÇÃO ENTRE ELEMENTOS ADJACENTES. ESTA ESTRUTURA É REPRESENTADA POR UMA MALHA DE CAPACITÂNCIAS PARA TERRA FORMADA DE CADA ELEMENTO PARA TERRA E POR CAPACITÂNCIA SÉRIE ENTRE TERMINAIS DE ELEMENTOS ADJACENTES, INDICADA NA FIGURA 5.2., CUJA SIMBOLOGIA ESTÁ EXPLICADA NA SEÇÃO 5.3.

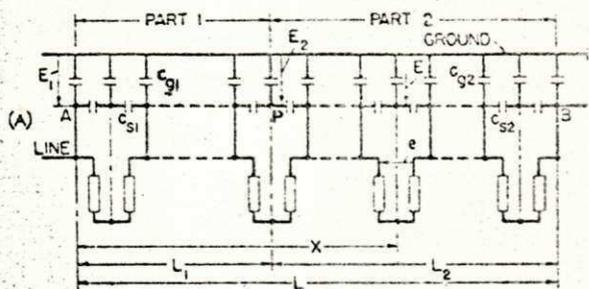


FIGURA 5.2

MAIOR MALHA DE CAPACITÂNCIA

A OUTRA CHAMADA MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO É REPRESENTADA POR UMA MALHA CONSTITUIDA POR CAPACITÂNCIAS CONCENTRADAS ENTRE ESPIRAS DE ELEMENTOS ADJACENTES E ENTRE ESPIRAS CONSECUTIVAS, MOSTRADA NA FIGURA 5.3, CUJA SIMBOLOGIA ESTÁ DETALHADA NA SEÇÃO 5.4.

VIDE FIGURA PÁGINA SEGUINTE.

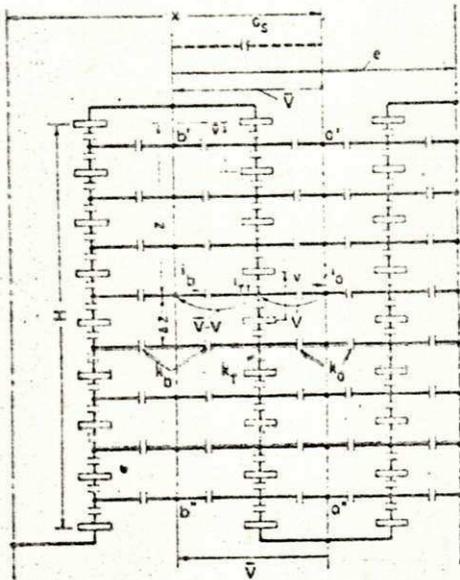


Fig. 5.3

MENOR MALHA DE CAPACITÂNCIA

5.3 - MAIOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO :

BASICAMENTE A MAIOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES TRATA DE DETERMINAR AS TENSÕES DOS PONTOS DE JUNÇÃO ENTRE ELEMENTOS PARA TERRA E AS TENSÕES ENTRE ELEMENTOS ADJACENTES.

NA FIGURA 5.2 O CAMPO EXTERNO ESTÁ REPRESENTADO PELA TENSÃO E ENTRE UM PONTO QUALQUER X E A MASSA, AS CAPACITÂNCIAS DE ELEMENTOS INDIVIDUAIS PARA TERRA POR C_g , O CAMPO INTERNO CORRESPONDE ÀS TENSÕES (E) E AS CAPACITÂNCIAS SÉRIES ENTRE ELEMENTOS ADJACENTES POR C_s .

CONSIDEREMOS O ENROLAMENTO COM UM COMPRIMENTO L QUE PODEM SER SUBSTITUIDO POR UM NÚMERO N DE ELEMENTOS E E_1 O SURTO DE TENSÃO APLICADO ENTRE A EXTREMIDADE DA LINHA E A MASSA.

AS REPARTIÇÕES DAS TENSÕES NOS ENROLAMENTOS SÃO DADAS PELAS DUAS FÓRMULAS SEGUINTEs, LEVANDO-SE EM CONTA DOIS CASOS FUNDAMENTAIS :

I: A EXTREMIDADE B DO ENROLAMENTO ESTÁ ATERRADA

$$(E = E^+, e = e^+)$$

$$\frac{E^+}{E_1} = \frac{\operatorname{senh} \alpha \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\operatorname{senh} \alpha} \quad (5.1.1.)$$

II: A EXTREMIDADE B DO ENROLAMENTO ESTÁ ISOLADA

$$(E = E^0, e = e^0)$$

$$\frac{E^0}{E_1} = \frac{\operatorname{cosh} \alpha \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\operatorname{cosh} \alpha} \quad (5.1.2.)$$

ONDE:

$$\alpha = N \sqrt{C_8/C_5}$$

OS ESFORÇOS ENTRE ELEMENTOS E ENTRE PONTOS DE JUNÇÃO, DEVEM SER NECESSARIAMENTE DETERMINADOS, DÊSDE QUE SEU VALOR É TAMBÉM UMA MEDIDA PARA AS SOLICITAÇÕES ENTRE ESPIRAS, EM CONSEQUÊNCIA, UM ISOLAMENTO CAPAZ DE RESISTIR A TAIS ESFORÇOS DEVE SER EXIGIDO.

OS GRADIENTES AO LONGO DÊSTES ENROLAMENTOS SÃO DADOS PELAS DERIVADAS DAS EXPRESSÕES (5.1.1.) E (5.1.2.) PARA UM PONTO (x),

VIDE PÁGINA SEGUINTE.

ASSIM:

$$(5.1.3.) \quad \left. \begin{aligned} \frac{e^x}{E_1} &= 2 \frac{\cosh \alpha (1-x/L)}{\sinh \alpha} \\ \frac{e^y}{E_1} &= 2 \frac{\sinh \alpha (1-x/L)}{\cosh \alpha} \end{aligned} \right\} \times \begin{cases} \sinh \beta \\ \beta \end{cases}$$

ONDE $\sinh \beta$ E β PODEM SER UM FATOR NAS EQUAÇÕES ACIMA,

SENDO:

$$\beta = \sqrt{C_2/C_3} = \alpha/N \Rightarrow \alpha = N\beta \quad (5.1.4.)$$

O MÁXIMO VALOR DE (e) DÁ-SE NO TERMINAL DA LINHA EM A. DESIGNEMOS POR $e_1 = e(x=L/N)$ O VALOR REAL ENTRE OS DOIS PRIMEIROS ELEMENTOS E POR $e_0 = e(x=0)$ QUE REPRESENTA UMA EXTRAPOLAÇÃO DE $e(x)$ PARA O PONTO A.

DA EQUAÇÃO 5.1.3 OBTÉMOS :

$$(5.1.5.) \quad \left. \begin{aligned} e_1^*/E_1 &= 2 \cosh(\alpha - \beta) / \sinh \alpha \\ e_1^y/E_1 &= 2 \sinh(\alpha - \beta) / \cosh \alpha \\ e_0^*/E_1 &= 2 \operatorname{cotg} h \alpha \\ e_0^y/E_1 &= 2 \tanh \alpha \end{aligned} \right\} \times \begin{bmatrix} \sinh \beta \\ \beta \end{bmatrix}$$

AS QUAIS COMBINADAS COM A EQUAÇÃO 5.1.3 E COMPARADAS COM A EQUAÇÃO 5.1.1, DÃO AS SEGUINTE IGUALDADES :

$$e^*/e_0^* = E^0/E_1, \quad e^y/e_0^y = E^y/E_1 \quad (5.1.6.)$$

E ENTÃO :

$$(5.1.7) \quad \frac{e^*}{e_1^*} = \frac{E^o}{E^o(x=L/N)} = \frac{\cosh \alpha (1-x/L)}{\cosh h (\alpha - \beta)}$$

$$\frac{e^o}{e_1^o} = \frac{E^+}{E^+(x=L/N)} = \frac{\sinh \alpha (1-x/L)}{\sinh h (\alpha - \beta)}$$

DAÍ PODEMOS ESCREVER:

$$\frac{e^*}{E_1} = \left(\frac{e_1^*}{E_1} \right) \left(\frac{E^o}{E^o(x=L/N)} \right) \quad (5.1.8)$$

$$\frac{e^o}{E_1} = \left(\frac{e_1^o}{E_1} \right) \left(\frac{E^+}{E^+(x=L/N)} \right)$$

COMO AS DISTRIBUIÇÕES DE (E) E (e) NAS EQUAÇÕES 5.1.6, NÃO DEPENDEM DE β , ELAS PODEM SER ANALIZADAS A PARTIR DAS EQUAÇÕES 5.1.1 E 5.1.2 PARA DIFERENTES VALORES DE α PLOTANDO AS RELAÇÕES DE TENSÃO $\frac{E}{E_1}$ E $\frac{e}{e_1}$ CONTRA x/L . (VER FIGURA 5.4)

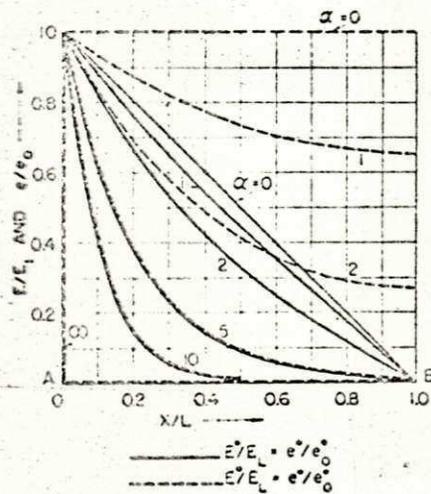


FIG. 5.4

DISTRIBUIÇÃO DO SURTO DE TENSÃO EM UM ENROLAMENTO COM ISOLAMENTO UNIFORME.

OBSERVA-SE QUE UMA DISTRIBUIÇÃO BASTANTE NÃO UNIFORME OCORRE QUANDO (α) CRESCE.

PARA VALORES DE (α) SUPERIOR A QUATRO (4), O QUE É GERAL - MENTE O CASO PARA ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS, AS CURVAS DADAS PELAS EXPRESSÕES 5.1.1 E 5.1.2 SÃO APROXIMADAMENTE AS MESMAS.

O ESTUDO DAS SOLICITAÇÕES NAS EXTREMIDADES DA LINHA E PARA VALORES ELEVADOS DE $(\alpha = N\beta)$ QUE É O CASO DE ENROLAMENTO RELATIVAMENTE LONGO, OS ESFORÇOS OBTIDOS QUER A EXTREMIDADE B SEJA OU NÃO ATERRADA TÊM PRATICAMENTE OS MESMOS VALORES.

FAZENDO ABSTRAÇÃO QUANTO AS DEDUÇÕES MATEMÁTICAS QUE FOGEM AO ESCOPO DO PRESENTE TRABALHO ENCONTRAMOS:

$$\frac{E}{E_1} \sim e^{-\beta x / \Delta x} \quad (5.1.9.)$$

$$\frac{z}{z_1} = 2 \frac{E}{E_1} \operatorname{senh} \beta$$

PARA

$$\alpha \gg 1 \quad x/l \ll 1$$

REPRESENTANDO POR (z_0^∞) O VALOR DE z_0 PARA UMA BOBINA INFINITAMENTE LONGA TEMOS:

$$(5.2.1) \quad \frac{z_0}{E_1} = \frac{z_0^\infty}{E_1} = 2 \operatorname{senh} \beta$$

$$\frac{z_1}{E_1} = 1 - z^{-2\beta} = e^{-\beta} \frac{z_0^\infty}{E_1}$$

PARA

$$\alpha \gg 1$$

ESTAS TENSÕES FICAM INDEPENDENTES DA LIGAÇÃO EM B E DO COMPRIMENTO L DA BOBINA.

EM PARTICULAR:

$$\frac{e_1}{E_1} \approx \frac{e_0}{E_1} \approx 2\beta = \frac{2}{N} \alpha \quad (5.2.2)$$

PARA $\beta \ll 1$ $\alpha \gg 1$

ONDE: $\frac{e_1}{E_1}$ TORNA-SE PROPORCIONAL A α .

DO EXPOSTO FICA PROVADO QUE UM AUMENTO DO COMPRIMENTO DO ENROLAMENTO TORNE O ESFORÇO PRÓXIMO À EXTREMIDADE DA LINHA e/E_1 MUITO MAIOR QUANDO COMPARADO COM A DISTRIBUIÇÃO LINEAR $e/E_1 = 2/N$, ENQUANTO A SOLICITAÇÃO (e) PERMANECE CONSTANTE.

ISTO PODE SER MOSTRADO POR UM FATOR DE NÃO LINEARIDADE $R = Ne/2E_1$. O VALOR DÊSTE FATOR PARA O TERMINAL B ATERRADO OU NÃO, DESIGNANDO-SE RESPECTIVAMENTE POR $R_0 = R_0^*$ E $R_0 = R_0^*$ SENDO R_0 O VALOR DE R PARA $x=0$, É DADO POR:

$$\left[\frac{R_0^*}{R_0} \right] = \frac{\sinh \beta}{\beta} \alpha [\cot \alpha]^{±1} \quad (5.2.3.)$$

OS EXPOENTES ($±$) SÃO RELATIVOS A R_0^* E R_0 , RESPECTIVAMENTE.

MARCANDO-SE OS VALORES DE R_0 E DE α EM UM GRÁFICO (VER FIGURA 5.5), OBSERVA-SE QUE OS VALORES DE R_0 AUMENTAM PROPORCIONALMENTE COM N OU α .

VER FIGURA 5.5. NA PÁGINA SEGUINTE.

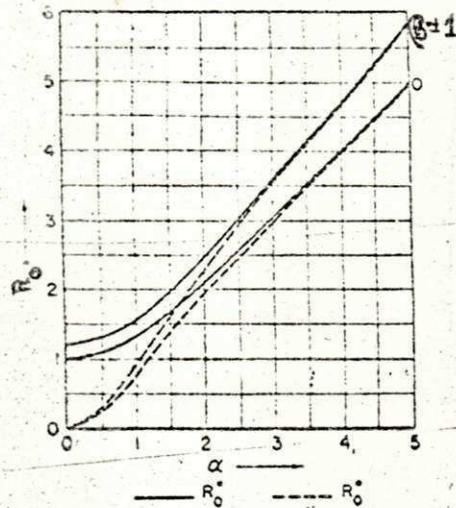


FIG. 5.5

FATOR DE NÃO LINEARIDADE PARA A MAIOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NA EXTREMIDADE DO ENROLAMENTO PRÓXIMA À LINHA.

A TENSÃO (E) PARA QUALQUER PONTO (x) PODE SER DADA POR:

$$E = 2 (E_1 / N) R_0 (x / l_0)$$

A TENSÃO (E_1) ENTRE OS DOIS PRIMEIROS ELEMENTOS, BEM COMO A TENSÃO (E) ENTRE DOIS ELEMENTOS ADJACENTES NO INTERIOR DO ENROLAMENTO PODE SER OBTIDO ATRAVÉS DE UMA FORMA NOMOGRÁFICA (VER FIGURA 5.6) REPRESENTADA POR :

$$\mu (l_1 / E_1) f(\beta) + \nu(x) g(\beta) = D \omega(\beta)$$

ONDE :

$$(5.2.4) \quad f(\beta) = \frac{D}{1 + (b/a) \operatorname{senh} 2\beta}$$

$$g(\beta) = \frac{D}{1 + (a/b) \operatorname{cossch} 2\beta}$$

$$u^* = \frac{1}{a} (e_1^0 / E_1)$$

$$u^0 = \frac{1}{a} (e_1^0 / E_1)$$

$$\left[\begin{array}{l} \delta^* \\ \delta^0 \end{array} \right] = \frac{2}{b} (1 + e^{-2\beta})^{-1}, \quad w = \frac{1 - e^{-2\beta}}{a + b \operatorname{sech} 2\beta}$$

OS VALORES u^* , δ^* E u^0 , δ^0 , CORRESPONDEM À EXTREMIDADE B ATERRADA OU ISOLADA, RESPECTIVAMENTE. REPRESENTAM AS ESCALAS DAS ORDENADAS DAS VARIÁVEIS e_1/E_1 E α COM ESPAÇAMENTO CONSTANTE D E FATORES DE ESCALA a E b , ENQUANTO w É A ORDENADA DA ESCALA CURVA DA VARIÁVEL β COM ABCISSAS VARIÁVEIS f E g PARA AS ESCALAS

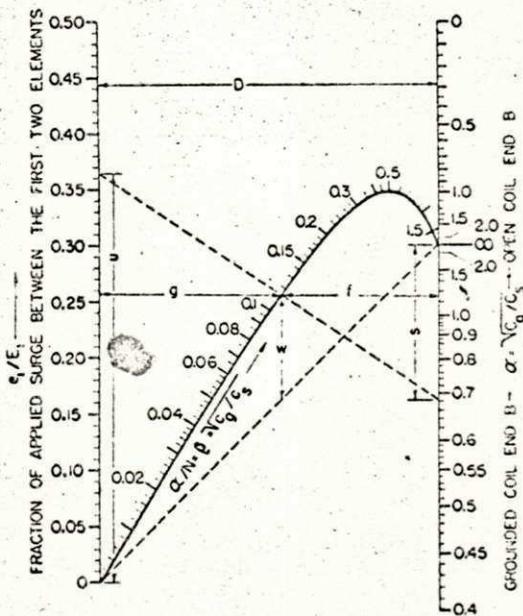


FIG. 5.6

NOMÓGRAFO PARA CÁLCULO DE SOLICITAÇÕES DE SURTO DE TENSÃO EM UM ENROLAMENTO.

