Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Distribuição de Potenciais no Transformador de Potência SHELL

Desenvolvimento de pré e pós processadores para programa de cálculo

Pedro Miguel da Mota Lopes Ribeiro

VERSÃO FINAL

Relatório de Projecto realizado no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor Artur Fernandes Costa

Junho de 2009

© Pedro Miguel da Mota Lopes Ribeiro, 2009

Aos meus Pais.

A ti, Catarina.

Resumo

A resposta de um transformador a sobretensões de alta frequência é uma das características mais importantes deste tipo de máquina. Sendo um factor determinante no seu tempo de vida útil, foram implementados ensaios que levam ao limite a resistência da sua estrutura isolante. Para uma empresa que se dedica à construção de transformadores de elevada potência, um resultado insatisfatório nestes ensaios pode significar prejuízos que ascendem aos milhares de euros. Daqui se depreende a necessidade de dispor de ferramentas de cálculo que permitam, ainda na fase de projecto, determinar com rapidez e segurança a capacidade de um transformador resistir às solicitações impostas por ondas de choque.

Este trabalho descreve a implementação de um pré-processador e a conceptualização de um pós-processador para um programa de cálculo de distribuição de potenciais nos enrolamentos de um transformador do tipo Shell, a pedido da empresa de produção de transformadores de potência Efacec. A solução implementada resultou num aumento significativo da rapidez e fiabilidade na utilização do programa ao nível da preparação dos dados de entrada, prevendo-se também uma maior facilidade na interpretação dos resultados.

Abstract

A power transformer's response to high frequency overvoltages is one of the defining characteristics of this type of machine. Being a determinant factor in its life cycle, severe tests have been implemented which push the resilience of its insulation to the limits. For a company dedicated to the construction of transformers of high power ratings, an unsatisfactory result in these tests may translate into losses running into thousands of euros. Hence, one understands the need to possess calculation tools, which allow the fast and accurate determination of *Impulse* voltage stresses, still in the project phase.

This work describes the implementation of a pre processor and the conceptualization of a pos processor for a program for calculation of *Impulse* voltage distribution in windings of Shell type transformers, by request of power transformer manufacturing company, Efacec. The implemented solution has resulted in significant increase of performance and reliability in the usage of the program when preparing input data, an increase of ease of interpretation for the results is also predicted.

Agradecimentos

É meu desejo aqui expressar os mais sinceros agradecimentos ao meu orientador, o Professor Doutor Artur Fernandes Costa, por toda a sua ajuda e acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho. Não só o trabalho aqui exposto, mas também eu próprio, fomos, em muito, influenciados pela tremenda dedicação que mostrou, por mim e por todos os seus orientandos.

Agradeço à Efacec e a todos os colaboradores do departamento de PTRD pelas excelentes condições de trabalho proporcionadas, em especial ao Eng.º Duarte Couto e Eng.º Jácomo Ramos, já que, para além de me aceitarem para o estágio, tudo fizeram para garantir que este se desenrolava com o máximo de sucesso. Agradeço também à Eng.ª Andrea Soto, colega de carteira e ajuda preciosa, sempre disponível.

Índice

1 Introdução 1

1.1 - Objectivos 2

1.2 - Metodologia e breve apresentação do trabalho 2

2 Transformador de Potência Shell 5

2.1 - Circuito Magnético 6

2.1.1 - Materiais 6

2.1.2 – Geometria e Construção 7

2.2 - Enrolamentos 9

2.3 - Óleo 10

2.4 - Estrutura Isolante 11

2.4.1 – Constituintes 11

2.4.3 - Degradação 13

2.5 - Conclusão 14

3 Sobretensões 15

3.1 - Sobretensões de Origem Atmosférica 15

3.2 - Sobretensões de Manobra 17

3.3 - Ensaio de Onda de Choque 17

3.3.1 - Ensaio de descarga atmosférica 18

3.4 – Solicitações no Transformador 22

3.5 – Atenuação dos Efeitos de uma Onda de Choque 22

3.6 – Conclusão 23

4 Programa Impulse 25

4.1- Aquisição de Dados 26

4.1.1 - Lógica De Numeração Dos Nós 28

4.2 - Modelo do Transformador e Cálculo dos seus Parâmetros 29

4.2.1 - Definição da geometria dos enrolamentos 30

4.2.2 - Capacidades 31

4.2.3 - Indutância Própria e Mútua 33

4.2.4 - Resistência 33
4.4 - Cálculo dos Potenciais 34
4.3 - Apresentação de Resultados 35
4.4 - Conclusão 36
5 Pré-Processador 37
5.1 - Enquadramento 37
5.2 - Comunicação Wintree/Impulse 39
5.2.1 - Impulse como biblioteca dinâmica 39
5.2.2- Passagem de Variáveis 40
5.3 - Aquisição de Dados 41
5.3.1 - Interface 41
5.4 - Numeração de Nós 44
5.4.1 - Esquematização da ligação no Wintree 44
5.4.2 - Informação adicional de conexões 46
5.4.3 - Lógica de Numeração do Pré-processador 49
5.4 - Conclusão 54
6 Pós-Processador 57
6.1 - Aquisição de Resultados 57
6.2 - Apresentação de Resultados 58
6.2.1 - Mapa de Cores 58
6.2.2 - Gráficos 60
6.3 - Conclusão 61
7 Conclusões 63
7.1 - Futuro Desenvolvimento 64
Anexo A: Manual de Utilização do Impulse 65
A1 - Preparação de Execução 65
A2 – Preenchimento dos Dados 69
A2.1 - Esquema 69
A2.2 - Anéis de Guarda 76
A2.3 - Forma de Onda e Parâmetros de Cálculo 77
A2.4 - Componentes Externos 78
A3 - Execução do Cálculo 79
Referências 81

Lista de figuras

Figura 2.1 - Circuito magnético tipo core com enrolamentos. 5
Figura 2.2 - Circuito magnético tipo core com enrolamentos. 5
Figura 2.3 - Pormenor da chapa magnética de um transformador tipo Core. 7
Figura 2.4 - Tipos de núcleo shell trifásicos. 8
Figura 2.5 - Trajectória do fluxo magnético numa junta desfasada. 8
Figura 2.6 - Montagem de galete com espiras de oito feixes. 9
Figura 2.7 - Feixes de cinco condutores de cobre. 9
Figura 2.8 - Disposição das galetes em torno do núcleo. 10
Figura 2.9 - Tensão de ruptura (em kV) em função da água no óleo (em ppm). [5]..... 11
Figura 2.10 - Ecrã isolante com canais de circulação do óleo. 12
Figura 2.11 - Moldados curvos e rectos. 12
Figura 2.12 - Enrolamento completo, pronto a seguir para secagem 13
Figura 3.1 - Mecanismo de polarização de uma nuvem. [8]..... 16
Figura 3.2 - Circuito eléctrico formado durante a descarga. 16
Figura 3.3 - Formas de onda plena e onda cortada. [4] 18
Figura 3.4 - Gerador de impulso e respectivo esquema eléctrico simplificado [4]. 19
Figura 3.5 - Transformador em ensaio. Esquema de ligação..... 20
Figura 3.6 - Formas de onde de tensão e corrente de uma transformador(…) 21
Figura 3.7 - Formas de onde de tensão e corrente de uma transformador(…) 21
Figura 3.8 - Distribuição de potenciais no enrolamento. [12] 23
Figura 4.1 - Diagrama de Sequência do programa Impulse..... 26
Figura 4.2 - Datasheet do programa Impulse. 27
Figura 4.3 - Segmento de ficheiro de entrada..... 27
Figura 4.4 - Forma de leitura dos dados da datasheet..... 28
Figura 4.5 - Lógica de numeração do Impulse para a descrição de ligações. 28
Figura 4.6 - Possíveis numerações de tomadas para a mesma galete. 29
Figura 4. 7- Modelo finito de um enrolamento. 30
Figura 4.8 - Lógica do Impulse para a determinação da geometria dos enrolamentos..... 30
Figura 4.9 - Coordenadas das galetes. 31
Figura 4.10 - Esquema de enrolamento para cálculo das capacidades..... 32
Figura 4.11 - Segmento de folha de resultados do programa Impulse. 35
Figura 5.1 - Ambiente de desenvolvimento Wintree. 38
Figura 5.2 - Implementação actual do Impulse..... 38
Figura 5.3 - Exemplo de sequência de chamada de DLL. 40
Figura 5.4 - Modo de envio dos dados..... 40
Figura 5.5 - Janela "Cálculo" do interface do Pré-Processador. 42
Figura 5.6 - Janela "Componentes Externos" do interface do Pré-Processador..... 42
Figura 5.7 - Janela "Anéis de Guarda" do interface do Pré-Processador..... 43

Figura 5.8 - Janela "Esquema" do interface do Pré-Processador. 43
Figura 5.9 - Representação do corte na janela. 44
Figura 5.10 - Corte na janela com ligações 1 e 2 representadas. 45
Figura 5.11 - Corte na janela com ligações 1 e 3 representadas. 45
Figura 5.12 - Janela de definição de regimes do Wintree. 46
Figura 4.12 - Matriz de esquema obtida para o exemplo da figura 4.9. 48
Figura 5.13 - Diagrama de sequência de construção da matriz de esquema. 47
Figura 5.14 - Método de preenchimento de matriz esquema. 48
Figura 5.16 - Matriz de esquema relativa à figura 5.14. 49
Figura 5.15 - Regime de funcionamento e esquema de conexões. 49
Figura 5.17 - Diagrama de sequência de construção de *array* "RefConexões". 51
Figura 6.1- Conceptualização de uma apresentação numérica dos resultados. 58
Figura 6.2 - Sequência de preenchimento de uma galete. 59
Figura 6.3 - Programa modelo com mapa de cores. 60
Figura 6.4 - Mapa de cores e tabela de potenciais. 60
Figura A.1 -Botão "Parte Activa Shell". 65
Figura A.2 - Localização do programa Impulse. 66
Figura A.3 - Mensagem de erro. 66
Figura A.4 - Regime "Tomada 4". 67
Figura A.5 - Representação das ligações do "Regime 4". 68
Figura A.6 - Definição de regime "Impulso". 68
Figura A.7 - Representação das ligações do regime "Impulso". 69
Figura A.8 - Matriz de esquema do regime "Impulso" do transformador E8020049A. 70
Figura A.9 - Exemplo de esquema pretendido. 71
Figura A.10 - Definição de ponta de aplicação do Impulso. 72
Figura A.11 - Definição das pontas à massa. 72
Figura A.12 - Definição das pontas conectadas. 73
Figura A.13 - Definição das tomadas a considerar. 74
Figura A.14 - Selecção de Cálculo Trifásico 74
Figura A.15 - Matrizes de Esquema das fases V e W. 75
Figura A.16 - Separador de especificação dos nós comums. 75
Figura A.17 - Separador "Anéis de Guarda". 76
Figura A.18 - Separador "Cálculo". 77
Figura A.19 - Selecção de tipo de onda. 77
Figura A.20 - Parâmetros da onda dupla exponencial e parâmetros de cálculo. 78
Figura A.21 - Circuito externo de exemplo. 78
Figura A.22 - Definição de componentes externos. 79
Figura A.23 - Botão de inicio de cálculo. 79

Lista de tabelas

Tabela 5.1 - 45
Tabela 5.2 - 46
Tabela 5.3 - 50
Tabela 5.4 - 52
Tabela 5.5 - 53
Tabela 5.6 - 54
Tabela 5.7 - 54

Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas:

DLL	*Dynamic Link Library*
F	Farad
H	Henry
IEC	International Electrotechnical Commission
I.E.E.E.	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Lista de Símbolos:

f	frequência
y	condutância
ρ	resistividade
μ	permeabilidade
ε	permissividade
Ω	Ohm

Capítulo 1

Introdução

"O isolamento é assinalado como um dos mais importantes elementos construtivos de um transformador. A sua principal função é a restrição da corrente a caminhos úteis, prevenindo o seu fluxo para canais prejudiciais. Qualquer fraqueza do isolamento pode resultar na falha do transformador." [1]

O excerto anterior demonstra bem a importância que o I.E.E.E. atribui à estrutura isolante do transformador de potência. Para dimensionar esta estrutura, devem ser conhecidos os esforços nela impostos pelo aparecimento de potenciais ao longo dos enrolamentos. A análise destes potenciais não se limita aos previstos em condições de funcionamento ideais mas, mais importantemente, aos que se desenvolvem quando o transformador está sujeito a fenómenos transitórios tais como o impacto de ondas de alta tensão e alta frequência, verificados durante acções de manobra ou descargas atmosféricas.

O sucessivo aumento das potências dos transformadores colocaram uma pressão crescente sobre as suas estruturas isolantes. Os custos de materiais e transporte, associados a limites de atravancamento, significam que, cada vez mais, o seu dimensionamento é feito de modo a que suportem os potenciais impostos pelas condições de ensaio, mantendo a um nível mínimo as suas dimensões. A título de exemplo, considere-se um dado transformador trifásico de 600 MVA: um aumento de 10 cm na espessura da camada isolante traduzir-se-ia num acréscimo de, aproximadamente, 2500 Kg no peso do circuito magnético.

Daqui se depreende a necessidade de uma empresa do sector de dispor de ferramentas de cálculo que permitam prever, com crescentes níveis de eficácia, o comportamento do transformador quando sujeito a escalões de tensão de alta frequência. Quanto mais detalhados e aproximados da realidade forem os resultados obtidos, maior será a confiança com que o projectista tomará decisões que levem a uma construção mais eficiente. Foi no sentido de reforçar esta capacidade que a Efacec apresentou uma proposta de estágio à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A Efacec dispõe de um programa para de cálculo da distribuição de potenciais num transformador tipo Shell sujeito a um escalão de tensão, o *Impulse*. Escrito originalmente em 1975, o seu método de operação afasta-se de tal forma da filosofia dos restantes programas de simulação da empresa, que surgiu a necessidade de o adaptar de modo a que seja possível continuar com a sua utilização recorrente por parte dos colaboradores da Efacec. A

consistência dos resultados obtidos com este programa, ao longo dos anos de utilização, ditou que se procurasse fazer uma adaptação do programa, de forma a tornar a sua utilização mais intuitiva e, possivelmente, expandir as suas funcionalidades.

O meu interesse pela programação, especialmente no desenvolvimento de algoritmos, bem como a vontade a aprofundar os conhecimentos relativos a máquinas eléctricas, motivaram-me a aceitar a resposta a este problema como tema da minha Dissertação de Mestrado.

1.1 - Objectivos

Uma primeira reunião com os proponentes, revelou que se procurava desenvolver dois módulos para o programa: um pré-processador, para a aquisição de dados, e um pós-processador, para a apresentação de resultados. Imediatamente, concluiu-se que o tempo disponível até à apresentação do presente trabalho não seria suficiente para o completar na totalidade. Estabeleceu-se, então, como objectivo principal a concepção e implementação do pré-processador, ficando o trabalho desenvolvido ao nível do pós-processador sujeito ao restante tempo disponível.

A Efacec dispõem de um sistema de informação, o Wintree, que ao longo dos anos tem vindo a agregar progressivamente todas as ferramentas de trabalho utilizadas na concepção de transformadores. Os módulos desenvolvidos não devem apenas garantir uma maior facilidade de utilização do *Impulse*, mas também que este se torne uma parte integrante e indissociável do Wintree.