5.4- MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO

PARA TRATARMOS A MALHA MENOR (VER FIGURA 5,3) EM TÊRMO ANALÍTICOS E COM O PROPÓSITO DE FACILITAR OS CÁLCULOS, CONSIDERAMOS UMA MALHA ISOLADA ASSOCIADA COM CADA ELEMENTO ATRAVÉS DE LINHAS CENTRAIS $A' A''$ E $B' B''$ ENTRE ELEMENTOS COMO INDICA A FIGURA 5.3, NA SEÇÃO 5.2.

POR RAZÕES DE SIMETRIA ESTAS LINHAS CENTRAIS ESTÃO A UM MESMO POTENCIAL, IGUAL AO DA JUNÇÃO ENTRE ELEMENTOS.

A MALHA DE CAPACITÂNCIA DE UM ELEMENTO EXTENDE-SE DE $A' A''$ PARA $B' B''$ COM DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO V E $V-V$, COM UM VALOR MÁXIMO \bar{V} PARA CADA EXTREMIDADE.

DENTRO DESTAS CONSIDERAÇÕES A ANÁLISE DA MENOR MALHA DE DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO, TORNA-SE SEMELHANTE À DA MALHA DE MAIOR DISTRIBUIÇÃO, APRESENTADA NA FIGURA 5.1 DA SEÇÃO 5.2, COM AS SEGUINTE CORRESPONDÊNCIAS.

I) A LINHA ESTABELECIDADA ENTRE ELEMENTOS ADJACENTES IDÊNTICA À TERRA NA MALHA MAIOR.

II) OS ELEMENTOS INDIVIDUAIS NA MENOR MALHA CORRESPONDEM AO ENROLAMENTO NA MALHA MAIOR.

III) AS ESPIRAS INDIVIDUAIS NA MENOR MALHA EQUIVALEM A UM ELEMENTO SIMPLES NA MAIOR MALHA.

NESTA MALHA DE CAPACITÂNCIAS OS CAMPOS SÃO REPRESENTADOS

SENTADOS PELAS TENSÕES EXTERNAS V E $\bar{V} - V$ NAS CAPACITÂNCIAS k_a E k_t POR UNIDADE DE COMPRIMENTO DO ELEMENTO E POR c_a E c_t ENTRE ESPIRAS ADJACENTES, RESPECTIVAMENTE.

A ANÁLISE É FEITA CONSIDERANDO A MALHA MENOR UNIFORMEMENTE ISOLADA E O EFEITO DAS PONTAS (FRINGING EFFECT) DESPREZÍVEL.

ASSIM SENDO, AS CAPACITÂNCIAS k_a, k_b E k_t SÃO TÔTAS IGUAIS E PODEM SER SUBSTITUIDAS POR CAPACITÂNCIAS TÔTAS C_A, C_B E C_T ENTRE ELEMENTOS E ENTRE ESPIRAS, RESPECTIVAMENTE.

NESTA MALHA (x) É CONSIDERADO CONSTANTE, EVIDENTEMENTE, DESTA MANEIRA V E \bar{V} SERÃO TRATADOS SOMENTE COMO FUNÇÕES DE (z) , SALVO NA EXTREMIDADE ONDE $z = 0$; O VALOR MÁXIMO DE $\bar{V} = V (z = 0)$ É UMA FUNÇÃO DE (x) REPRESENTADO POR $\bar{V}(x)$.

COMO FUNÇÃO DE (z) A DISTRIBUIÇÃO V É DADA POR:

$$(5.2.5) \quad \frac{V}{\bar{V}} = \frac{1 - c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \cdot \frac{\sinh((1-z/l)\gamma)}{\sinh \gamma} + \frac{c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \left[1 + \frac{\sinh((1-2z/l)\gamma/2)}{\sinh \gamma/2} \right]$$

ONDE:

$$\gamma = \sqrt{2(c_a + c_b)/c_t} = 2\lambda \gamma_a$$

(5.2.6)

$$\gamma_a = \sqrt{c_a/c_t}$$

$$\lambda = \sqrt{(1 + c_b/c_a)/2}$$

SENDO:

γ = CONSTANTE DE UMA MENOR DISTRIBUIÇÃO

γ_a = CONSTANTE NORMALIZADA

$\lambda = \frac{C_A}{E} \frac{C_B}{C_A}$ = UMA MEDIDA DE DISSIMETRIA DAS CAPACITÂNCIAS ,

AS SOLICITAÇÕES () ENTRE ESPIRAS SÃO DADAS PELA EXPRESSÃO :

$$(5.2.7) \quad \frac{v}{V} = \left[\frac{1 - c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \cdot \frac{\cosh((1-z/H)\gamma)}{\sinh \gamma} + \frac{c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \cdot \frac{\cosh((1-2z/H)\gamma/2)}{\sinh \gamma/2} \right] \times$$

$\times \left[\begin{array}{l} 2 \sinh \gamma/2m \text{ (CONSIDERANDO-SE O INCREMENTO DE } V(z) \\ \gamma/m \text{ (PELA INCLINAÇÃO DE } V(z)) \end{array} \right]$

POR RAZÕES DE SIMETRIA A ANÁLISE É CONDUZIDA PARA OS VALORES DE

$$0 \leq c_b \leq c_a$$

PARA $c_b \leq c_a$, O VALOR MÁXIMO DE (v) REPRESENTADO POR (\bar{v}), SERÁ OBTIDO PARA $z = H/2N$ ATRAVÉS DA EXPRESSÃO

$$\frac{\bar{v}}{V} = 2 \sinh \gamma (2m) \left[\frac{1 - c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \frac{\cosh(\gamma - \gamma/2m)}{\sinh \gamma} + \frac{c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \times \frac{\cosh(\gamma - \gamma/m)/2}{\sinh \gamma/2} \right] \quad (5.2.8)$$

EXTRAPOLANDO (v) PARA $z = 0$ TEM-SE:

$$(5.2.9) \quad \frac{v_0}{V} = 2 \sinh \gamma / (2m) \left[\frac{1 - c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \operatorname{ctn} h \gamma + \frac{c_b/c_a}{1 + c_b/c_a} \operatorname{ctn} h \gamma/2 \right]$$

PARA $\gamma \gg 1$ E $\gamma/n \ll 1$ ESTES VALORES SÃO REDUZIDOS A:

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}} = \frac{v_0}{\bar{v}} = \gamma/n \text{ para } \gamma \gg 1 \text{ e } \gamma/n \ll 1$$

NO CASO DE $c_A = c_B$, QUE REPRESENTA OS ELEMENTOS SIMETRICAMENTE ISOLADOS, AS EQUAÇÕES 5.2.5 A 5.2.9 SE REDUZEM A:

$$\frac{v}{\bar{v}} = \left[1 + \frac{\sinh \gamma a (1 - 2z/H)}{\sinh \gamma a} \right] \quad (5.3.2)$$

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\cosh \gamma a (1 - 2z/H)}{\cosh \gamma a}$$

NO CASO DE $c_B = 0$ QUE É QUANDO UM DOS DOIS ELEMENTOS SUPERFICIAIS ESTÁ ABERTO, AS EQUAÇÕES SE TRANSFORMAM PARA:

$$(5.3.3.) \quad \frac{v}{\bar{v}} = \frac{\sinh \gamma (1 - z/H)}{\sinh \gamma}, \quad \frac{v}{v_0} = \frac{\cosh \gamma (1 - z/H)}{\cosh \gamma}$$

PLOTANDO-SE OS VALORES DE $\frac{v}{\bar{v}}$ E $\frac{v}{v_0}$ PARA OS CASOS ANTERIORES PARA VÁRIOS VALORES DE γa PODEMOS OBTER GRÁFICAMENTE A MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES ENTRE ELEMENTOS E ENTRE ESPIRAS, CONFORME NOS INDICA A FIGURA 5.7 E 5.8.

VIDE FIGURA NA PÁGINA SEGUINTE.

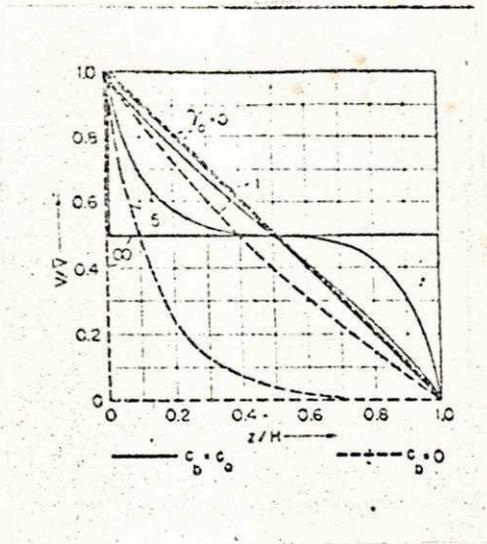


FIG. 5.7 - MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO ENTRE ELEMENTOS

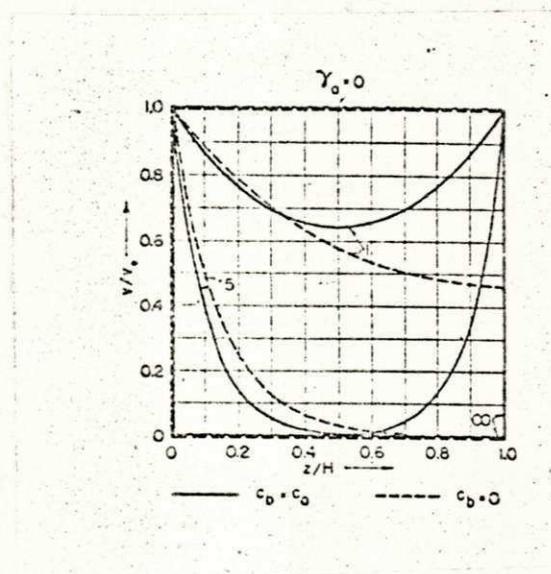


FIG. 5.8 - MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO ENTRE ESPIRAS

OBSERVA-SE PARA O CASO $C_B = C_A$, UMA CERTA SIMETRIA DOS VALORES V E \tilde{V} EM RELAÇÃO A $z = H/2$ PARA AMBAS AS FIGURAS, NOTA-SE TAMBÉM QUE AS SOLICITAÇÕES (v) ENTRE ESPIRAS \bar{T} PARA AMBAS EXTREMIDADES DO ELEMENTO SÃO MUITO MAIORES QUE NO CENTRO.

QUANTO AO CASO $C_B = 0$ PODE-SE NOTAR DAS CURVAS $\frac{V}{\tilde{V}}$ E $\frac{v}{v_0}$ UMA ANALOGIA QUANTO A FORMA, COM AS CURVAS DA FIGURA 5.3, PODEMOS ASSIM CONCLUIR QUE A MENOR MALHA REDUZ-SE A FORMA DA MALHA MAIOR, VERIFICA-SE TAMBÉM QUE AS SOLICITAÇÕES SÃO MUITO MAIORES PARA UMA EXTREMIDADE.

5.5 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EM ENROLAMENTOS DE BAIXA IMPEDÂNCIA

NA SECÇÃO 3.8 DO CAPÍTULO III, ABORDAMOS O PROBLEMA DAS LIGAÇÕES PARA ENSAIO DE IMPULSO EM ENROLAMENTOS DE BAIXA IMPEDÂNCIA, AGORA ESTAMOS INTERESSADOS EM ANALISAR AS DISTRIBUIÇÕES DE TENSÃO EM CADA UM DOS MÉTODOS PARA TESTAR ESTES ENROLAMENTOS.

1) - QUANDO A TÉCNICA ADOTADA FÔR AQUELA DE INTERLIGAR OS TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS DE MESMO BIL, SERÃO PRODUZIDAS GRANDES SOLICITAÇÕES NO ISOLAMENTO DO ENROLAMENTO PARA TERRA E MUITO MENORES SOLICITAÇÕES ENTRE ESPIRAS E ENTRE BOBINAS, EM VIRTUDE DOS ESFORÇOS DE TENSÃO ENTRE ESPIRAS E ENTRE BOBINAS SER FUNÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS ENTRE EXTREMIDADES DE ELEMENTOS ADJACENTES E DA CAPACITÂNCIA PARA TERRA.

NA FIGURA 5.9 ESTÁ REPRESENTADO O CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR, ONDE AS CAPACITÂNCIAS DE UMA EXTREMIDADE DO ENROLAMENTO PARA A OUTRA EXTREMIDADE SÃO REPRESENTADAS POR C_1 E C_2 E A CAPACITÂNCIA PARA TERRA POR C_3 .

INICIALMENTE SUPOMOS QUE AS CAPACITÂNCIAS C_1 E C_2 SÃO MAIORES COMPARADAS COM C_3 , UMA DISTRIBUIÇÃO INICIAL SERÁ PRODUZIDA DE MODO SEMELHANTE À CURVA X (VER FIGURA 5.9.A). A DISTRIBUIÇÃO FINAL SENDO A RETA, O ENVELOPE DAS OSCILAÇÕES NO ENROLAMENTO QUE REPRESENTAM A PASSAGEM DA DISTRIBUIÇÃO INICIAL À FINAL ESTARÁ ENTRE AS CURVAS X E X', ASSIM FICA MOSTRADO PEQUENAS SOLICITAÇÕES ENTRE ESPIRAS E ENTRE BOBINAS, PORÉM ALTAS SOLICITAÇÕES DE UM EXTREMO A OUTRO DO ENROLAMENTO.

(VIDE FIGURA EM OUTRA FOLHA)

FIG. 5.9 A

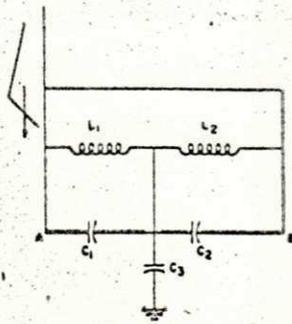


FIG. 5.9 B

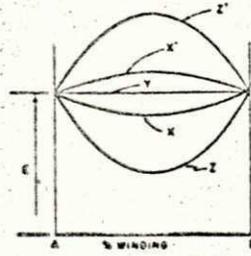


FIG. 5.9

TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS DE MESMO
BIL INTERLIGADOS

SE NO ENTANTO AS CAPACITÂNCIAS C_1 E C_2 FOREM PEQUENAS EM RELAÇÃO A C_3 , UMA DISTRIBUIÇÃO INICIAL SEMELHANTE À CURVA Z SERÁ PRODUZIDA, A DISTRIBUIÇÃO FINAL RESTARÁ A MESMA E AS OSCILAÇÕES ESTARÃO CONTIDAS NO ENVELOPE FORMADO PELAS CURVAS Z E Z' .

EM CONSEQUÊNCIA GRANDES ESFORÇOS ENTRE ESPIRAS E ENTRE BOBINAS SERÃO PRODUZIDOS E O ISOLAMENTO PARA TERRA CONTINUARÁ AINDA BASTANTE SOLICITADO.