Com isto em mente, definiram-se os objectivos para o trabalho a desenvolver:

- Permitir a execução dos cálculos associados ao programa *Impulse* a partir do Wintree.
- Projectar e implementar um pré-processador capaz de recolher os dados necessários ao *Impulse* acedendo directamente à base de dados da Efacec. A implementação do pré-processador não devendo ser tal que limite ou elimine as funcionalidades anteriormente existentes.
- Conceber e, se possível, implementar um pós-processador que permita a visualização dos resultados de uma forma mais clara e a interpretação mais rápida que as actualmente permitidas.

1.2 - Metodologia e Breve Apresentação do Trabalho

Prever a distribuição dos potenciais ao longo dos enrolamentos de um transformador requer, naturalmente, uma caracterização profunda da sua estrutura física e propriedades eléctricas e magnéticas dos seus componentes, bem como do fenómeno que se pretende modelizar. Assim, a primeira abordagem ao trabalho começou por uma familiarização com todas as partes constituintes do transformador tipo Shell, com especial ênfase sobre as particulares desta configuração específica. O capítulo 2 reflecte o resultado dessa pesquisa, procurando reunir as informações que permitam, com alguma confiança, avançar para o estudo dos efeitos das sobretensões neste tipo de transformador. No capítulo 3, discute-se a problemática das sobretensões de alta frequência, numa tentativa compreender as condições

que estão na sua origem, bem como o seu impacto no funcionamento do transformador de potência Shell. Refere-se, também, como os ensaios de onda de choque procuram validar a estrutura isolante dos transformadores, expondo-os ao que se acredita serem boas aproximações dos fenómenos transitórios a que se espera que resistam ao longo do seu tempo de vida. Com a caracterização do fenómeno real, pretende-se justificar a metodologia adoptada para estes ensaios.

A implementação de pré e pós processadores para o *Impulse* supõe um bom conhecimento do seu funcionamento. A fase seguinte do trabalho consistiu na familiarização com o programa. Foram enumerados os dados de entrada necessários, estudou-se, de uma maneira geral, de que maneira eram processados e quais os resultados obtidos no fim do cálculo. Especialmente, procurou-se nesta fase compreender as principais limitações e dificuldades de utilização do programa, expostas no capítulo 4. Paralelamente, houve um contacto com o sistema informático da Efacec, procurando relacionar os dados necessários ao *Impulse* com a informação referente aos transformadores, existente na base de dados da Efacec.

Foi, então, idealizada uma lógica para o pré-processador que permitisse que a informação já disponível fosse combinada com os dados fornecidos pelo utilizador, reestruturada para a forma de leitura de dados do *Impulse* e enviada automaticamente. Ao longo da sua implementação, esta lógica foi sendo sucessivamente aperfeiçoada à medida que iam sendo conhecidas as particularidades do Wintree, resultando na sequência final na descrita no capítulo 5.

O tempo disponível após a implementação do pré-processador foi suficiente para que se iniciasse o desenvolvimento do pós-processador. Procurou-se uma forma de apresentação dos dados que permitisse fazer uma interpretação, simultaneamente, mais rápida e com maior detalhe. Embora a solução encontrada não tenham sido implementada à data de elaboração desta dissertação, considerou-se justificável dedicar o capítulo 6 à sua descrição.

Capítulo 2

Transformador de Potência Shell

O principal propósito de um transformador de potência é a conversão de potência a um nível de tensão para potência da mesma frequência a outro nível de tensão. Consiste em dois ou mais enrolamentos, em alumínio ou cobre, envolvendo um núcleo ferromagnético comum. Estes enrolamentos estão, geralmente, isolados electricamente um do outro, sendo o fluxo magnético que percorre o núcleo comum o acoplamento único entre eles.

Transformadores de potência podem ser constituídos por um de dois tipos de núcleo. Nos transformadores tipo *Core,* cada um dos enrolamentos envolve uma das colunas de um núcleo rectangular de aço magnético laminado. Outro tipo consiste num núcleo de três colunas, com os enrolamentos dispostos axialmente em torno da coluna central. Esta é conhecida como construção tipo *Shell*. As figuras 2.1 e 2.2 representam respectivamente, a estrutura destes transformadores na sua configuração monofásica. No transformador tipo *Core* o eixo dos enrolamentos esta na vertical enquanto nos tipo *Shell* esse eixo é horizontal. Embora a geometria e orientação do núcleo seja a característica mais diferenciadora destes dois tipos

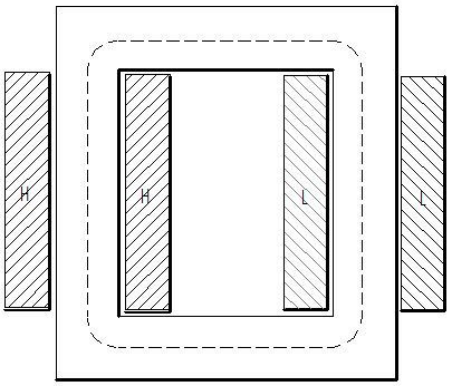


Figura 2.1 - Circuito magnético tipo core com enrolamentos.

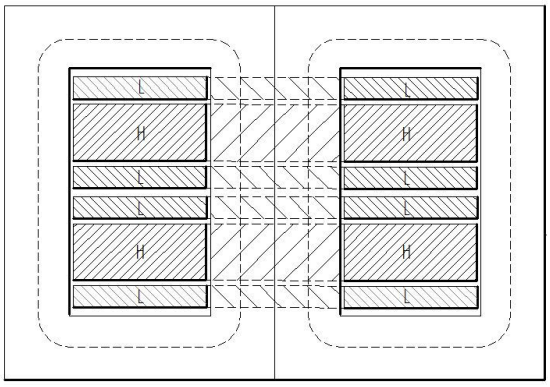


Figura 2.2 - Circuito magnético tipo core com enrolamentos.

de transformadores, as suas particularidades estendem-se a praticamente todos os aspectos construtivos. O conhecimento destas características é fundamental para a previsão do comportamento do transformador quando exposto a fenómenos transitórios.

Neste capítulo serão abordados alguns dos aspectos construtivos mais importantes de um transformador de potência tipo Shell, já que é sobre este que incide o presente estudo. O circuito magnético, enrolamentos e estrutura isolante serão descritos com especial cuidado pela importância que estes elementos assumem na caracterização eléctrica do transformador e, consequentemente, na correspondente modelização matemática.

2.1 - Circuito Magnético

O acoplamento magnético dos enrolamentos é assegurado pelo circuito magnético do transformador. A importância deste componente foi desde muito cedo compreendida e, como tal, os sucessivos avanços na sua concepção permitiram que se construam circuitos magnéticos com as excelentes propriedades eléctricas de que agora se dispõe. No entanto, o desenho de um circuito magnético prende-se também com questões relacionadas com o custo e facilidade de construção e reparação, requisitos de atravancamento, arrefecimento e resistência mecânica, que justificam muitas das escolhas a nível de materiais e geometria do mesmo. Estas características assumem especial importância em transformadores trifásicos de elevada potência do tipo Shell, nos quais a massa do circuito magnético ultrapassa, facilmente, as 70 toneladas.

2.1.1 - Materiais

A necessidade de garantir alta permeabilidade do circuito, juntamente com elevada resistência eléctrica, é satisfeita recorrendo a materiais ferromagnéticos. Certos tipos de ferros e suas ligas com cobalto, tungsténio, níquel, alumínio e outros metais permitem um elevado fluxo magnético para uma determinada força magnetizante e possibilitam a restrição do fluxo a um caminho desejado. É difícil imaginar como os actuais desenhos de transformadores seriam possíveis sem materiais que exibissem estas propriedades.

Durante o funcionamento, um núcleo ferromagnético é atravessado por fluxo variável, surgindo fenómenos de histerese e de correntes de Foucault dos quais resultam perdas. Para limitar essas perdas usam-se materiais com ciclo histerético de pequena área. Aço com cerca de 4% de silício é geralmente utilizado [2; 3; 4]. Como na generalidade dos metais, o aço possui alta condutividade, característica indesejável em circuitos magnéticos por facilitar a formação de correntes de Foucault, resultando em elevadas perdas. A adição de uma pequena percentagem de silício resulta num dramático aumento da resistividade, até quatro vezes superior [4]. Este material representa um bom compromisso entre preço, facilidade de manuseamento, baixa histerese e alta permeabilidade para densidades de fluxo relativamente altas [3].