DISTO RESULTA QUE ÊSTE MÉTODO NÃO É RECOMENDADO PARA SER UMA SATISFATÓRIA TÉCNICA PARA ENSAIO, HAJA VISTO QUE EM PARTES DO ENROLAMENTO OS ESFORÇOS PODEM OSCILAR EM 200% DA TENSÃO APLICADA.

II) - O OUTRO MÉTODO DE TESTE ATERRA-SE A TRAVÉS DE RESISTÊNCIAS NÃO SUPERIOR A 500 OHMS DO TERMINAL DO NEUTRO DO ENROLAMENTO, AS SOLICITAÇÕES DIFEREM DO CASO ANTERIOR.

A FIGURA 5.10, AINDICA O CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR. SE AS CAPACITÂNCIAS C_1 E C_2 EXTREMAMEN

TE GRANDES COMPARADAS COM C_3 , A DISTRIBUIÇÃO INICIAL SERÁ SEMELHANTE À CURVA P DA FIGURA 5.10 B, A DISTRIBUIÇÃO FINAL A PROXIMADAMENTE À LINHA Q, AS OSCILAÇÕES INTERMEDIÁRIAS ENTRE AS CURVAS P E P'. (VIDE FIGURAS 5.10.A E 5.10.B EM FOLHA SEGUINTE).

OCORRERÁ DESTE MODO, SOLICITAÇÕES MAIORES ENTRE ESPIRAS E ENTRE BOBINAS EM RELAÇÃO AO CASO ANTERIOR QUE TEM A MESMA RELAÇÃO DE CAPACITÂNCIA. QUANDO C_1 E C_2 SÃO MUITO PEQUENAS COMPARADAS COM C_3 , UMA DISTRIBUIÇÃO ANÁLOGA À S OCORRERÁ, A DISTRIBUIÇÃO FINAL PODE MANTER-SE A MESMA E AS OSCILAÇÕES FICARÃO CONTIDAS NO ENVELOPE S - S'.

OBSERVA-SE QUE PARTES DO ISOLAMENTO PARA TERRA FICARÃO MUITO SOLICITADAS POR TENSÃO BASTANTE ELEVADAS.

COMUMENTE CONECTA-SE RESISTÊNCIAS SOMENTE PARA REDUZIR A CAUDA DA ONDA PARA 50 MICROSEGUNDOS E A TENSÃO ATRAVÉS DO RESISTOR É GERALMENTE LIMITADA PARA 80% DO BIL DA EXTREMIDADE ATERRADA DO ENROLAMENTO.

SE NO EXEMPLO A RESISTÊNCIA EXIGIDA PARA PRODUZIR A CAUDA DE 50 MICROSEGUNDOS FÔSSE MENOR A DISTRIBUIÇÃO FINAL PASSARIA A SER CURVA Q' E AS OSCILAÇÕES FICARIAM LIMITADAS AO ENVELOPE S - S'.

IIII) - A EXTREMIDADE DE UM ENROLAMENTO ESTÁ SOLIDAMENTE ATERRADA, CONFORME INDICA A MALHA EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR (VER FIG. 5.11.A), SE AS CAPACITÂNCIAS C_1 E C_2 FOREM MUITO GRANDES COMPARADAS COM C_3 AS DISTRIBUIÇÕES INICIAL E FINAL SERÃO SEMELHANTES ÀS CURVAS M E N E O ENVELOPE DAS OSCILAÇÕES SERÁ M - M'. QUANDO AS CAPACITÂNCIAS C_1 E C_2 FOREM EXTREMAMENTE PEQUENAS QUANDO COMPARADAS A C_3 , ESTA DISTRIBUIÇÃO INICIAL PASSARÁ A SER O DO QUE RESULTARÁ O ENVELOPE DAS OSCILAÇÕES O - O', VERIFICA-SE NESTE CASO UM AUMENTO DE α , PORTANTO APLICADA HÁ PORÇÕES DO ISOLAMENTO QUE PODE EXCEDER A TENSÃO APLICADA, PARA OS TERMINAIS DA LINHA.

ESTE MÉTODO É ÚTIL PARA MEDIDAS DE CORRENTE DESDE QUE NÃO HÁ AUMENTO NA RESISTÊNCIA DO CIRCUITO.

PELOS TRÊS MÉTODOS APRESENTADOS, CONCLUI SE QUE O PROJETO DO TRANSFORMADOR É UM FATOR QUE SELECIONA O MÉTODO DE TESTE A UTILIZAR. CADA FABRICANTE UTILIZA O MÉTODO QUE MELHOR APLICA O TESTE NO ENROLAMENTO.

FIG. 5.10 A

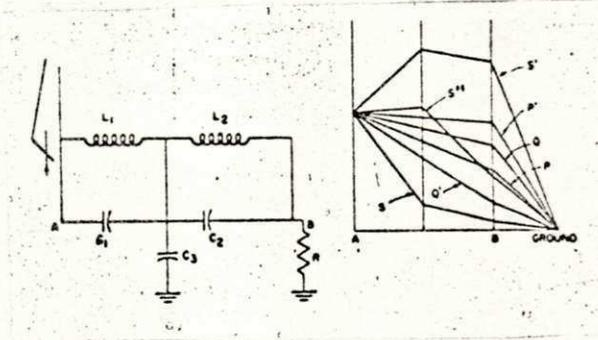


FIG. 5.10 B

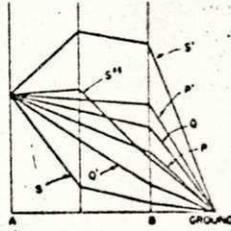


FIG. 5.10.

ENROLAMENTO ATERRADO POR RESISTOR

FIG. 5.11 A

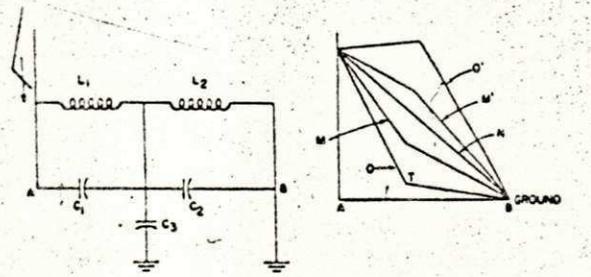


FIG. 5.11 B

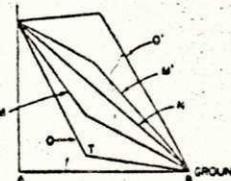


FIG. 5.11.

ENROLAMENTO COM UM TERMINAL SOLIDAMENTE ATERRADO

5.6- ANÁLISE DAS POSSÍVEIS DISPOSIÇÕES DOS ENROLAMENTOS
CONCÊNTRICOS :

A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL, COMO JÁ VIMOS PODEM SER DETERMINADAS POR MEIO DE CÁLCULOS EXAUSTIVOS TORNADOS MAIS FÁCEIS QUANDO SE SUBSTITUI AS REATÂNCIAS DAS CAPACITÂNCIAS POR RESISTÊNCIAS, SENDO POSSÍVEL O CÁLCULO ATRAVÉS DE TABELAS.

ENTRETANTO UM MÉTODO SIMPLES CONSISTE EM SIMULAR UM MODELO DA MENOR DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO SOBRE UM PAPEL RESISTENTE, O PRÓPRIO PAPEL TRATA O CAMPO ENTRE ELEMENTOS, OS TRAÇOS SIMULAM O CAMPO ENTRE ESPIRAS, SENDO QUE PLACAS METÁLICAS FORAM UTILIZADAS PARA REPRESENTAR AS ESPIRAS.

A DISPOSIÇÃO MAIS CORRENTE DOS ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS É AQUELA EM QUE O ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO ESTÁ COLOCADO SOBRE O CIRCUITO MAGNÉTICO E O ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO COLOCADO EXTERIORMENTE, A LINHA CONECTADA À PARTE SUPERIOR E O NEUTRO À PARTE INFERIOR DA COLUNA, ESTA DISPOSIÇÃO REPRESENTADA NA FIGURA 5.12. JUNTAMENTE COM A DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE POTENCIAL MOSTRADO NA FIGURA 5.13.

VIDE FIGURA NA PÁGINA SEGUINTE.

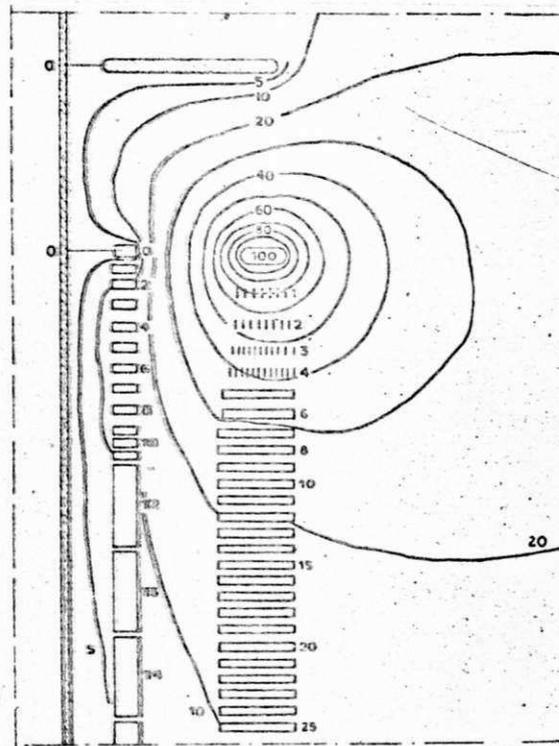


FIG. 5.12.
MEDIDA DA DISTRIBUIÇÃO
DE CAMPO

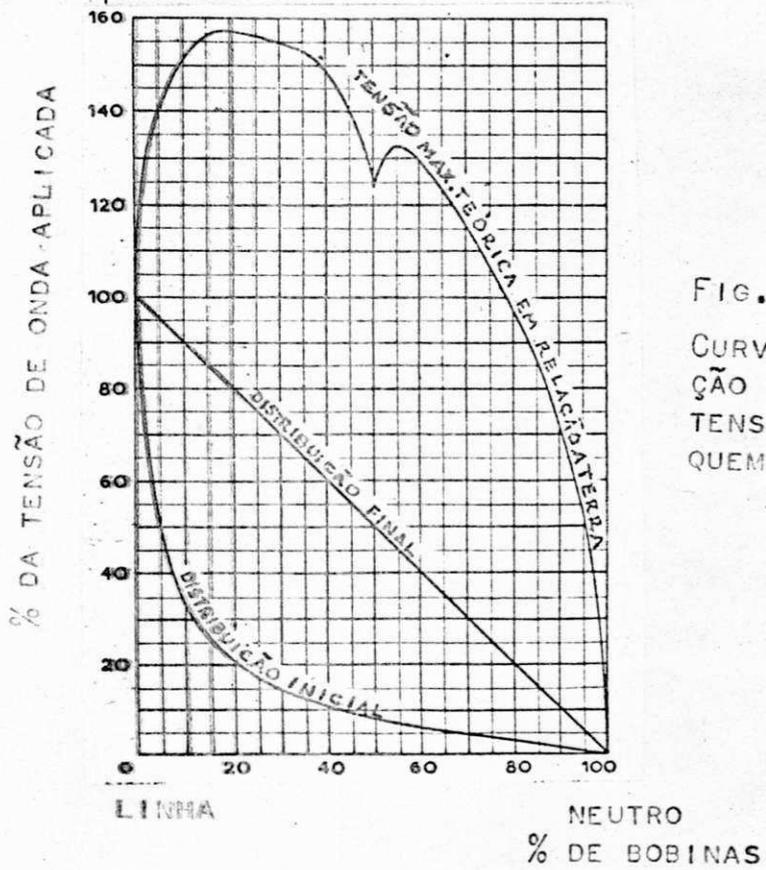


FIG. 5.13
CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO
INICIAL E FINAL DE
TENSÃO DEDUZIDAS DA ES-
QUEMATIZAÇÃO DA FIGURA-
5.12.

O ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO COMPREENDENDO UM EMPILHAMENTO DE 60 BOBINAS É MUNIDO DE UMA BLINDAGEM ESTÁTICA CONSTITUÍDA POR UMA CURVA ABERTA NA SUPERFÍCIE METÁLICA DE BORDOS COORDENADOS, SENSIVELMENTE DA MESMA ESPESSURA DAS BOBINAS, CONVENIENTEMENTE ISOLADAS E COLOCADAS SÔBRE A BOBINA SUPERIOR, SENDO LIGADO A ESTA E À LINHA.

ESTA BLINDAGEM ESTÁTICA TEM POR FINALIDADE REDUZIR AS SOBRETENSÕES ENTRE ESPIRAS NAS PRIMEIRAS BOBINAS E DE MELHORAR A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NOS TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS, PRINCIPALMENTE DURANTE OS ENSAIOS DE RIGIDEZ DIELÉTRICA.

A FIGURA 5.13. NOS FORNECE A DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO CORRESPONDENTE À DO MODELO REPRESENTADO NA FIGURA 5.12. BEM COMO A REPARTIÇÃO FINAL SENSIVELMENTE UNIFORME E AS TENSÕES MÁXIMAS TEÓRICAS EM RELAÇÃO À TERRA, OBTIDA DAS OUTRAS DUAS CURVAS.

A CURVA DAS SOBRETENSÕES EM RELAÇÃO A MASSA, INDICA QUE NO CASO DE UM TRANSFORMADOR COM NEUTRO ATERRADO, NÃO É CONVENIENTE ADOTAR UM ISOLAMENTO UNIFORMEMENTE DECRESCENTE DA LINHA AO NEUTRO, COMO PERMITE OS ENSAIOS À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL.

COM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS NORMAIS, O ISOLAMENTO GRADUADO DEVE SE LIMITAR A UMA REDUÇÃO DOS ISOLAMENTOS NO LADO DO NEUTRO.

UMA OUTRA DISPOSIÇÃO DOS ENROLAMENTOS É AQUELA EM QUE O ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO SITUADO EXTERIORMENTE AO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO, É COMPÔSTO POR DUAS PARTES ENROLADAS EM SENTIDO INVERSO E LIGADAS EM PARALELO, A LINHA ESTANDO CONECTADA AO MEIO DA COLUNA E O NEUTRO ÀS DUAS EXTREMIDADES. A FIGURA 5.14. (NA PÁGINA SEGUINTE) NOS MOSTRA ESSE CASO.

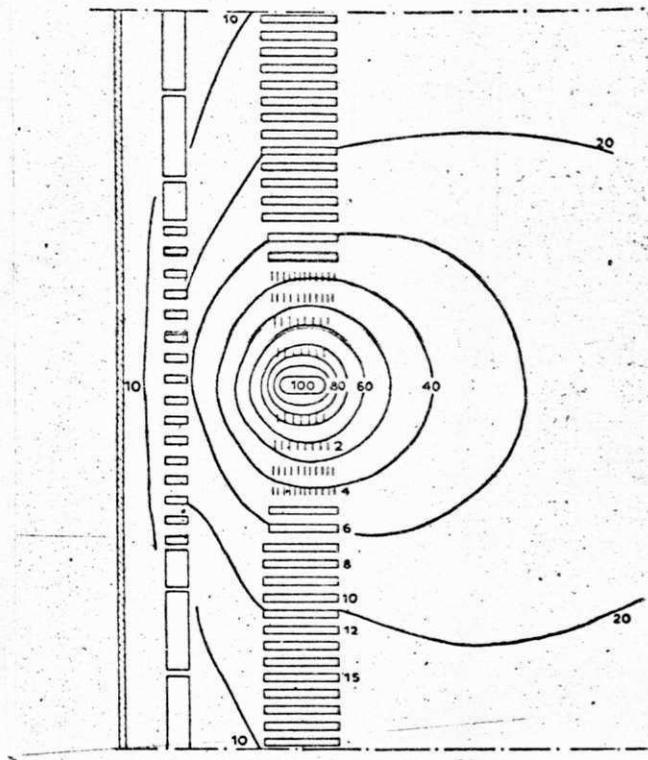


FIG. 5.14

MEDIDA DA DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE POTENCIAL,
ESTANDO A LINHA CONECTADA AO MEIO DA COLUNA.

VERIFICA-SE QUE A DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL MOSTRADA NA FIGURA 5.15 (NA PÁGINA SEGUINTE), É BEM MELHOR QUE AQUELA RELATIVA AO CASO ANTERIOR, OS SURTOS EM RELAÇÃO A MASSA SÃO SENSIVELMENTE REDUZIDOS.

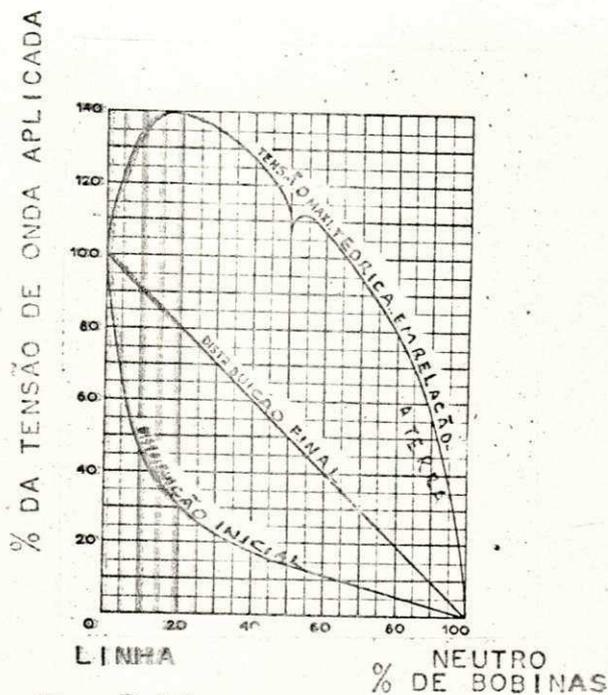


FIG. 5.15.

CURVAS DAS DISTRIBUIÇÕES INICIAIS E FINAIS E DA TENSÃO MÁXIMA TEÓRICA EM RELAÇÃO A TERRA CORRESPONDENDO AO MODELO DA FIG. 5.14.

ESTA REDUÇÃO NAS SOBRETENSÕES SE ORIGINA PRINCIPALMENTE DO FATO DE QUE EM CADA PARTE DO ENROLAMENTO A RELAÇÃO SE ENCONTRA REDUZIDA.

SE CONECTÁSSEMOS A LINHA À EXTREMIDADE DA COLUNA E O NEUTRO AO MEIO, PRATICAMENTE TERIAMOS UMA DISTRIBUIÇÃO INICIAL BEM PRÓXIMA À DO CASO ANTERIOR.

UMA OUTRA DISPOSIÇÃO SERIA O ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO IDÊNTICO AO PRIMEIRO CASO, MAS DESTA FEITA COLOCADO SOBRE O CIRCUITO MAGNÉTICO NO INTERIOR DO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO. NESTAS CONDIÇÕES OBTERIAMOS UMA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO MUITO PIOR DO QUE AQUELAS CORRESPONDENTES ÀS DISPOSIÇÕES ANTERIORES.

AS FIGURAS 5.16 E 5.17 (NA PÁGINA SEGUINTE) ILUSTRAM ESTE FATO.

COMO PODEMOS OBSERVAR, AS SOBRETENSÕES SÃO MUITO MAIS ELEVADAS DO QUE QUANDO O ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO ESTÁ DISPOSTO EXTERIORMENTE.

TAMBÉM PODEMOS TER O CASO DO ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO DO TRANSFORMADOR COLOCADO ENTRE DOIS OUTROS ENROLAMENTOS O QUE SERIA O CASO DE UM TRANSFORMADOR A TRÊS ENROLAMENTOS OU DE UMA DISPOSIÇÃO DUPLA CONCÊNTRICA COMPREENDENDO UM ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO ENTRE DOIS ENROLAMENTOS DE SEMI-BAIXA TENSÃO.

A DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE TENSÃO CONTINUA A SER DE COMPORTAMENTO PIOR DO QUE QUANDO O ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO É EXTERIOR, CASO VERIFICADO ATRAVÉS DAS FIGURAS 5.18 E 5.19.

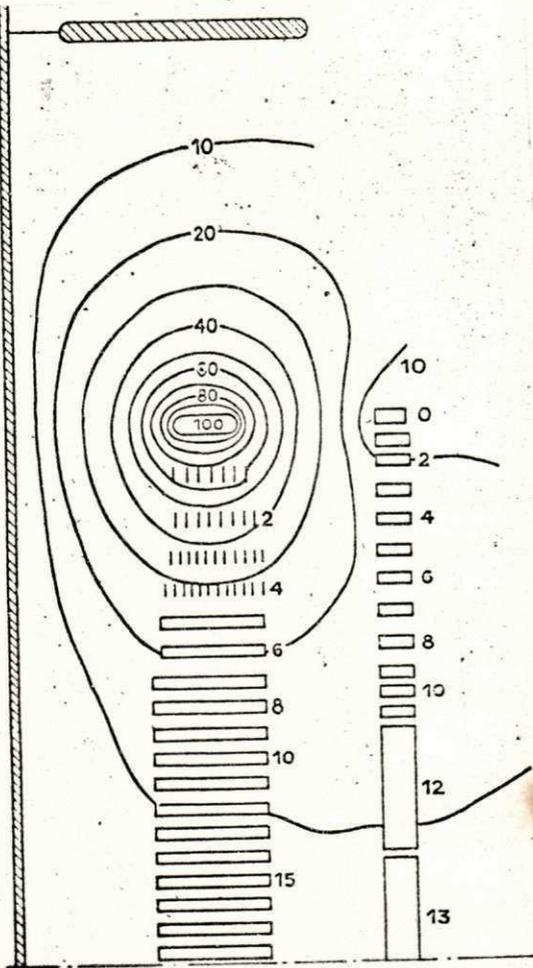


Fig. 5.16

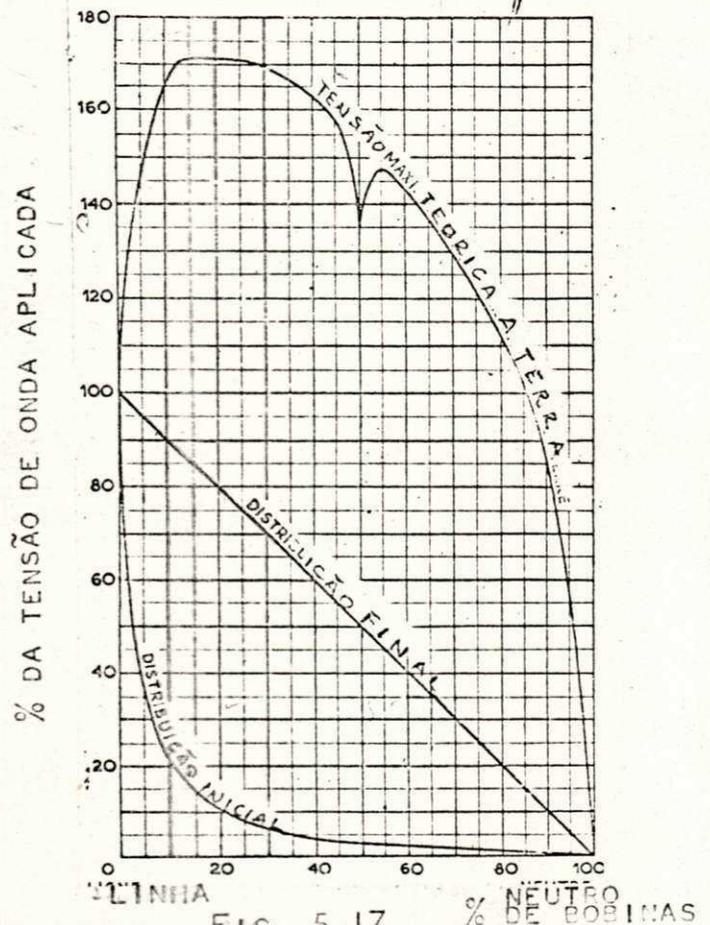


Fig. 5.17.

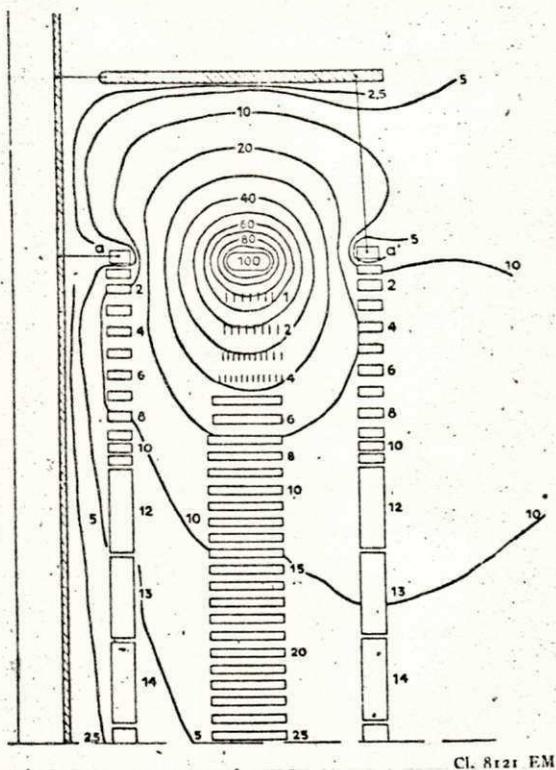


FIG. 5.18

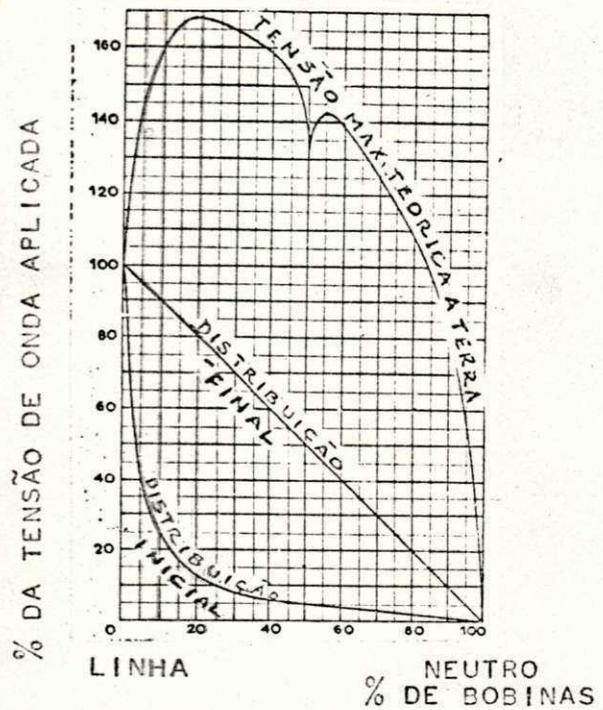


FIG. 5.19

5.7 - DISPOSIÇÕES QUE PERMITEM REDUZIR AS SOBRETENSÕES INTERNAS :

QUANDO ANALIZAMOS A MAIOR DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL, FOI SUPONDO UM ISOLAMENTO UNIFORME ATRAVÉS DE TODO O ENROLAMENTO, CONTUDO OS ELEMENTOS TERMINAIS DA BOBINA TÊM UMA SUPERFÍCIE ABERTA EM UM LADO, TAL QUE A UNIFORMIDADE DO ISOLAMENTO SERÁ DESCONTÍNUO.

ESTA NÃO UNIFORMIDADE NAS EXTREMIDADES DA BOBINA ALCANÇA UM CERTO GRAU NO ENROLAMENTO.

À UNIFORMIDADE DO ENROLAMENTO PODE SER RESTAURADA POR UMA SUPERFÍCIE METÁLICA, USUALMENTE DENOMINADA DE BLINDAGEM ESTATICA, O ENROLAMENTO BLINDADO DESTA MANEIRA EM PRINCÍPIO TERÁ AS MESMAS PROPRIEDADES DE UMA BOBINA UNIFORMEMENTE ISOLADA.

ESTAS ARMADURAS ESPECIAIS, CONVENIENTEMENTE ISOLADAS, SÃO CONECTADAS À LINHA, TÊM UMA FORMA E ESPAÇAMENTO EM RELAÇÃO AO ENROLAMENTO, TAL QUE A CORRENTE DE CAPACIDADE QUE ELAS FORNECEM A CADA BOBINA COMPENSAM A CORRENTE DE CAPACIDADE DA BOBINA A MASSA.

DESTE MODO, AS CORRENTES DERIVADAS À TERRA NÃO FLUEM MAIS PELOS ENROLAMENTOS, SÔBRE ESTAS CONDIÇÕES A DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE POTENCIAL TORNA-SE UNIFORME.

O EFEITO DA BLINDAGEM PODE SER VERIFICADO, ATRAVÉS DE UMA APROXIMAÇÃO, COM AUXÍLIO DA QUAL PODEMOS ANALISAR AS CONDIÇÕES DE QUANDO SÃO OU NÃO EMPREGADOS BLINDAGENS.

PARA ACHAR ESTA APROXIMAÇÃO UM MODELO IDENTICO AO REFERIDO NA SECÇÃO 5.5., FOI UTILIZADO, COMO MOSTRA NA FIGURA 5.20.

ESTE MODELO REPRESENTA UMA BOBINA, CUJAS DIMENSÕES ESCOLHIDAS FORAM $S = 2.10$ CM (DISTÂNCIA ENTRE ELEMENTOS ADJACENTES), $W = 1.70$ CM (LARGURA DE UMA ESPIRA), $T_c = 0.31$ CM (ESPESSURA DE UMA ESPIRA), $T_i = 0.16$ CM (ESPESSURA DO ISOLAMENTO ENTRE ESPIRAS ADJACENTES), $H = 14.1$ CM (ALTURA DO ELEMENTO) E COS $N = 29$ (ESPAÇOS ISOLADOS ENTRE ESPIRAS DE CADA ELEMENTO).

FOI ESCOLHIDO UMA RELAÇÃO DE RESISTIVIDADE NO ESPAÇO ENTRE ESPIRAS E NO ESPAÇO ENTRE OS DOIS ELEMENTOS, EQUIVALENTE À RELAÇÃO $\epsilon_r / \epsilon_a = 1.9$ DA CONSTANTE DIELÉTRICA

ENTRE ESPIRAS E ENTRE ELEMENTOS.

A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO FOI ESTUDADO NO MODELO DE DOIS ELEMENTOS COM DUAS BLINDAGENS, FIG. 5-20.A, SEM BLINDAGEM 5-20B E COM UMA BLINDAGEM APENAS 5-20.C. AS LINHAS EQUIPOTENCIAIS MEDIDAS FORAM MARCADAS NESTE MODELO PARA DIFERENTES FRAÇÕES $\frac{E}{E_1}$ DA TENSÃO E_1 APLICADA.

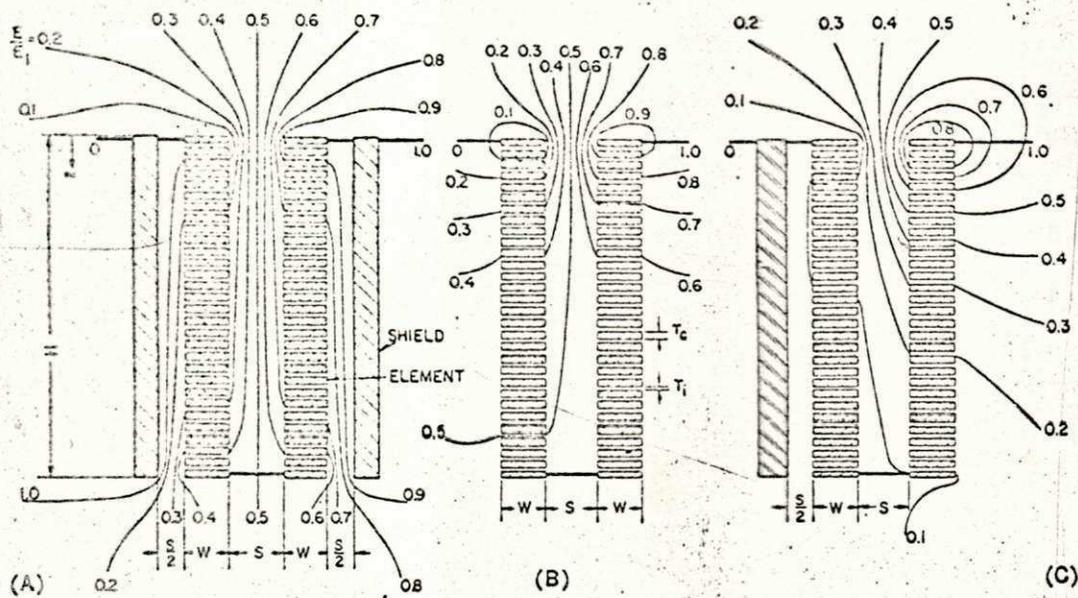


FIG. 5.20

PARA A FIGURA 5-20.A, A DISTRIBUIÇÃO TORNA-SE UNIFORME, O CAMPO DO ENROLAMENTO BLINDADO É QUASE SIMÉTRICO, SALVO NAS EXTREMIDADES PARA $z = 0$ E $z = H$, DEVIDO AO EFEITO DAS PONTAS (FOINGING EFFECT). DÊSTE MODO A LINHA CENTRAL ENTRE ELEMENTOS TORNA-SE UMA LINHA DOS POTENCIAIS $\frac{E}{E_1} = 0.5$.