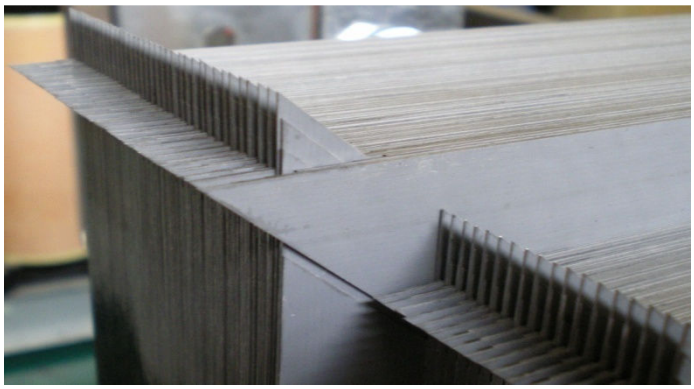


Figura 2.3 - Pormenor da chapa magnética de um transformador tipo Core.

A construção do núcleo é feita pelo empilhamento e forte aperto de chapas finas deste material, isoladas electricamente umas das outras, no que é conhecido como construção laminada. Usando esta técnica, representada na figura 2.3, o circuito magnético é equivalente a vários circuitos individuais, cada um atravessado apenas por uma pequena fracção do fluxo magnético total. Graças à reduzida secção de cada chapa, consegue-se um aumento suplementar da resistência, com a redução adicional das correntes de Foucault. A grossura das chapas, tipicamente na ordem dos 0,3mm ou inferior, bem como a quantidade de silício presente no aço, ate 4%, são limitadas pela dificuldade em manter a integridade das chapas durante o seu manuseamento quando os valores referidos são ultrapassados [4].

A introdução da laminagem a frio e o recozimento da chapa magnética permitiu a obtenção de chapa de cristais orientados, com propriedades magnéticas anisotrópicas. Isto é, na direcção da laminagem, a densidade de fluxo é 30% superior relativamente à chapa de cristais não orientados [4]. Como nos transformadores a direcção do fluxo magnético é constante, esta propriedade é altamente vantajosa.

É geralmente aceite que a complexidade acrescida da construção do circuito magnético pela adopção destas técnicas é compensada pelas excelentes características assim obtidas. A resultante indução de saturação mais elevada permite reduzir o volume e peso de ferro, diminuindo-se a corrente magnetizante e as perdas.

2.1.2 – Geometria e Construção

Na figura 2.2 está representado o aspecto típico de um circuito magnético tipo Shell de transformador monofásico. Os enrolamentos são dispostos axialmente em torno do núcleo. O enrolamento de baixa tensão é fraccionado em bobinas parcelares que se dispõem alternadamente com o de alta: enrolamentos imbricados. Esta divisão é necessária para garantir que as bobinas de baixa tensão ocupem sempre a posição mais extrema, tipicamente de mais difícil isolamento pela proximidade com as travessias. O número de grupos alternados de alta-voltagem/baixa-voltagem depende das características de reactância que se desejem obter para o transformador.

Nos transformadores Shell de três fases, o circuito magnético pode ter uma das formas representadas na figura 2.4. A estrutura b), de cinco colunas, usa-se quando a potência dos transformadores atinge a centena de mega-Volt-Ampéres. As colunas laterais garantem retorno de uma parte do fluxo os núcleos, permitindo limitar a altura do transformador.

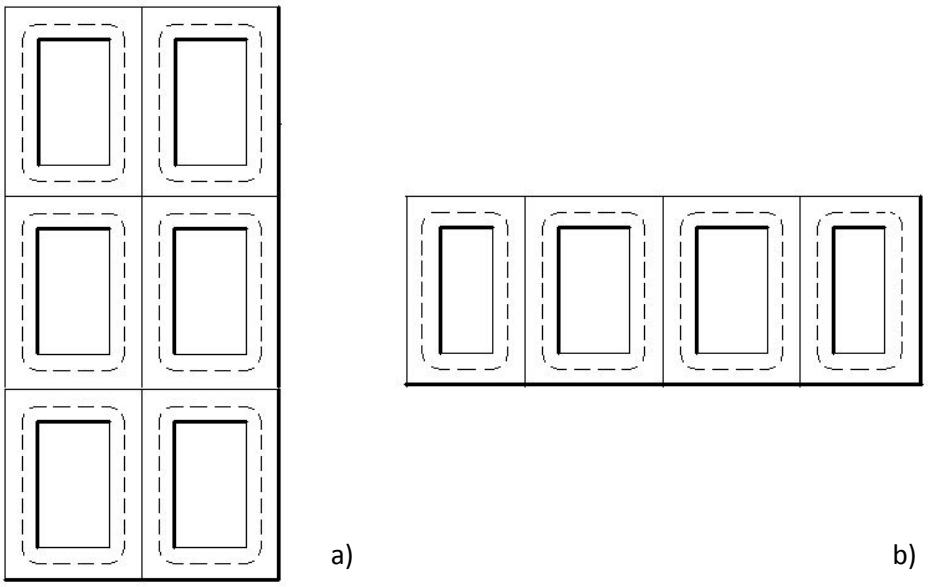


Figura 2.4 - Tipos de núcleo shell trifásicos.

Nas juntas de mudança de direcção do fluxo, o corte da chapa é efectuado a 45º, para que a circulação do fluxo magnético se faça o máximo possível segundo a direcção de laminagem. A simples junção "topo a topo" dá lugar ao aparecimento de entreferros que irão provocar o aumento do fluxo de dispersão, da relutância do circuito magnético e o consequente aumento das perdas e da corrente magnetizante. Para minimizar este efeito, as chapas são colocadas com as juntas desfasadas de modo a haver sobreposição das chapas. Assim, o fluxo segue o caminho de menor relutância, passando, na zona do entreferro, para a chapa vizinha, como representado na fgura 2.5. Obtém-se assim uma redução da corrente magnetizante e evita-se o aquecimento das juntas decorrente das perdas muito localizadas [5].

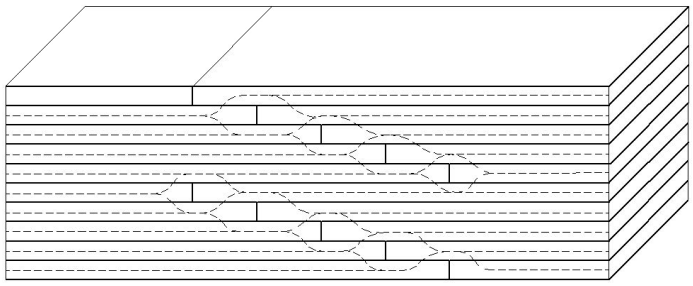


Figura 2.5 - Trajectória do fluxo magnético numa junta desfasada.

Ao contrário do que se verifica tipicamente nos transformadores core, o circuito magnético é construído com os enrolamentos já na sua posição final, assentes na base da cuba. O empilhamento das chapas que formarão as colunas, travessas e o núcleo é feio em simultâneo, também nas suas posições finais. A vantagem de erigir o transformador desta forma é a possibilidade de o fazer evitando translações de grande amplitude dos enrolamentos, importante em transformadores com centenas de MVA de potência, com enrolamentos muito pesados.

O aperto das chapas é obtido pela realização da cuba em duas partes: uma base que envolve a porção inferior dos enrolamentos e uma campânula que envolve a parte superior e

pressiona o núcleo contra a base. Consegue-se assim o aperto do núcleo sem recorrer a parafusos que, além de sujeitos a correntes de Foucault, podem ser responsáveis pelo contacto eléctrico entre chapas.