 E_1

BIBLIOTECA

CENTRO DE CIÊNCIAS E
TECNOLOGIA

NA FIGURA 5-20.B OBSERVA-SE QUE O CAMPO JÁ NÃO É TÃO SIMÉTRICO, A LINHA DE POTENCIAL $\frac{E}{E_1} = 0.5$ COINCIDE EM GRANDE PARTE COM A LINHA CENTRAL ENTRE ELEMENTOS, PORÉM HAVERÁ UMA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO PARA AS ESPIRAS, NOTE-SE QUE NESTE CASO A SUPERFÍCIE DO ELEMENTO É ABERTA, $C_B = 0$, CONFORME NOS REPORTAMOS NA SEÇÃO 5.3.

NAS CONDIÇÕES DA FIGURA 5-20.C, SOMENTE UMA TERMINAL É BLINDADO, VERIFICA-SE QUE A LINHA DE POTENCIAL $\frac{E}{E_1} = 0.5$ É VIOLENTAMENTE DISTORCIDA NA SUA FORMA.

A FIGURA 5-21, SERVE PARA ILUSTRAR E COMPARAR AS TENSÕES MÁXIMAS RELATIVAS ENTRE ESPIRAS EM UM ELEMENTO COM ISOLAMENTO SIMÉTRICO E EM UM ELEMENTO COM UMA SUPERFÍCIE ABERTA ESTAS TENSÕES PODEM SER COMPARADAS PARA ELEMENTOS BLINDADOS E NÃO BLINDADOS. INFORMAÇÕES CONCERNENTES AS COORDENADAS, JÁ FORAM DADAS NA SEÇÃO 5.4.

OS TRANSFORMADORES MUNIDOS COM ESTAS ARMADURAS SÃO CONHECIDO SOB O NOME DE TRANSFORMADORES "NÃO-RESSONANTES".

NEM SEMPRE É NECESSÁRIO SE FAZER UMA DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE TENSÃO IDENTICA À DISTRIBUIÇÃO FINAL E PARA TENSÕES INTERMEDIÁRIAS PODE-SE UTILIZAR BLINDAGENS ESTÁTICAS SIMPLIFICADAS QUE REDUZEM SUFICIENTEMENTE AS SOBRETENSÕES NOS ENROLAMENTOS ATINGIDOS PELAS ONDAS DE IMPULSO.

ESTAS ARMADURAS REDUZIDAS CHAMADAS DE ELEMENTARES SÃO DISPOSTAS DA MESMA FORMA QUE AS ARMADURAS PRECEDENTES, ENTRETANTO SÓ ENGLOBALAM AS BOBINAS NAS PROXIMIDADES DA LINHA.

SE APRESENTAM SOB A FORMA DE CONDUTORES CONVENIENTEMENTE ISOLADOS EM TÔRNO DAS BOBINAS, SÃO REPARTIDAS EM SE -

ÇÕES, AS QUAIS SÃO CONECTADAS A FONTES DETERMINADAS NOS ENROLAMENTOS.

A FIGURA 5.22 MOSTRA UM TRANSFORMADOR TRIFESICO DE 5 MVA - 60 KV, MUNIDO DE ARMADURAS ELEMENTARES, OBSERVA-SE QUE ESTAS ARMADURAS NÃO MODIFICAM A CONSTRUÇÃO DOS ENROLAMENTOS E QUE ELAS NÃO IMPEDEM DE FORMA ALGUMA A CIRCULAÇÃO DE ÓLEO PARA O RESFRIAMENTO DAS BOBINAS.

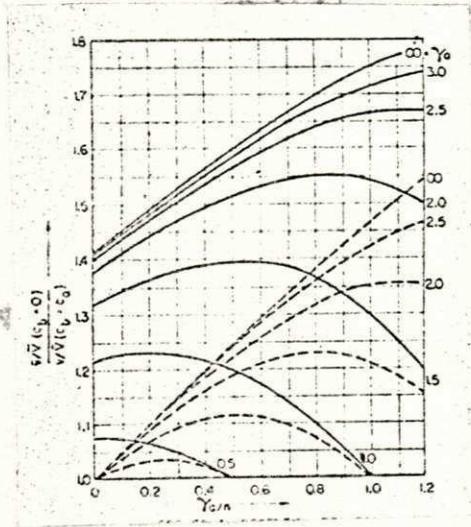


FIG. 5.21

— SEM BLINDAGEM
 - - - COM BLINDAGEM

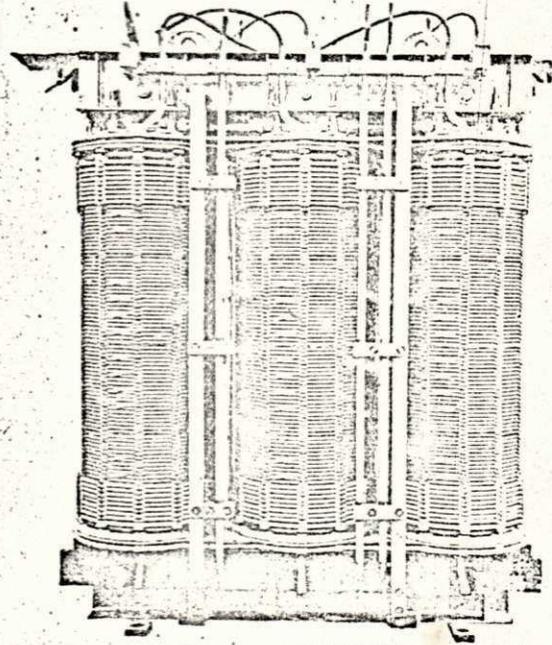
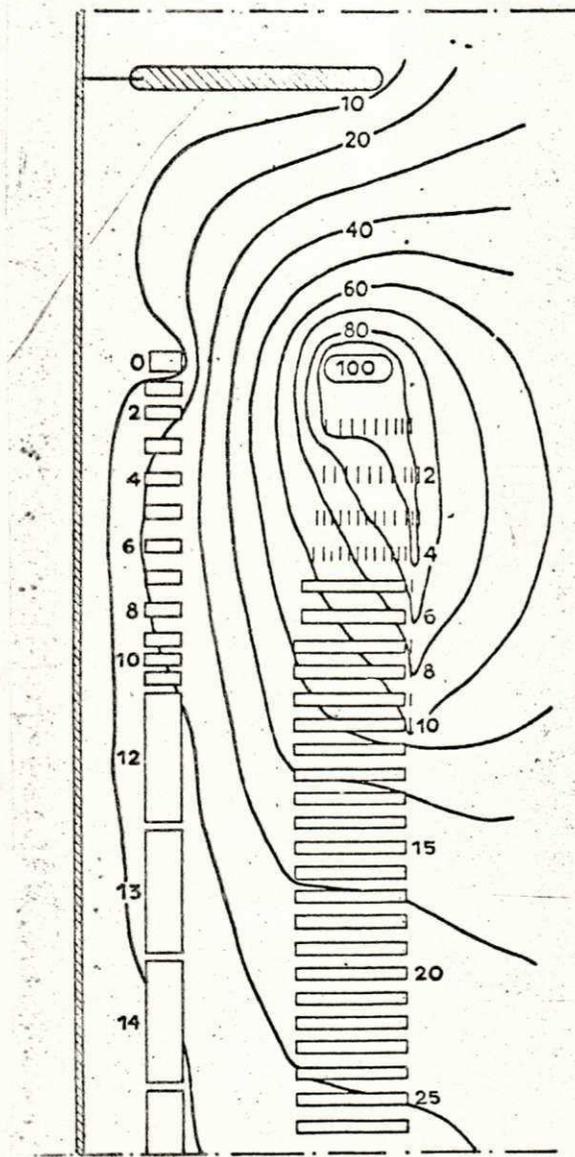


FIG. 5.22

PARTE ATIVA DE TRANSFORMADOR
 MUNIDO DE ARMADURAS ELEMENTA
 RES

NESTE CASO A DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE TENSÃO SE COLOCA ENTRE AQUELAS OBTIDAS PARA O TRANSFORMADOR NÃO RESSONANTE E PARA O TRANSFORMADOR SEM BLINDAGEM. AS SOBRETENSÕES EM RELAÇÃO À MASSA E ENTRE ELEMENTOS SÃO MAIS REDUZIDAS DO QUE AQUELAS CONCERNENTES AO ÚLTIMO CASO. VIDE FIGURA 5.23: NA PÁGINA SEGUINTE.

FIGURA 5. 23.



DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO MEDIDA EM UM ENROLAMENTO
MUNIDO COM ARMADURAS ELEMENTARES.

ESTAS ARMADURAS PODEM SER UTILIZADAS QUER AS LIGAÇÕES DOS ENROLAMENTOS ESTEJAM EM ESTRELA OU TRIÂNGULO.

UMA OUTRA SOLUÇÃO PARA SE OBTER UMA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO MAIS UNIFORME, CONSISTIRIA EM DIMINUIR A ALTURA DOS ENROLAMENTOS E AUMENTAR SUA ESPESSURA. ISTO SERIA UMA SOLUÇÃO SATISFATORIA PARA ENROLAMENTOS ALTERNADOS, ENTRETANTO PARA ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS NÃO É ACEITÁVEL, PELO FATO DE OCASIONAR UM ACRÉSCIMO IMPORTANTE DA REATÂNCIA, CONSEQUENTEMENTE UM DIMENSIONAMENTO ANORMAL DO TRANSFORMADOR.

RESULTADO ANÁLOGO AOS CASOS ANTERIORES PODE SER CONSEGUIDO ATRAVÉS DE ENROLAMENTOS ESPECIAIS, OS QUAIS SÃO CONSTITUÍDOS NÃO POR SUPERPOSIÇÃO DE BOBINAS, MAS POR BOBINA À UMA SÓ CAMADA ENROLADAS SÔBRE UM CILINDRO ISOLANTE E OCUPANDO QUASE TODA A ALTURA DO NÚCLEO. AS BOBINAS SÃO COLOCADAS CONCÊNTRICAMENTE UMAS NO INTERIOR DAS OUTRAS E RECOBERTAS EXTERIORMENTE POR UMA ARMADURA ESTÁTICA CORTADA, CONECTADA À LINHA.

UM ESQUEMA DÊSTE TIPO ESTÁ MOSTRADO NA FIGURA 5.24

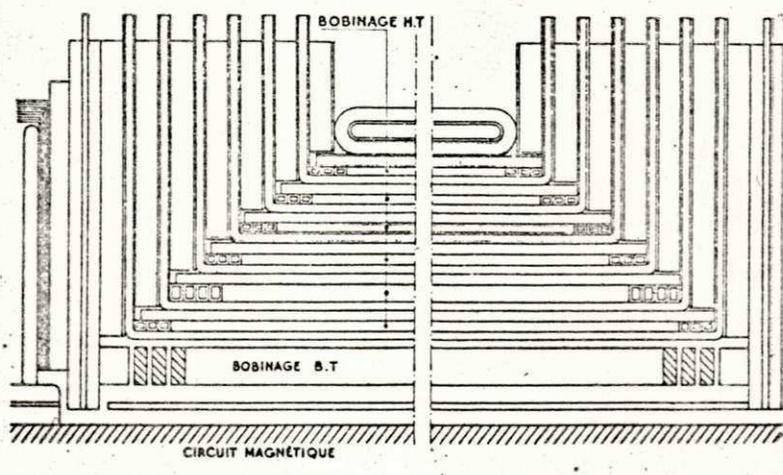


FIG. 5.24

CORTE DE UM ENROLAMENTO COM BOBINAS CONCÊNTRICAS

COM ESTA DISPOSIÇÃO A CAPACIDADE ENTRE CADA BOBINA E A MASSA É MUITO PEQUENA, ENQUANTO QUE A CAPACIDADE DE SÉRIE ENTRE BOBINAS É RELATIVAMENTE GRANDE, DISTO RESULTA UMA REDUÇÃO EM TORNANDO A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO PRATICAMENTE UNIFORME.

AS CURVAS INDICANDO A DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE TENSÃO (VER FIGURA 5.25) E AO FIM DE 5, 10, 30 E 50 MICROSEGUNDOS OBTIDAS QUANDO DA APLICAÇÃO DE UMA ONDA DE IMPULSO DE $1,5 \times 50$ MICROSEGUNDOS NA EXTREMIDADE DA LINHA DE UM ENROLAMENTO DE BOBINAS CONCÊNTRICAS CUJO NEUTRO ESTÁ LIGADO A TERRA, FORAM OBTIDAS POR OSCILOGRAMAS ENTRE AS FUNÇÕES DAS BOBINAS À TERRA EM FUNÇÃO NO TEMPO.

AS CURVAS MOSTRAM QUE AS DISTRIBUIÇÕES TORNAM-SE SENSIVELMENTE UNIFORMESE QUE AS SOBRETENSÕES LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS SÃO BEM REDUZIDAS.

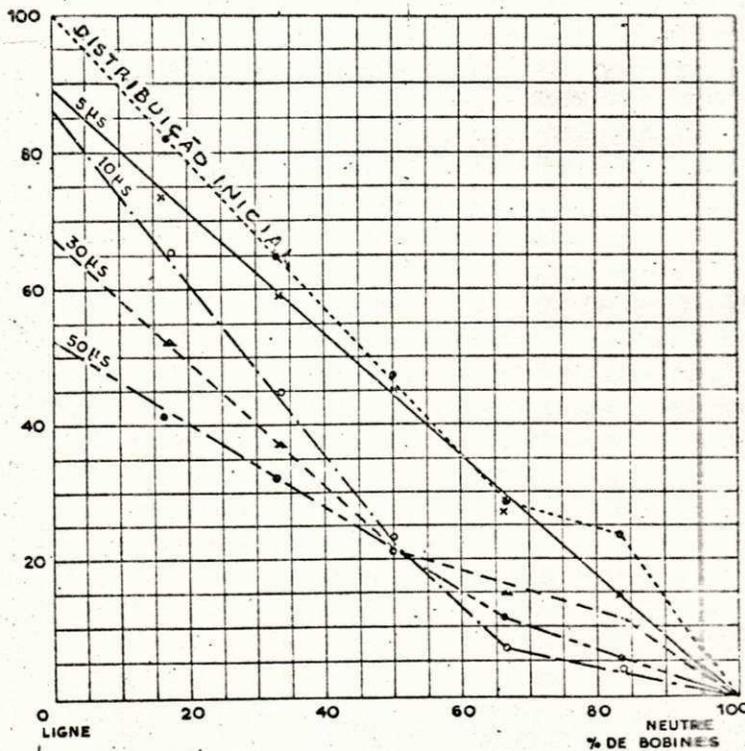


FIG. 5.25

A FIGURA 5.26 ILUSTRA O COMPORTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO INICIAL E CONSEQUENTEMENTE AS SOBRETENSÕES INTERNAS NOS DIFERENTES TIPOS DE ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS APRESENTADOS.

A CLASSIFICAÇÃO NA ORDEM DE MELHORAMENTO CRESCENTE É A SEGUINTE; RELACIONANDO-SE COM A FIGURA ABAIXO:

- 5) ENROLAMENTO NORMAL INTERIOR, ADJACENTE AO CIRCUITO MAGNÉTICO.
 - 4) ENROLAMENTO NORMAL ENTRE DOIS ENROLAMENTOS
 - 3) ENROLAMENTO NORMAL EXTERIOR
 - 2) ENROLAMENTO NORMAL EXTERIOR, LINHA NO MEIO DA BOBINAGEM.
 - 1) ENROLAMENTO COM ARMADURAS ELEMENTARES
- ENROLAMENTOS, NÃO RESSONANTES EM BOBINAS CONCÊNTRICAS.

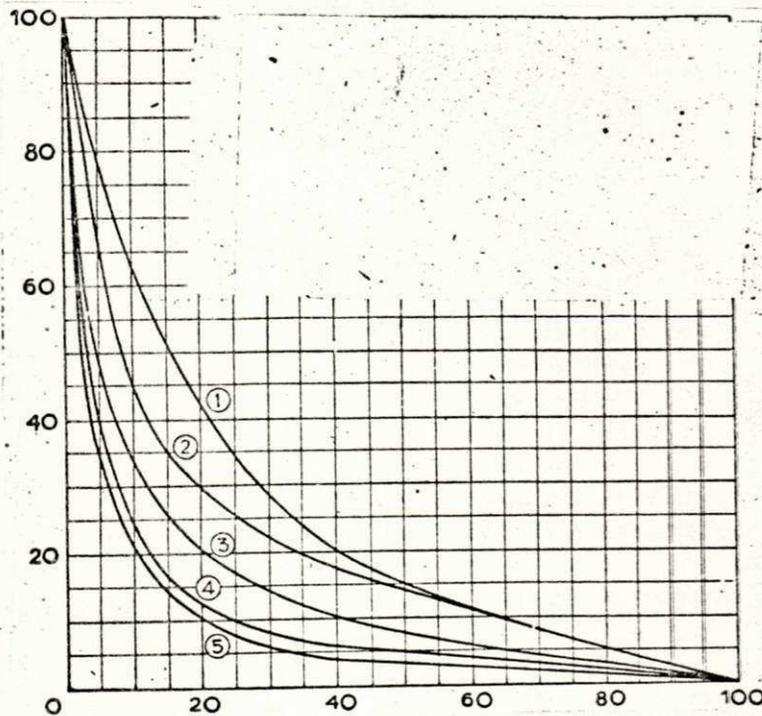


FIG. 5.26.

COMPARAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES INICIAIS
PARA DIFERENTES ARRANJOS DE ENROLA-
MENTOS.

CAPÍTULO VIDISCUSSÃO DE TESTES EM TRANSFORMADORES SOLICITADOS
POR SOBRETENSÕES FERRESONANTES6.1 - GENERALIDADES:

O CÁLCULO DO EFEITO DE OSCILAÇÕES FERRO RESONANTES EM TRANSFORMADORES TEM SIDO CAUSA DE LABORIOSAS PESQUISAS E TRABALHOSOS PROGRAMAS DE TESTES EM LABORATÓRIO.

ATUALMENTE VEM SENDO MOSTRADO QUE POSSÍVEIS SOBRETENSÕES FERRORESONANTES EM BANCOS DE TRANSFORMADORES $Y - \Delta$, DURANTE MANOBRAS MONOFÁSICAS SÃO FUNÇÕES DA CAPACIDADE DO TRANSFORMADOR E DO COMPRIMENTO DO RAMAL DE ALIMENTAÇÃO (CABO BLINDADO OU LINHA AÉREA) ENTRE AS CHAVES FUSÍVEIS MONOFÁSICAS INSTALADAS NO CIRCUITO PRIMÁRIO E O TRANSFORMADOR.

OS CABOS TEM MUITO MAIS CAPACITÂNCIAS PARA TERRA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO DO QUE AS LINHAS AÉREAS, DESSE MODO, O PROBLEMA É MAIS FACILMENTE ENCONTRADO EM SISTEMAS DE CABOS BLINDADOS.

É SABIDO TAMBÉM, QUE PARA MENORES TENSÕES DE DISTRIBUIÇÃO O PROBLEMA É MENOR, A MENOS QUE A ALIMENTAÇÃO DO TRANSFORMADOR SEJA FEITA POR CABOS DE COMPRIMENTO CONSIDERÁVEIS. PARA TENSÕES DE DISTRIBUIÇÃO MAIS ELEVADAS, 14.4/24.9 KV, A CAPACITÂNCIA DA LINHA AÉREA COMEÇA A TORNAR-SE PROBLEMATICA. FINALMENTE, PARA TENSÕES DE 19.9/34.5 KV, MESMO SEM LINHA AÉREA CONECTANDO O TRANSFORMADOR À CHAVE OU INTERRUPTOR MONOFÁSICO, SOBRETENSÕES FERRORESONANTE PODEM OCORRER. NESTE CASO, NÃO É CONSIDERADO A CAPACITÂNCIA DA LINHA, DESTA FORMA, A CAPACITÂNCIA A CONSIDERAR DEVE SER AQUELA DA MALHA DE CAPACITÂNCIA INTERNA DO TRANSFORMADOR E A CAPACITÂNCIA DAS BUCHAS. NO CAPÍTULO ANTERIOR ESTUDAMOS ESTAS MALHAS DE CAPACITÂNCIAS.

RECENTES ESTUDOS APRESENTAM COMO MÉTODO USUAL DE EVITAR SOBRETENSÕES FERRORESSONANTES, COMO NO CIRCUITO DA FIGURA 6.1, A LIMITAÇÃO DO COMPRIMENTO DO CABO.

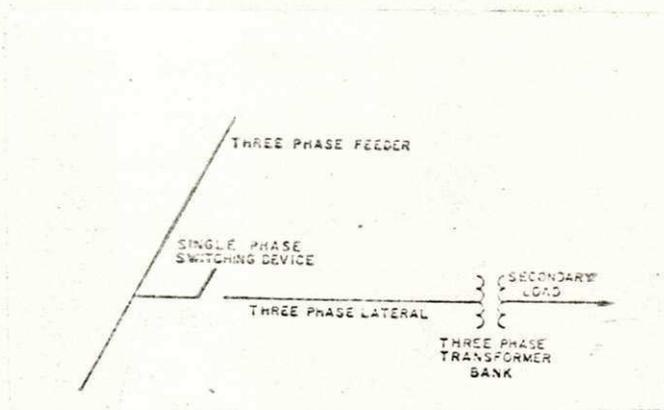


FIG. 6.1

SISTEMA ESTUDADO

O COMPRIMENTO PERMITIDO É INFLUENCIADO PELA POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR, TENSÃO NOMINAL, CONECÇÃO DOS ENROLAMENTOS, BEM COMO DO TIPO DO RAMAL (CABO, BLINDADO OU LINHA AÉREA).

PARA PEQUENOS BANCOS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES MAIS ELEVADAS, A EXTENSÃO PERMITIDA DO RAMAL TORNA-SE PEQUENA MESMO PARA LINHA AÉREA. ATRAVÉS DE TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO, PODEMOS APRESENTAR COMO EXEMPLO, O CASO DO BANCO FORMADO POR TRÊS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE 15 KVA, TENSÃO 19.9 KV, CONECTADO EM $Y - \Delta$ COM NEUTRO NÃO ATERRADO; SEM RAMAL ENTRE O BANCO E AS CHAVES, FORAM REGISTRADOS SOBRETENSÕES DA ORDEM DE 4 VEZES A TENSÃO NORMAL PARA TERRA SOBRE UMA FASE ABERTA.

AS SOBRETENSÕES FORAM CAUSADAS PELA REAÇÃO DE CARACTERÍSTICA MAGNETIZANTE DO TRANSFORMADOR E AS CAPACITÂNCIAS INTERNAS DOS ENROLAMENTOS.

PARA TENSÕES MENORES E GRANDES BANCOS DE TRANS

FORMADORES, APRECIÁVEIS COMPRIMENTOS DE CABO SERÃO PERMITIDOS. A TABELA 6.1 INDICA APROXIMADAMENTE 500 PÉS PARA 13.8 KV COM BANCO DE 10.000 KVA.

TABELA 6.1

KV	TRANSFORMADOR KVA	I EXC. %	COMPRIMENTO DO RAMAL (FT)	
			CABO BLINDADO	LINHA AÉREA
13.8	750	1.5	55.5	2750
	1000	1.3	64.2	3200
	1500	1.2	88.5	4430
	2000	1.2	118.0	5940
	5000	1.0	259.0	12280
	10000	1.0	492.0	29700
	15000	1.0	738.0	37000
24.9	750	1.5	17.0	845
	1000	1.3	19.7	980
	1500	1.2	27.1	1370
	2000	1.2	36.4	1810
	5000	1.0	75.5	3770
	10000	1.0	151.0	7530
	15000	1.0	227.0	11300
34.5	750	1.5	8.9	440
	1000	1.3	10.2	513
	1500	1.2	14.4	710
	2000	1.2	18.9	947
	5000	1.0	39.4	1960
	10000	1.0	78.7	3940
	15000	1.0	118.0	5900

ENTRETANTO, SERÁ VISTO QUE UM BANCO $\gamma - \Delta$, 5000 KVA PARA 19.9/34.5 KV ALIMENTADO POR UMA MILHA DE CABO BLINDADO FICARÁ SUBMETIDO A SEVERAS SOBRETENSÕES FERRORES

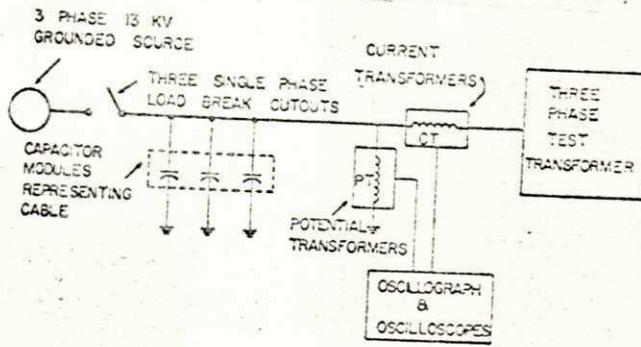


FIGURA 6.2

DÊSTE MODO FORAM REALIZADOS TESTES EM TRANSFORMADORES CONECTADOS EM Δ , Y (ATERRADO E NÃO ATERRADO) E T. UMA SÉRIE DE ENERGIZAÇÕES E DEZENERGIZAÇÕES FORAM FEITAS PARA SIMULAR CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO REAL QUE PODE SURTIR NA PRÁTICA.

PARA CABOS DE COMPRIMENTOS COMPREENDIDOS ENTRE 100 A 5000 PÉS (0.007 A 0.35 μF) FORAM REALIZADAS SÉRIES DE 25 A 50 OPERAÇÕES. INCLUÍDO AO CIRCUITO, MAS QUE NÃO APRESENTA A FIGURA 6.2, ESTÁ UMA CARGA RESISTIVA NO SECUNDÁRIO DA ORDEM DE 4% DA POTÊNCIA NOMINAL DO TRANSFORMADOR A PLENA CARGA. TAMBÉM É CONECTADO UM RESISTOR ENTRE O NEUTRO PRIMÁRIO E A TERRA. A FIGURA 6.3 MOSTRA UM BANCO $Y-\Delta$ ILUSTRANDO ÊSTES DETALHES.

VIDE FIGURA 6.3 NA PÁGINA SEGUINTE.

SONANTES.

ESTUDO NO ANALIZADOR DE TRANSITÓRIO DE MALHA, (TNA) FORAM FEITOS PARA DETERMINAR A NATUREZA DO FENÔMENO ENVOLVIDO E VERIFICAR AS POSSIBILIDADES DE MINIMIZAR OS E FEITOS.

6.2 - CIRCUITO PARA TESTE :

COM A FINALIDADE DE SIMULAR AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES TÃO PRÓXIMO QUANTO POSSÍVEL DA REALIDADE, FOI ENVOLVIDO EM LABORATÓRIO, MODÉLOS PARA REPRESENTAR AS CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA.

A FIGURA 6.2 MOSTRA TRÊS CHAVES DE INTERRUÇÃO DE CARGA DE 15 KV - 100 AMPÉRES USADAS PARA ENERGIZAR O TRANSFORMADOR SOB TESTE ATRAVÉS DE CABOS DE VÁRIOS COMPRIMENTOS ALIMENTADOS POR UMA FONTE ATERRADA. OS CAPACITORES CONECTADOS DA LINHA PARA TERRA REPRESENTAM O CABO. CAPACITORES ELETRÔNICOS SOB ÓLEO SIMULAM COMPRIMENTOS DE CABOS DE 100 A 1000 PÉS (0.007 - 0.07 μF) EM ESCALAS DE 100 PÉS. OS MÓDULOS QUE REPRESENTAM 0.007 μF FORAM CONSTRUÍDOS USANDO CAPACITORES DE 5 KV - 2000 μF . MÓDULOS ADICIONAIS PODEM SER CONECTADOS COM FACILIDADE PARA PROVER UM ADICIONAL 0.007 μF PARA ACRESCER O COMPRIMENTO DO CABO.

CABOS ACIMA DE 5000 PÉS EXIGEM O USO DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE CAPACITORES DE 13 KV - 50 KVAR. TENSÕES E CORRENTES FORAM MEDIDAS NO LADO DE ALTA TENSÃO UTILIZANDO-SE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL DE 47 KV E TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE 69 KV, ESTAS CORRENTES E TENSÕES FORAM REGISTRADAS POR OSCILÓGRAFOS MAGNÉTICOS E OSCILÓGRAFOS ELETRÔNICOS.

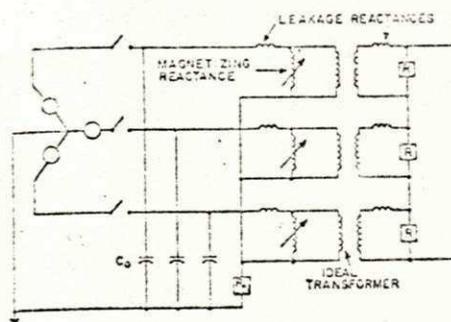


FIGURA 6.3
SISTEMA TRIFASICO EQUIVALENTE

6.3 - ANÁLISE DOS TESTES PARA VÁRIAS CONEXÕES

ANALIZAREMOS OS TESTES PARA TIPOS DE CONEXÕES PRIMÁRIAS SIMÉTRICAS TAIS COMO, Y (ATERRADO E NÃO ATERRADO) E CONEXÃO NÃO SIMÉTRICA T.

INICIALMENTE ESTUDAREMOS AS SOBRETENSÕES QUE SURGEM NO TERMINAL PRIMÁRIO DE UM TRANSFORMADOR DE 150 KVA , DELTA - Y ATERRADO, PARA OS CASOS DE UMA E DUAS FASES ENERGI ZADAS.

OS OSCILOGRAMAS DA FIGURA 6.4 , MOSTRAM AS SOBRETENSÕES A QUE FICAM SUBMETIDAS AS FASES H_2 E H_3 QUANDO A FASE H_1 É ENERGI ZADA, ESTAS SOBRETENSÕES DE FORMA DE ONDA QUÁDRADA SÃO DA ORDEM DE 2 P.U.

VIDE FIGURA 6.4 , NA PÁGINA SEGUINTE.

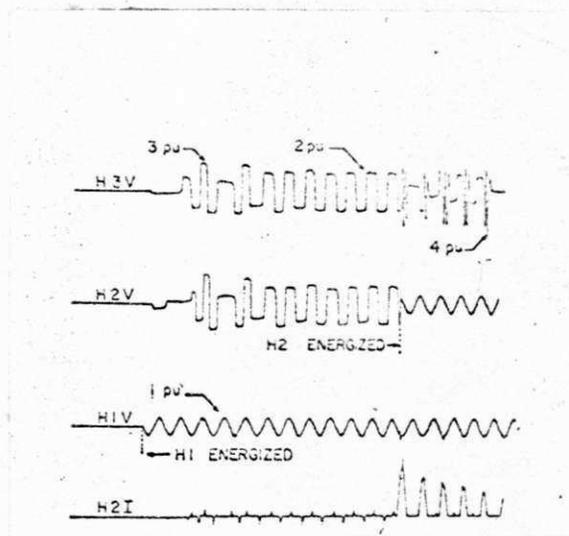


FIGURA 6.4
OSCILOGRAMAS

QUANDO A SEGUNDA FASE (H₂) É FECHADA, A TENSÃO NA FASE (H₃) QUE PERMANECE ABERTA VARIA ATINGINDO UM VALOR DE 4 P.U., ESTAS TENSÕES FICAM FORMADAS POR ONDAS DE FORMA QUADRADA E POR COMPONENTES TRANSITÓRIAS DE ALTA FREQUÊNCIA (VER FIGURA 6.4).