2.2 - Enrolamentos

O enrolamento típico de um transformador do tipo Shell consiste em discos (galetes) com as espiras enroladas sucessivamente em camadas concêntricas. Cada espira pode ser constituída por um ou mais feixes e cada feixe, por sua vez, consiste num certo número de condutores rectangulares, de cobre ou alumínio, dispostos paralelamente. A figura 2.6, mostra a fase de construção de uma galete com oito feixes por espira.

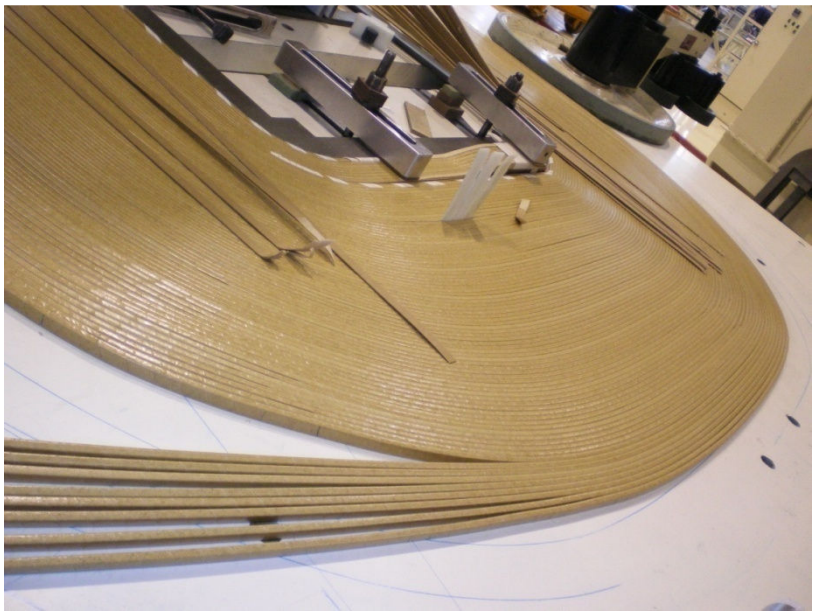


Figura 2.6 - Montagem de galete com espiras de oito feixes.

Em galetes de condutores múltiplos (figura 2.7), transposições dos feixes são feitas regularmente para garantir uma distribuição uniforme da corrente. O número e secção dos condutores são definidos em função da corrente que percorre o enrolamento durante o funcionamento normal do transformador, de maneira a que, por um lado, não se verifique uma queda de tensão excessiva entre espiras sucessivas e, por outro, as perdas por efeito de Joule não provoquem um aquecimento exagerado.



Figura 2.7 - Feixes de cinco condutores de cobre.

Cada galete é enrolada individualmente e posteriormente são soldadas as ligações dos condutores. Se a corrente percorre uma galete do interior para o exterior, a galete seguinte será percorrida do exterior para o interior e assim sucessivamente. Naturalmente, isto significa que a diferença de potencial será maior entre as extremidades electricamente mais afastadas de duas galetes [6]. Para aumentar o espaçamento entre extremidades de galetes contíguas dá-se uma forma cónica à galete na altura da montagem do enrolamento. O chamado enrolamento graduado de galetes inclinadas, representado esquematicamente na figura 2.8.

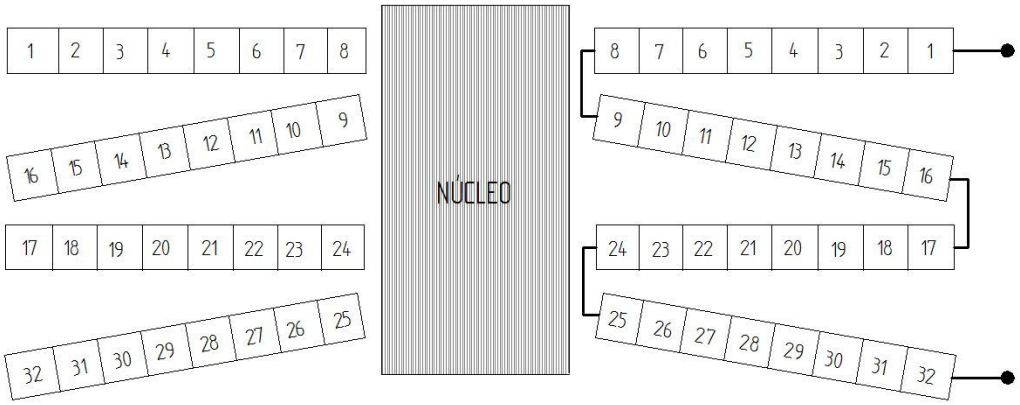


Figura 2.8 - Disposição das galetes em torno do núcleo.

2.3 - Óleo

Nos transformadores de pequenas dimensões o arrefecimento é, geralmente, assegurado por simples radiação e convecção. Transformadores de maior potência não têm, no entanto, área suficiente para dissipar convenientemente o calor gerado pelas perdas antes que se dê a degradação da estrutura isolante. O processo de arrefecimento mais adequado para os transformadores consiste em colocar o núcleo e os enrolamentos no interior de uma cuba com óleo mineral. Este melhora substancialmente a transmissão de calor para o exterior. Dependendo do local de instalação do transformador, o óleo mineral, devido às suas propriedades combustíveis, pode ser substituído por líquidos sintéticos. Recentemente, a indústria tem procurado a utilização de óleos vegetais que, por serem biodegradáveis, apresentam-se como uma alternativa atraente na redução do impacto ambiental dos transformadores de potência.

Além da transmissão de calor, o óleo desempenha uma importante função no isolamento do transformador. A rigidez dieléctrica do óleo é muito superior à do ar, pelo que as propriedades da estrutura isolante melhoram significativamente quando impregnados pelo óleo, permitindo encurtar as distâncias de isolamento relativamente aos transformadores secos.

A presença de humidade no óleo diminui fortemente as suas características dieléctricas, ao ponto de motivar descargas dos enrolamentos às massas ou, no pior caso, entre espiras da galete. Um significativo período na construção do transformador é dedicado à eliminação de humidade dos enrolamentos, núcleo e estrutura isolante, sendo que muitos aspectos são

incluídos no seu desenho para controlar a penetração de humidade durante o funcionamento. O gráfico da figura 2.9, o efeito perverso da existência de impurezas no óleo

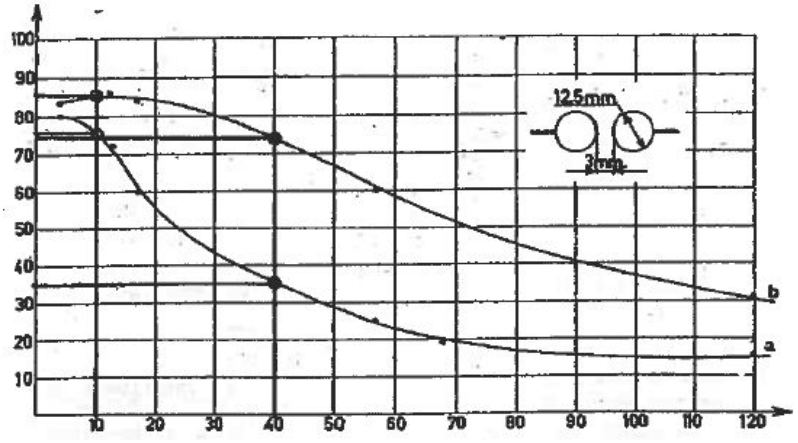


Figura 2.9 - Tensão de ruptura (em kV) em função da água no óleo (em ppm). **[5]**

Em geral, existem três estados de preparação dos enrolamentos para o processo de impregnação. Primeiro, a pré-secagem e compressão dos enrolamentos; segundo, secagem adicional até que a resistência de isolamento necessária seja obtida e, finalmente, a remoção do vapor e gás do conjunto completo do núcleo com enrolamentos.

As duas primeiras fases são executadas a pressão atmosférica numa estufa com reciclagem contínua do ar. A fase final, crucial em transformadores de elevada potência para garantir que são eliminadas as bolsas de ar no isolamento, é levada a cabo em câmaras de vácuo a 100º C. É no final desta fase, com o transformador ainda em vácuo, que o óleo é injectado na cuba e os enrolamentos completamente submersos. Em transformadores de grandes dimensões, que ultrapassem o tamanho máximo da estufa, a secagem dos enrolamentos é feita na própria cuba do transformador. Bombas de vácuo são acopladas à cuba e o transformador é colocado em funcionamento, o aquecimento sendo garantido pelo efeito de Joule nos enrolamentos.

2.4 - Estrutura Isolante

A estrutura isolante é a parte mais complexa e sensível do transformador. É estudada para responder a três exigências fundamentais: o suporte das bobinas dos vários enrolamentos garantindo o afastamento entre as galetes; a garantia de arrefecimento, criando canais para a circulação do fluído; a garantia dos níveis de isolamento impostos. O aumento sucessivo da potência dos transformadores e dos níveis de tensão aos quais operam, combinado com a necessidade de limitar as suas dimensões, tornou, ao longo do tempo, a estrutura isolante num componente sujeito a considerações cada vez mais cuidadosas durante o projecto e construção de um transformador.

2.4.1 – Constituintes

A queda de tensão entre feixes adjacentes da galete é pequena o suficiente para que o isolamento seja assegurado pelo papel que envolve os condutores individuais. Diferenças de

potencial mais significativas existem entre grupos de galetes adjacentes. Para garantir o isolamento recorre-se a ecrãs de cartão prensado de celulose de elevada pureza inseridos no espaçamento entre galetes. Aos ecrãs que estão directamente em contacto com as galetes, como os da figura 2.10, são colados calços que formam os canais de circulação do óleo.

Anéis de guarda, colocados paralelamente às galetes, desempenham um importante papel na protecção da estrutura isolante contra descargas ao uniformizar o seu campo eléctrico. Adicionalmente, aumentam a capacidade série do enrolamento, característica que será abordada em profundidade no capítulo 3.

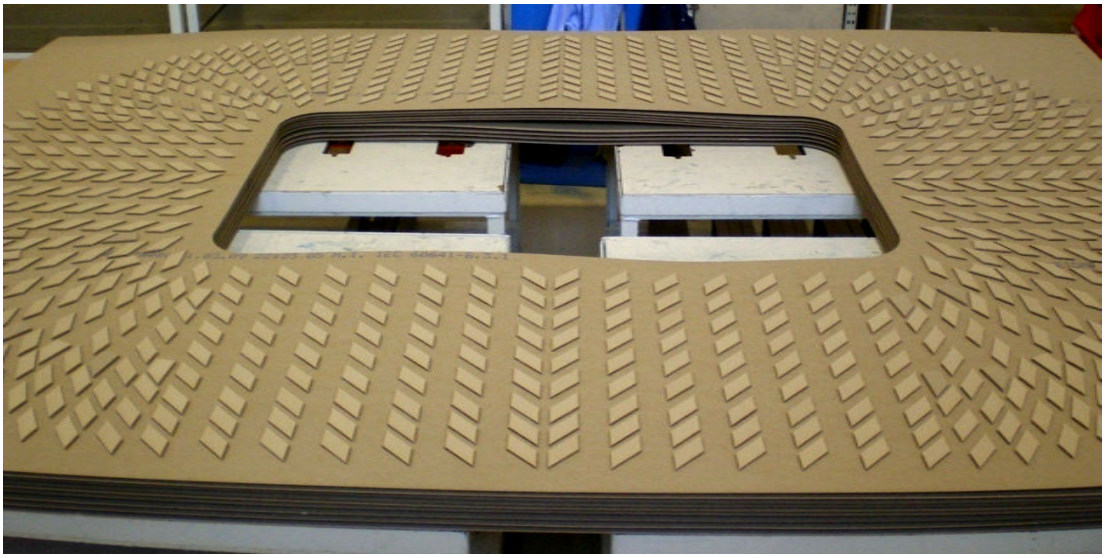


Figura 2.10 - Ecrã isolante com canais de circulação do óleo.



Figura 2.11 - Moldados curvos e rectos.

A periferia das galetes, por se tratar de uma zona onde o gradiente do campo eléctrico é especialmente elevado, devido ao efeito de aresta, é reforçada com moldados curvos e rectos como os da figura 2.11, que, efectivamente, "escondem" as arestas da galete.

O enrolamento completo é envolto por ecrãs exteriores paralelos e perpendiculares, a chamada *boite*, que asseguram o isolamento para as paredes da cuba e do circuito magnético. O aspecto final de um grupo de um enrolamento é o da figura 2.12.

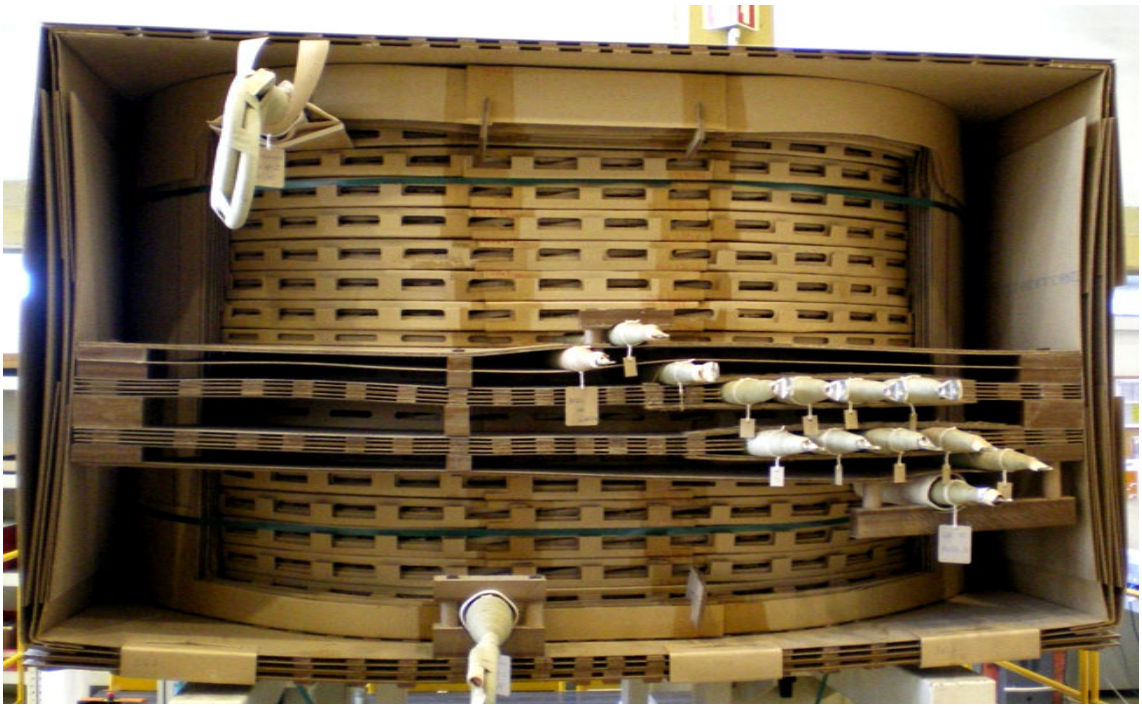


Figura 2.12 - Enrolamento completo, pronto a seguir para secagem. Notem-se as camadas isolantes, com perfurações para circulação do óleo, envolvendo todo o grupo.

2.4.3 - Degradação

A degradação da estrutura isolante de um transformador é o grande limitador do seu tempo de vida esperado. Falhas neste componente podem dever-se, essencialmente, ao incorrecto dimensionamento e construção da estrutura ou à operação do transformador em condições anormais, transitórias ou permanentes.