ESTE ACRÉSCIMO NO VALOR DAS SOBRETENSÕES É DEVIDO AO FATO DE HAVER SOBRETENSÕES NA FASE H₃, QUANDO A SEGUNDA FASE É FECHADA, NESTE INSTANTE, A CORRENTE MOSTRADA NA FIGURA 6.4 FLUIRÁ, A QUAL É ESSENCIALMENTE DE FREQUÊNCIA NATURAL DETERMINADA POR $f = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$, SOLICITADA DAS DUAS FASES JÁ ENERGIZADAS, CONSEQUENTEMENTE A TENSÃO NO TERMINAL ABERTO OSCILA LIVREMENTE PARA A FREQUÊNCIA NATURAL DO CIRCUITO SATURADO L-C.

OBSERVE-SE DA FIGURA 6.4 QUE NO TEMPO DE FLUXO DESTA CORRENTE A TENSÃO NO TERMINAL ABERTO OSCILA RAPIDAMENTE, QUANDO A OSCILAÇÃO CESSA A TENSÃO NO CAPACITOR VOLTA À SUA FORMA DE ONDA QUADRADA, ASSIM A TENSÃO NA FASE ABERTA

APARECE COMO UMA MISTURA DE ONDAS QUADRADA DE FORMAS DIFERENTES DURANTE 10 A 15 SEGUNDOS APÓS A ENERGIZAÇÃO DA SEGUNDA FASE.

QUANDO A TERCEIRA FASE É FECHADA, NÃO HAVERÁ SOBRETENSÕES, NO SISTEMA EXISTIRÁ TENSÕES BALANCEADAS E NESTAS CONDIÇÕES NÃO TERÁ LUGAR A FENOMENOS FERRORESONANTES.

AGORA SE CONSIDERARMOS AS TRÊS FASES ENERGIZADAS E FORMOS PROCEDER A ABERTURA DE UMA DELAS, NO CASO A FASE H_3 OBTEREMOS OS OSCILOGRAMAS INDICADOS NA FIGURA 6.5.

OBSERVA-SE UMA MISTURA DE ONDAS QUADRADAS DE DIFERENTES FORMAS COMO NO CASO ANTERIOR, NESTA SITUAÇÃO NÃO HAVERÁ OSCILAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA, POIS NÃO HAVERÁ FLUXO DE CORRENTE A FREQUÊNCIA NATURAL. SOBRETENSÕES DE 4 P.U. FORAM REGISTRADAS QUANDO DESTE TESTE.

QUANDO DA ABERTURA DA FASE H_1 , UM BREVE PERÍODO TRANSITÓRIO OCORRE (VER FIGURA 6.5), DEVIDO A DIFERENTES CONDIÇÕES INICIAIS NOS TERMINAIS ABERTOS. O ENROLAMENTO CONECTADO ENTRE AS DUAS FASES H_1 E H_3 SATURA EM POUCO TEMPO, CAUSANDO UMA ITERAÇÃO ENTRE OS DOIS CIRCUITOS. GERALMENTE ESTA REAÇÃO PRODUZ TENSÕES DE MAGNITUDES ELEVADAS DURANTE ESTE PERÍODO TRANSITÓRIO, DA ORDEM DE 4 P.U., NOTA-SE QUE ESTAS SOBRETENSÕES SÃO MAIS ELEVADAS DO QUE AQUELAS CONCERNENTES COM A ENERGIZAÇÃO DA PRIMEIRA FASE (VER FIGURA 6.4) A QUAL REGISTROU SOBRETENSÕES DE 3 P.U.

(VIDE FIGURA EM OUTRA FOLHA)

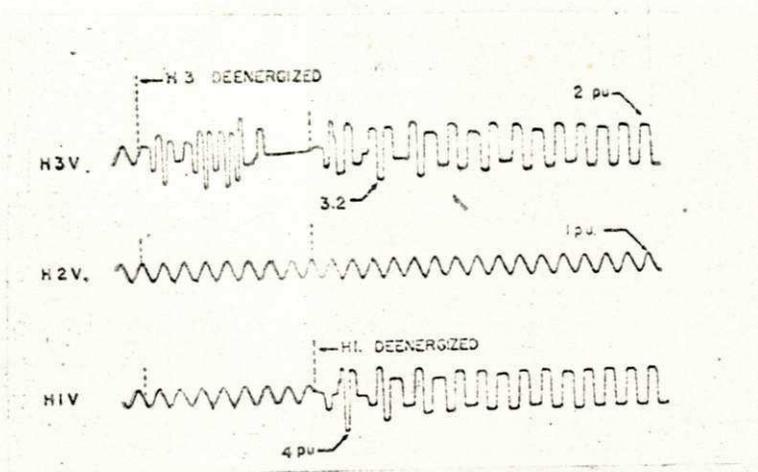


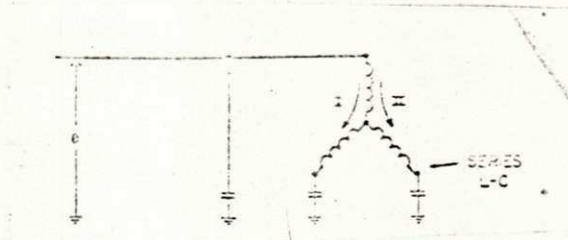
FIG. 6.5 -
OSCILOGRAMAS OBTIDOS QUANDO DA ABERTURA
DAS FASES.

UM OUTRO CASO SERIA PARA O TRANSFORMADOR COM
O ENROLAMENTO PRIMÁRIO CONECTADO EM Υ NÃO ATERRADO.

PARA O FECHAMENTO DA PRIMEIRA FASE FOI OBTI-
DO OSCILOGRAMAS SEMELHANTE AO DA FIGURA 6.4, CONTUDO O VALOR
DA TENSÃO MANTIDA DE FORMA DE ONDA QUADRADA SERIA NO PRESENTE
CASO DE 3 A 4 P.U.,

ESTE ACRÉSCIMO É DEVIDO AO FATO DE QUE A CO-
NEXÃO Υ TEM AS INDUTÂNCIAS DOS DOIS NÚCLEOS DE FERRO EM
SÉRIE EM CADA CIRCUITO L-C (VER FIGURA 6.6).

Fig. 6.6



CIRCUITO SIMPLIFICADO PARA UM TRANSFORMADOR
COM O PRIMÁRIO CONECTADO EM Y SEM CARGA.

PARA O FECHAMENTO DA SEGUNDA FASE, A TENSÃO NO TERMINAL PERMANECENDO ABERTO, APRESENTA OSCILOGRAMAS IDÊNTICOS ÀQUELE OBTIDO QUANDO DA DESENERGIZAÇÃO DA PRIMEIRA FASE DA CONEXÃO DELTA (VER FIGURA 6.5), TANTO EM FORMA DE ONDA QUANTO EM MAGNITUDE.

PARA ABERTURA DA PRIMEIRA FASE NESTE TIPO DE CONEXÃO AS TENSÕES NO TERMINAL ABERTO APRESENTAM OSCILOGRAMAS SEMELHANTES (EM FORMA E MAGNITUDE) ÀQUELES OBTIDOS QUANDO DA ENERGIIZAÇÃO DA SEGUNDA FASE DESTA TIPO DE CONEXÃO.

AS TENSÕES CAUSADAS PELA ABERTURA DA SEGUNDA, APRESENTAM MAGNITUDES E FORMA DE ONDA IDÊNTICAS QUANDO DO FECHAMENTO DA PRIMEIRA FASE DESTA CONEXÃO.

QUANDO O TRANSFORMADOR TEM O ENROLAMENTO PRIMÁRIO CONECTADO EM Y COM O NEUTRO PRIMÁRIO ATERRADO, NÃO HÁ POSSIBILIDADE DE OCORRER SOBRETENSÕES FERRORESONANTES MANTIDAS, NÃO HÁ FONTE EXTERNA CAPAZ PARA MANTER QUAISQUER OSCILAÇÕES NO CIRCUITO L-C M E II MOSTRADO NA FIGURA 6.7.

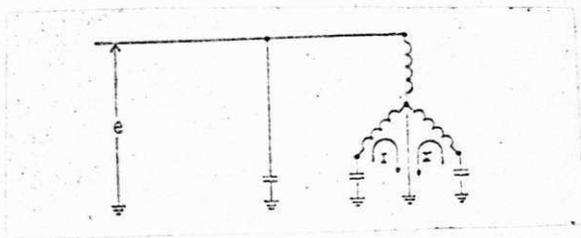


FIGURA 6.7

CIRCUITO SIMPLIFICADO PARA UM CABO CONECTADO AO ENROLAMENTO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR COM UMA FASE ENERGIZADA.

DISCUTIREMOS AGORA O COMPORTAMENTO DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR CONECTADO EM T.

VEJAMOS INICIALMENTE O CIRCUITO SIMPLIFICADO, ONDE UM CABO ALIMENTA O TRANSFORMADOR COM ESTE TIPO DE LIGAÇÃO (VER FIGURA 6.8).

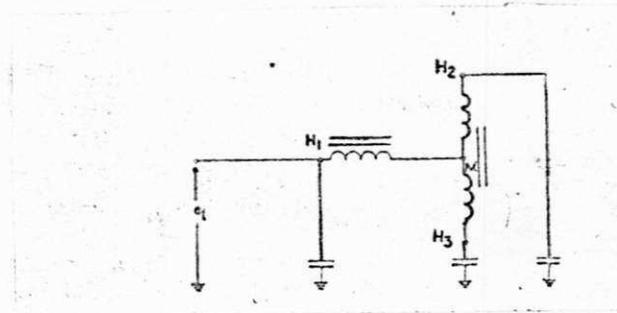


FIG. 6.8 - CIRCUITO SIMPLIFICADO

OS ENROLAMENTOS H_2 E H_3 SÃO CHAMADOS DE ENROLAMENTOS PRINCIPAIS, ENQUANTO H_1 É DENOMINADO ENROLAMENTO DE EQUILÍBRIO OU EQUILIBRADOR.

A PRINCIPAL BASE PARA A DISCUSSÃO DOS EFEITOS FERRORESONANTES NO TRANSFORMADOR DESTES TIPO, É A SEQUÊNCIA DE FECHAMENTO, E TAMBÉM, DE ABERTURA DAS FASES, POIS EM CONSEQUÊNCIA DA DISSEMETRIA DO ENROLAMENTO T, DIFERENTES MAGNITUDES DE SOBRETENSÕES, DEPENDEM DE QUAL DAS FASES É ENERGIZADA EM PRIMEIRO LUGAR.

RESULTADOS OBTIDOS, ATRAVÉS DE TESTES EM LABORATÓRIO, REVELARAM QUE, QUANDO O ENROLAMENTO DE EQUILÍBRIO (H_1) É ENERGIZADO PRIMEIRO, O EFEITO FERRORESONANTE É MAIOR DO QUE SE QUALQUER DAS OUTRAS FASES, FOSSE ENERGIZADA. COMO O ENROLAMENTO T É SIMÉTRICO QUANDO VISTO, PARA O EQUILIBRADOR, AS TENSÕES NOS DOIS TERMINAIS ABERTOS SÃO IGUAIS.

QUANDO UM DOS ENROLAMENTOS PRINCIPAIS FOR ENERGIZADO ANTES DO ENROLAMENTO DE EQUILÍBRIO, AS TENSÕES NOS TERMINAIS ABERTOS NÃO SÃO IGUAIS DEVIDO A DISSIMETRIA DO ENROLAMENTO. A FIGURA 6.9, MOSTRA OS OSCILOGRAMAS DA TENSÃO NOS TERMINAIS ABERTOS, NESTE CASO H_3 FOI O PRIMEIRO A SER FECHADO, VERIFICA-SE TENSÕES DE MAGNITUDES DE 3,3 P.U. E 2,6 P.U.

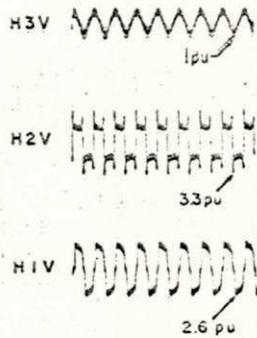


FIGURA 6.9

OSCILOGRAMAS OBTIDOS COM UMA FASE ENERGIZADA

O FECHAMENTO DA SEGUNDA FASE, PODE SER TANTO O ENROLAMENTO DE EQUILÍBRIO, COMO UM DOS ENROLAMENTOS PRINCIPAIS, SE O EQUILIBRADOR FOR ENERGIZADO JUNTAMENTE COM UM DOS PRINCIPAIS, RESULTAM TENSÕES MUITO ALTAS NA FASE ABERTA, ALCANÇANDO A ORDEM DE 9 P.U. SE OS DOIS PRIMEIROS ENROLAMENTOS ENERGIZADOS FOREM OS PRINCIPAIS, A TENSÃO NO TERMINAL ABERTO É DA ORDEM DE 2 P.U. (VER FIGURA 6.10) .

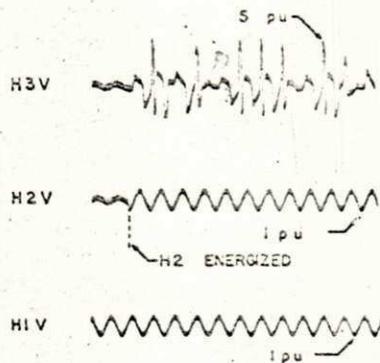


FIGURA 6.10

OSCILOGRAMAS OBTIDOS COM DUAS FASES ENERGIZADAS

DO EXPOSTO SE CONCLUI QUE, NA SEQUÊNCIA DE ENERGI-
ZAÇÃO O ÚLTIMO ENROLAMENTO A SER ALIMENTADO DEVE SER O DE
EQUILÍBRIO, A FIM DE EVITAR ELEVADAS SOBRETENSÕES NA FASE A
BERTA.

COMENTEMOS AGORA A DESENERGIZAÇÃO DAS FASES, DA
MESMA MANEIRA DEVE SE OBEDECER UMA ORDEM NA SEQUÊNCIA DAS
OPERAÇÕES.

QUANDO A PRIMEIRA FASE ABERTA FOR A QUE CORRESPON-
DE AO ENROLAMENTO DE EQUILÍBRIO (H_1), A TENSÃO NO TERMINAL
ABERTO É UMA ONDA QUADRADA COM 2 P.U. SEMELHANTE ÀQUELA DA
FIGURA 6.4.

SE A PRIMEIRA FASE ABERTA FOR A DE UM DOS ENROLA-
MENTOS PRINCIPAIS, AS TENSÕES SERÃO MUITO ELEVADAS, ANÁLO-
GAS ÀS INDICADAS NA FIGURA 6.10.

A ABERTURA DA SEGUNDA FASE CORRESPONDE AO CASO DO
FECHAMENTO DA PRIMEIRA FASE.

ASSIM SE CONCLUI, QUE NA SEQUÊNCIA DESTAS MANO-
BRAS A PRIMEIRA FASE A SER ABERTA, DEVE SER A DO ENROLAMEN-
TO DE EQUILÍBRIO, PELOS MOTIVOS ACIMA APRESENTADOS.

6.4 - PROCEDIMENTOS PARA REDUZIR OS EFEITOS DA FERRORESSONÂNCIA

UMA MANEIRA DE EVITAR SOBRETENSÕES FERRORESSONANTES
SERIA ATRAVÉS DE MANOBRA TRIFÁSICA, QUANDO TODAS AS FASES SE

127

RIAM FECHADAS OU ABERTAS AO MESMO TEMPO. CONTUDO, POR RAZÕES DE ORDEM ECONÔMICA ESTE PROCEDIMENTO É EVITADO E OUTROS MÉTODOS SÃO SUGERIDOS.

CARGA SECUNDÁRIA PARA EVITAR AS SOBRETENSÕES FERRO-RESSONANTES, PODE SER EMPREGADA QUANDO O COMPRIMENTO DO CABO É INSUFICIENTE, ESTUDOS REALIZADOS NO T.N.A. TÊM DETERMINADO O VALOR DA CARGA RESISTIVA A SER USADA.