Quando são utilizados diferentes dieléctricos em série com permitividades diferentes, tais como óleo e isolamento sólido, deve-se ter em consideração que a tensão entre a totalidade da camada isolante terá uma divisão pelos materiais inversamente proporcional às suas constantes dieléctricas. Se a espessura das camadas não for dimensionada tendo isto em consideração, o gradiente de tensão na camada com constante menor poderá ser tal que ultrapasse os limites de segurança de operação e resulte na destruição sequencial de ambas camadas devido à ionização progressiva provocada pelas descargas parciais.

Este efeito é, alias, a razão pela qual são tão importantes os cuidados com a eliminação bolsas de ar no isolamento. A baixa constante dieléctrica, juntamente com o reduzido diâmetro das bolsas, resulta na ionização do ar que conduz, invariavelmente, a descargas totais através do isolamento. Transformadores com enrolamentos de galetes são menos propensos a este tipo de defeito pois as camadas sobrepostas da galete são fortemente apertadas durante a construção, diminuindo a probabilidade da existência de bolsas de ar. Também a estrutura aberta deste tipo de enrolamento traz vantagens, já permite que o material isolante entre galetes seja devidamente purgado de bolsas de ar anteriormente à impregnação com óleo.

Aos curto-circuitos nos terminais dos transformadores estão associados esforços electrodinâmicos nas espiras dos enrolamentos. Se a fixação dos enrolamentos for

insuficiente, a fricção entre espiras poderá provocar o rompimento do papel isolante e a consequente ligação eléctrica entre espiras, conduzindo à eventual retirada de serviço do transformador. Em transformadores com enrolamentos de galetes este fenómeno é menos severo, já que os esforços são sobretudo sentidos radialmente, na direcção de maior resistência da galete, pelo que o deslocamento é de amplitude reduzida.

2.5 - Conclusão

No presente capítulo descreveram-se os aspectos construtivos dos principais componentes de um transformador de potência Shell. Ao longo do texto tornou-se obvio que as sucessivas melhorias introduzidas na sua construção tornaram o transformador de potência numa máquina de elevada complexidade. A necessidade de, ao mesmo tempo, aumentar os níveis de potência e reduzir as perdas assegurando os níveis de fiabilidade exigidos, introduziu procedimentos que tornaram a sua construção um processo demorado e dispendioso. Compreende-se, então, a necessidade de dispor de ferramentas de concepção e procedimentos de ensaio que permitam, não só, assegurar com confiança um funcionamento satisfatório ao longo da sua vida útil, mas também evitar uma construção defeituosa, condicionada pela informação existente durante a fase de projecto.

Capítulo 3

Sobretensões

Os sistemas de transmissão de energia sempre foram susceptíveis a sobretensões. Para evitar a avaria dos transformadores e a consequente quebra de serviço, o equipamento deve ser desenhado para suportar as solicitações impostas por tais fenómenos.

Durante a operação, um transformador está sujeito a sobretensões que podem ser de manobra, de defeito, de ressonância e de descargas atmosféricas. De todo este conjunto, são as ondas de choque as mais severas, caracterizadas por um crescimento muito rápido até ao valor de crista e um decrescimento mais lento, até zero [2]. As sobretensões de manobra e de origem atmosférica são as que tipicamente apresentam uma forma de onda deste tipo e aquelas que o ensaio de onda de choque pretende simular.

Neste capítulo far-se-á referência ao mecanismo que está na origem destes dois tipos de sobretensões, bem como as variáveis que condicionam a resposta do transformador a elas. Apresenta-se também como, através dos ensaios de onda de choque, se consegue com alguma confiança validar o desenho e construção do transformador, nomeadamente a resistência da sua estrutura isolante a esses picos de tensão. Pelo seu carácter tipicamente mais severo, os aspectos relacionados com as descargas atmosféricas serão abordados em maior profundidade.

3.1 - Sobretensões de Origem Atmosférica

O comprimento e duração de um relâmpago variam de descarga para descarga mas assumindo o valor médio para a energia dissipada por metro calculado em [7], a energia total média por descarga é de 3×10^8 Joule. Considera-se que a duração média de uma descarga é de 30 μs. Assim, a potência por descarga corresponderá a aproximadamente a 10^{13} Watt.

Os perigos que as descargas atmosféricas apresentam para a indústria de fornecimento de electricidade são óbvios e motivaram investigadores a estudar o fenómeno e a formular complexos modelos que o expliquem.

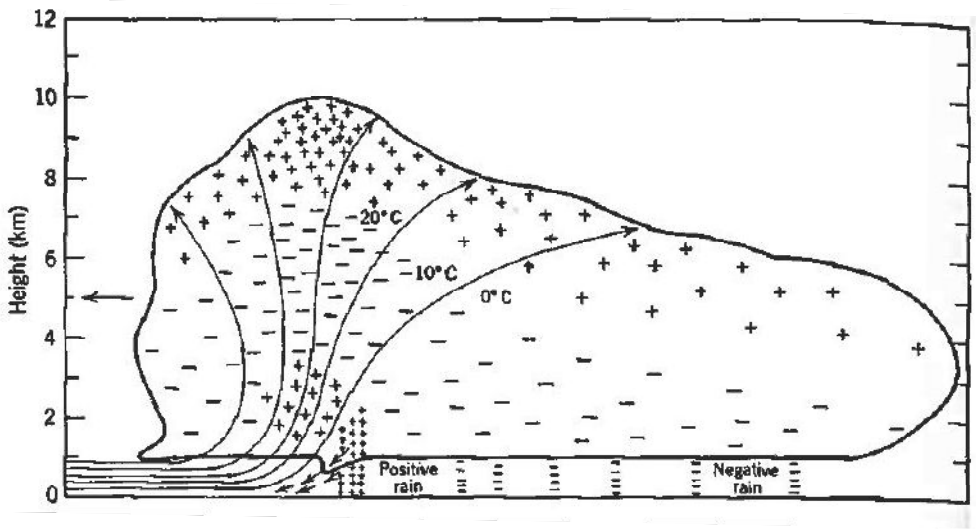


Figura 3.1 - Mecanismo de polarização de uma nuvem. **[8]**

É geralmente aceite que as correntes de ar ascendentes que acompanham as tempestades são responsáveis pela separação de cargas dentro da nuvem, levando à criação de campos eléctricos que, eventualmente, resultam numa descarga. Acredita-se que as gotas de água que se precipitam através da nuvem ficam polarizadas e atraem consigo iões negativos que carregam negativamente a zona inferior da nuvem. Entretanto, correntes ascendentes levam para o topo ar positivo. Na figura 3.1 está representado este mecanismo. À medida que as cargas acumulam na nuvem e por indução no solo por baixo, è atingido um ponto crítico a partir do qual o campo eléctrico é suficientemente forte para provocar a ruptura do ar humedecido pela chuva. Forma-se um canal de ar ionizado pelo qual fluem cargas negativas no sentido descendente, efeito conhecido como descarga negativa, ou cargas positivas no sentido ascendente, descarga positiva [9]. Se atingir um equipamento do sistema eléctrico, o apoio de uma linha por exemplo, esta corrente originará uma distribuição de potencial ao longo do apoio que poderá provocar uma descarga para os condutores caso o isolamento do cabo seja insuficiente [8].

O circuito assim estabelecido é completado pela corrente de deslocamento no campo eléctrico entre o solo e a nuvem, muito à semelhança do que acontece aquando da descarga de um condensador (figura 3.2).