O EFEITO DA CARGA SECUNDÁRIA PARA CONTROLAR AS SOBRETENSÕES FERRORESONANTES, TEM SIDO ESTUDADO EM LABORATÓRIO E OS RESULTADOS OBSERVADOS COM UMA CARGA PURAMENTE RESISTIVA CONECTADA ÀS TRÊS FASES DOS TERMINAIS SECUNDÁRIOS DO TRANSFORMADOR.

OBSERVOU-SE, QUE O EFEITO DE 1% DO VALOR DA CARGA NOMINAL DE PLACA DO TRANSFORMADOR, DE CONEXÃO PRIMÁRIA EM , QUANDO UMA FASE FOI FECHADA, RESULTOU EM UMA CRISTA PLANA DA TENSÃO CORRESPONDENTE AO CAPACITOR, SE COMPARADA COM OS OSCILOGRAMAS INDICADOS NA FIGURA 6.4. ESTE EFEITO É JUSTIFICADO PELO FATO DE QUE A DESCARGA, QUE SE VERIFICA ATRAVÉS DA REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO TRANSFORMADOR SE PROCESSA AGORA NA CARGA SECUNDÁRIA. OBSERVAMOS NO ENTANTO, QUE O VALOR DA CRISTA CONTINUA O MESMO DE QUANDO NÃO HÁ CARGA, ENTRETANTO AS TENSÕES TRANSITÓRIAS SÃO REDUZIDAS.

A FIGURA 6.11 MOSTRA O EFEITO DA CARGA SECUNDÁRIA SOBRE AS TENSÕES TRANSITÓRIAS, OS TESTES CONDUZIDOS EM LABORATÓRIO, INFORMAM QUE AS TENSÕES TRANSITÓRIAS MÁXIMAS OCORRERAM QUANDO FORAM UTILIZADAS EXTENSÕES EQUIVALENTES DE CABOS MAIS LONGOS.

VIDE FIGURA 6.11 NA PÁGINA SEGUINTE.

128

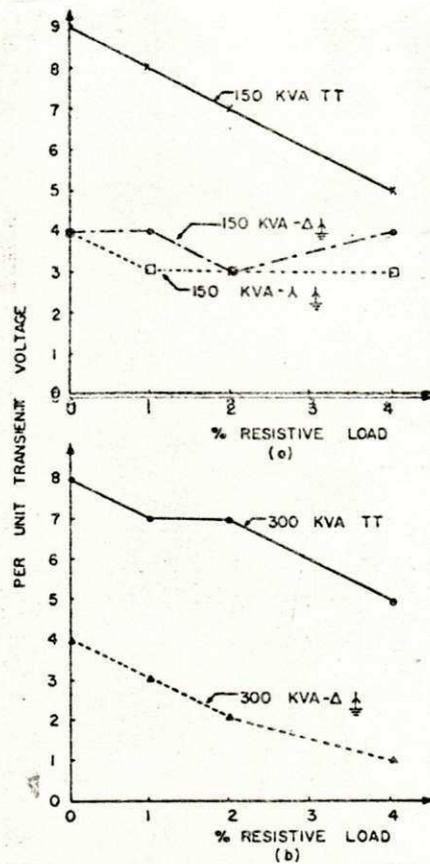


FIGURA 6.11

PODEMOS VER TAMBÉM, PELA FIGURA 6.12, O EFEITO DA CARGA SOBRE AS TENSÕES MANTIDAS, ESTA FIGURA MOSTRA A CAPACIDADE MÍNIMA EQUIVALENTE DO CABO (FASE-TERRA), REQUERIDA PARA PRODUIR SOBRETENSÕES MANTIDAS COMO FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DA CARGA RESISTIVA SECUNDÁRIA. ESTES EFEITOS FORAM OBSERVADOS NOS TESTES COM 4% DA CARGA NOMINAL DE PLACA DO TRANSFORMADOR.

VIDE FIGURA 6.12 NA PÁGINA SEGUINTE.

129

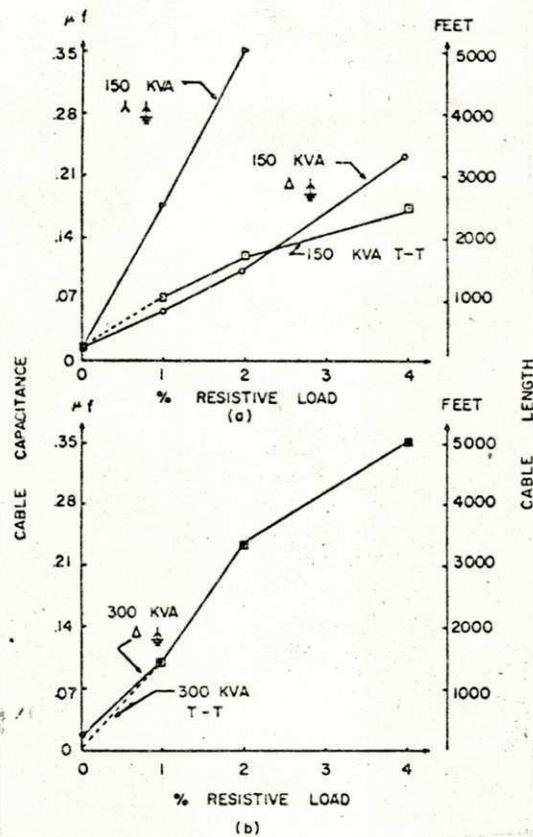


FIGURA 6.12

USO DE RESISTOR NO NEUTRO : É UM OUTRO MÉTODO UTILIZADO, OS RESULTADOS DE PESQUISAS ELABORADAS REVELAM QUE O VALOR DO RESISTOR NEUTRO NÃO DEVE EXCEDER $0.05 X_M$.

EM TERMOS DA CAPACIDADE DO TRANSFORMADOR E DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO, PODE SER DETERMINADO POR :

$$R_N = \frac{5.000}{I \text{ EXC. } \%} \cdot \frac{K V^2}{K V A}$$

ONDE R_N É DADO EM OHMS.

FOI VERIFICADO QUE 2,88 MEGOHMS EM UM SISTEMA BASE FOI CONECTADO DO NEUTRO A TERRA E FORAM OBTIDAS TENSÕES ELEVADAS DA ORDEM DE 3,75 VEZES A NORMAL COM DUAS FASES ENERGIZADAS

DAS. COM 1,44 MEGOHMS, FORAM MEDIDAS TENSÕES DE VALOR IGUAL A 2,25 VEZES A TENSÃO NORMAL COM DUAS FASES ENERGIZADAS. AINDA COM 0,288 MEGOHMS NO SISTEMA BASE, FOI OBSERVADO QUE AS TENSÕES PERMANECERAM COMPLETAMENTE NORMAIS.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES:

DO QUE FOI EXPOSTO NOS CAPÍTULOS III E IV , REFERENTES A ENSAIO DE TRANSFORMADORES A IMPULSO ATMOSFÉRICO E A SURTOS DE MANOBRA, RESPECTIVAMENTE, PODEMOS CONCLUIR QUE:

A) É RELATIVAMENTE FÁCIL SUBMETER OS TRANSFORMADORES A ESTES ENSAIOS COM O AUXÍLIO DE UM GERADOR DE IMPULSO, DESCARREGANDO-O EM UM DOS ENROLAMENTOS, NO CASO DE ENSAIO A SURTOS DE MANOBRA PELAS VANTAGENS DE ORDEM PRÁTICA QUE DECORREM, DE PREFERÊNCIA NO ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO.

B) A SENSIBILIDADE PARA DETECTAR OS DEFEITOS É MAIS ACURADA NOS ENSAIOS DE SURTOS DE MANOBRA QUE NOS ENSAIOS A IMPULSO, QUALQUER FALHA NO ISOLAMENTO, MESMO NOS ENROLAMENTOS NÃO TESTADOS PODEM SER DETECTADOS PELOS OSCILÓGRAFOS DE CORRENTE E TENSÃO.

C) OS TESTES INDUZIDOS A BAIXA FREQUÊNCIA DEVERIAM SER REEXAMINADOS, A SUA MAGNITUDE SERIA REDUZIDA ENQUANTO A DURAÇÃO SERIA MAIS LONGA, TORNANDO-O MAIS REALISTA PARA AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.

D) OS TESTES INDUZIDOS A BAIXA FREQUÊNCIA DEVERIAM SER ASSOCIADOS COM A TENSÃO DE OPERAÇÃO, EM VEZ DE SER COM O TESTE DE IMPULSO, COMO ATUALMENTE É PRATICADO.

E) O TESTE DEVE SER REALIZADO NO SENTIDO DE SOLICITAR TODO O ISOLAMENTO DA ESTRUTURA.

F) O TESTE PARA 150% DA TENSÃO DE OPERAÇÃO, PARA APLICAÇÃO DA TENSÃO DURANTE UMA HORA, COM A ISENÇÃO DE CORONA DURANTE TODO O PERÍODO DO ENSAIO, OFERECE MAIOR SUBSIDIO PARA O PROJETISTA TORNAR A FABRICAÇÃO MAIS CUIDADOSA, DO QUE AQUELE TESTE PARA DUAS VÊZES A TENSÃO DE OPERAÇÃO DURANTE UM MINUTO.

g) O COEFICIENTE 0,83, QUE REPRESENTA A RELAÇÃO ENTRE O VALOR MÁXIMO DA TENSÃO DE MANOBRA E O VALOR DEVIDO A IMPULSO ATMOSFÉRICO, NÃO É UMA MANEIRA ADEQUADA PARA DEFINIR OS VALORES DE TENSÃO DE AMBOS OS ENSAIOS.

NO QUE DIZ RESPEITO ÀS SOBRETENSÕES CAUSADAS POR FERRORESSONÂNCIA CONCLUÍMOS:

A) A POSSIBILIDADE DA PRODUÇÃO DE SOBRETENSÕES COMO RESULTADO DE FERRORESSONÂNCIA É FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DO CASO CONECTADO ENTRE A FONTE E OS TERMINAIS PRIMÁRIOS DO TRANSFORMADOR.

B) HÁ MAIOR POSSIBILIDADE DE OBTER-SE SOBRETENSÕES DURANTE MANOBRAS DE DEENERGIZAÇÃO DO QUE QUANDO O TRANSFORMADOR É ENERGIZADO.

C) SEQUÊNCIA NAS OPERAÇÕES DE ABERTURA E FECHAMENTO DE FASES DEVEM SER RIGOROSAMENTE OBEDECIDAS QUANDO O TRANSFORMADOR EM QUESTÃO FOR CONECTADO EM T.

D) NÃO HÁ PRODUÇÃO DE SOBRETENSÕES PARA CHAVEAMENTO MONOFÁSICO DE UM TRANSFORMADOR COM O ENROLAMENTO PRIMÁRIO CONECTADO EM \sphericalangle ATERRADO.

E) CARGA SECUNDÁRIA ACIMA DE 4% SERIA EFETIVO EM REDUZIR A MAGNITUDE DE TENSÕES TRANSITÓRIAS.

F) OPERAÇÃO DE CHAVEAMENTO TRIFÁSICO ELIMINA A FERRORESSONÂNCIA.

B I B L I O G R A F I A

- ALBRANT, A., BRIERLEY, A.E. ; - SWITCHING SURGE TESTING OF
HYLTÉN - CAVALLIUS, N. E TRANSFORMERS
RYDER D.H. IEEE TRANSACTIONS ON POWER
APPARATUS AND SYSTEMS
VOL. PAS. -87, NO 1-
JANUARY 1968.
- BEWLEY, L.V. - TRAVELING WAVES ON
TRANSMISSION SYSTEMS
DOWER PUBLICATIONS, INC. ,
NEW YORK - 1963
- CHRISTOFFEL, M. - ESSAI DE TENUE DES
TRANSFORMATEURS ET BOBINES
D'INDUCTANCE AUX SURTENSIONS
DE MANŒUVRE.
REVUE BROWN BOVERI
C.I.G.R.E. -1966-PARIS
- CINIERO, A. - ISOLAMENTO DE TRANSFORMADO -
RES: PARA OPERAÇÃO OU EN -
SAIO? -
MUNDO ELÉTRICO -JULHO -1972.
- CINIERO, A. ISOLAMENTO DE TRANAFORMADORES:
PARA OPERAÇÃO OU ENSAIO?||
MUNDO ELÉTRICO -AGOSTO -1972.
- HOPKINSON, R.H. - FERRORESONANCE DURING SINGLE-
PHASE SWITCHING
IEEE - APRIL -1965
- HOPKINSON, R.H. - FERRORESONANCE OVERVOLTAGE
CONTROL
IEEE TRANSACTIONS ON POWER
APPARATUS AND SYSTEMS, VOL.
PAS.-87, NO 2 -1968

- KAUFMAN, R.B. AND MEADOR, J.R. . - .DIELECTRIC TESTS FOR E.H. V. TRANSFORMERS
IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS. 87, NO 1 JANUARY-1968
- LEWIS, W.W. - THE PROTECTION OF TRANSMISSION SYSTEMS AGAINST LIGHTNING
DOWER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK -1965.
- PETERSON, H.A. - TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS
DOWER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK - 1966.
- RHEINBOLDT, D. A. - ENSAIO DE IMPULSO EM TRANSFORMADOR GENERAL ELETRIC S.A.
- STENKUIST, E. ET HYLÉN -CAVALLIUS, N. - ÉTUDE DE LA DETECTION ET DE LA LOCALIZATION DES DÉFAUTS DANS LES ESSAIS DE CHOC DES TRANSFORMATEURS
ASEA RESARCH NUMBER 1 VASTERAS SWEDEN -1958
- SIE, T. H. - SWITCHING SURGE TESTS OF POWER TRANSFORMERS.
BULLETIN OERLIKON OERLIKON ENGINEERING COMPANY
ZURICH -OCTOBER -1968.
- STEIN, G.M. - A STUDY OF THE INITIAL SURGE DISTRIBUTION IN CONCENTRIC TRANSFORMER WINDINGS.
IEEE -SEPTEMBER -1964.

- VORA, J.P. E AND
FOSTER, S.L.

- POWER TRANSFORMERS AND
CORONA TESTING
IEEE AUGUST -1965

- WHERRY, F.E., TOOTHMAN, L.R.
YAKOV, S. AND PRESTON, L.L.

- THE SIGNIFICANCE OF
CORONA MEASUREMENTS ON
TRANSFORMERS.
IEEE TRANSACTIONS ON
POWER APPARATUS AND
SYSTEMS, VOL.PAS.-87 ,
NO .11, NOVEMBER, 1968.

- YOUNG, F.S., SCHMID, R.L.
AND FENGESTAD, P.I.

- FERRORESONANCE IN CABLE -
CONNECTED TRANSFORMERS.
IEEE TRANSACTIONS ON
POWER APPARATUS AND
SYSTEMS, VOL.PAS.-87 ,
NO. 5 , MAY -1968.

- L.PARIS, EMEL, ITALY

- NEW TRENDS IN INSULATION
CO-ORDINATION - APPLICATION
OF NEW I.E.C.
SPECIFICATION
ASEA JOURNAL 1971 -VOL.44
NUMBER 5 .

-

- ALSTON HIGH VOLTAGE
TECHNOLOGY
OXIFORD UNIVERSITY PRESS -
1968

- E.B.-91
M.B.-128

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
NORMAS TÉCNICAS -197L

- ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK BY CENTRAL STATION ENGINEERS OF THE WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION EAST PITTSBURGH, PENNSYLVANIA 1964.
- IEEE GUIDE FOR TRANSFORMER IMPULSE TESTS. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. NEW YORK - JUNY -1968.
- THE BROWN BOVERI REVIEW ISSUED BY BROWN, BOVERI & COMPANY, LIMITED, BADEN SWITZERLAND -MAY -1959
- SWITCHING SURGE TESTS FOR OIL- INSULATED POWER TRANSFORMERS IEEE COMMITTEE REPORT
- TRANSFORMATEURS DE GRANDE PUISSANCE. ÉLECTRICITÉ DE FRANCE CENTRALE DE CREIL (OISE)