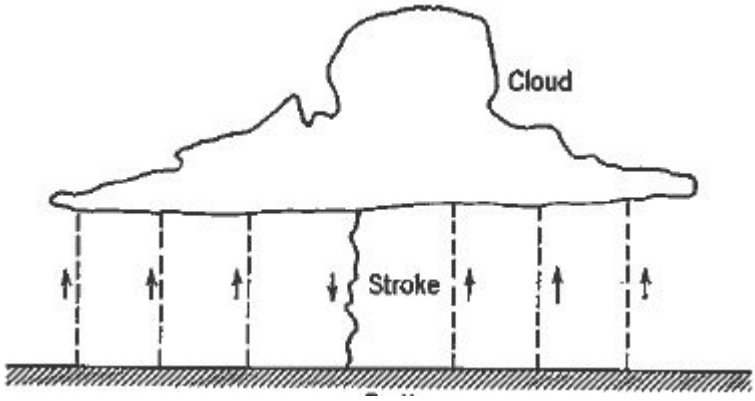


Figura 3.2 - Circuito eléctrico formado durante a descarga.

Existe, no entanto, outro mecanismo através do qual a acumulação atmosférica de cargas pode afectar a rede eléctrica que não pela descarga directa para um dos seus elementos. Como foi referido, no solo e em objectos por baixo de nuvens carregadas, tais como linhas de transmissão, são induzidas cargas que se deslocam conforme a reorganização de cargas na nuvem. Estes deslocamentos representam correntes e diferenças de potencial momentâneas em relação ao solo. Tais deslocamentos são geralmente lentos, até ao momento que a nuvem descarrega para o solo. Nesse caso, as cargas que se acumularam nas linhas, já libertas do efeito do campo eléctrico, fluem em ambos os sentidos. Correntes assim formadas são relativamente mais pequenas mas, no entanto, apreciáveis.

3.2 - Sobretensões de Manobra

Um estado transitório inicia-se sempre que há uma variação repentina nas condições de operação. Isto acontece mais frequentemente durante acções de manobra. Diferentes condições da rede nos instantes anteriores à manobra dão lugar a fenómenos transitórios com diferentes características, no entanto a onda de choque associada a uma sobretensão de manobra raramente atinge a amplitude das que se verificam numa descarga atmosférica e a sua frequência corresponde a valores entre a frequência nominal de operação do transformador e a frequência das descargas atmosféricas [1]. O potencial destrutivo para os componentes do transformador de uma sobretensão de manobra é muito menor que o causado por descargas atmosféricas, pelo que este fenómeno não será considerado tão profundamente ao longo deste documento.

3.3 - Ensaio de Onda de Choque

O ensaio de onda de choque surgiu da necessidade de garantir a resistência do transformador a grande parte das sobretensões às quais estará exposto durante o seu período de operação. Inicialmente, pensava-se que ensaios a baixa frequência eram suficientes para demonstrar a resistência do dieléctrico dos transformadores. À medida que os fenómenos de descargas atmosféricas e sobretensões de manobra foram sendo melhor conhecidos, tornou-se aparente que a distribuição de potenciais nos enrolamentos do transformador sujeito a sobretensões de alta frequência poderia ser radicalmente diferente da resposta a sobretensões de baixa frequência [1].

A estandardização de níveis de ensaio de descargas atmosféricas relativamente às classes de tensão deu-se em 1937, em paralelo com a estandardização dos níveis de tensão das redes. O *AIEE-EEI NEMA Committe on Insulation Coordination* foi formado para estudar técnicas e dados laboratoriais e definir a resistência de isolamento para todas as classes de equipamentos, bem como os níveis de isolamento para os diferentes níveis de tensão [1].

Durante os anos 50, tornou-se claro que o ensaio de descarga atmosférica por si só não representava adequadamente todas as sobretensões transitórias a que um transformador estava sujeito. À medida que as tensões de transporte aumentavam, sobretensões transitórias, causadas por várias operações de manobra, tiveram que ser consideradas no desenho do transformador. Como resultado, uma forma de onda apropriada às manobras foi

definida e a tensão de pico da onda fixada em 83% da tensão de pico do ensaio de descarga atmosférica [1].

3.3.1 - Ensaio de descarga atmosférica

Os dados compilados pelo *AIEE-EEI NEMA Committe on Insulation Coordination* relativamente à ocorrência natural de descargas atmosféricas, em concordância com os estudos de vários investigadores [7; 8], permitiram concluir que anomalias no sistema devido a descargas podem ser representadas por três tipos de onda – onda plena, onda cortada e frente de onda.

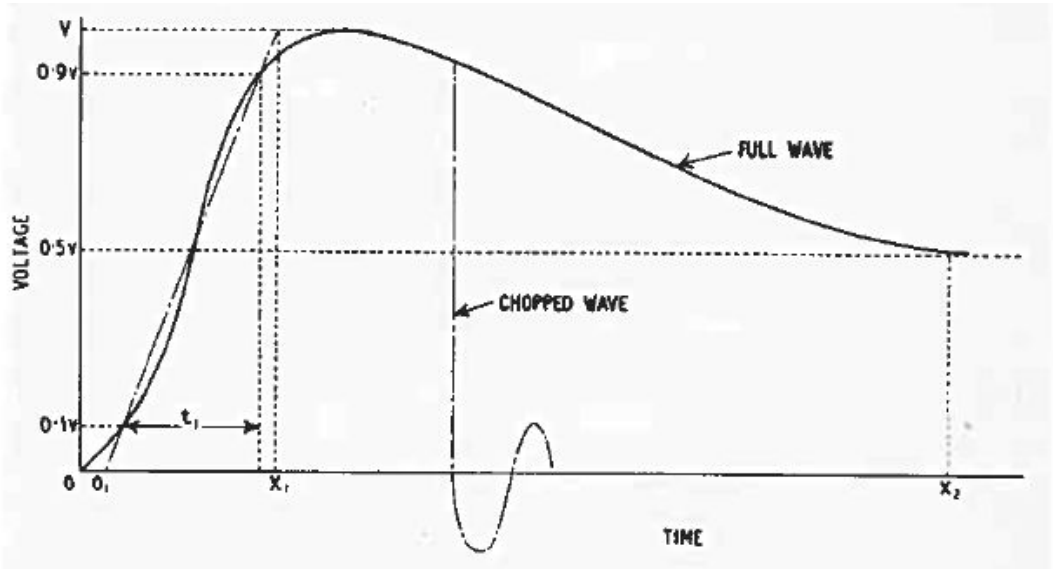


Figura 3.3 - Formas de onda plena e onda cortada. **[4]**

Se a descarga percorrer alguma distância pela linha antes de atingir o transformador, a forma de onda aproximar-se-á à da onda plena mostrada na figura 3.3, do tipo dupla exponencial $v = V\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right)$. A norma [1] define que o tempo de subida até ao pico de onda seja de 1,2 μs e que o tempo de descida até 50% da amplitude máxima seja de 50 μs.

A onda cortada simula um impulso que, após atingir o valor de pico, provoca a ruptura de um isolamento ou a actuação de uma protecção. As normas [10] e [11] definem o valor de pico da onda apropriado para o ensaio de cada transformador relativamente ao seu nível de tensão.

Se a descarga atmosférica atingir directamente os terminais de um transformador, a tensão poderá escalar muito rapidamente até uma diminuição brusca até zero pela ruptura de um isolamento. Esta situação é representada pela frente de onda.

GERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE

A criação de um impulso é conseguida pela descarga de um condensador, ou vários condensadores sequencialmente, para um circuito que dará forma à corrente. A onda assim gerada è aplicada ao transformador.

O gerador de impulsos mais utilizado consiste num certo número de condensadores inicialmente carregados em paralelo e descarregados em serie através de explosores. A figura 3.4 mostra o circuito de um destes geradores. O condensador C é carregado com corrente

contínua e descarregado por uma esfera de descarga. Uma resistência R_C limita a corrente de carga enquanto as resistências R_t e R_f controlam a forma de onda do impulso produzido. A tensão de saída pode ser elevada em relação à tensão de corrente contínua adicionando mais níveis ao gerador. Quando a tensão do primeiro nível atinge o valor V, G1 descarrega e a tensão V é momentaneamente aplicada a um terminal do condensador do nível seguinte. O outro terminal é imediatamente elevado à tensão 2V e o segundo explosor dispara. Este processo é repetido até que se obtenha o nível de tensão desejado.

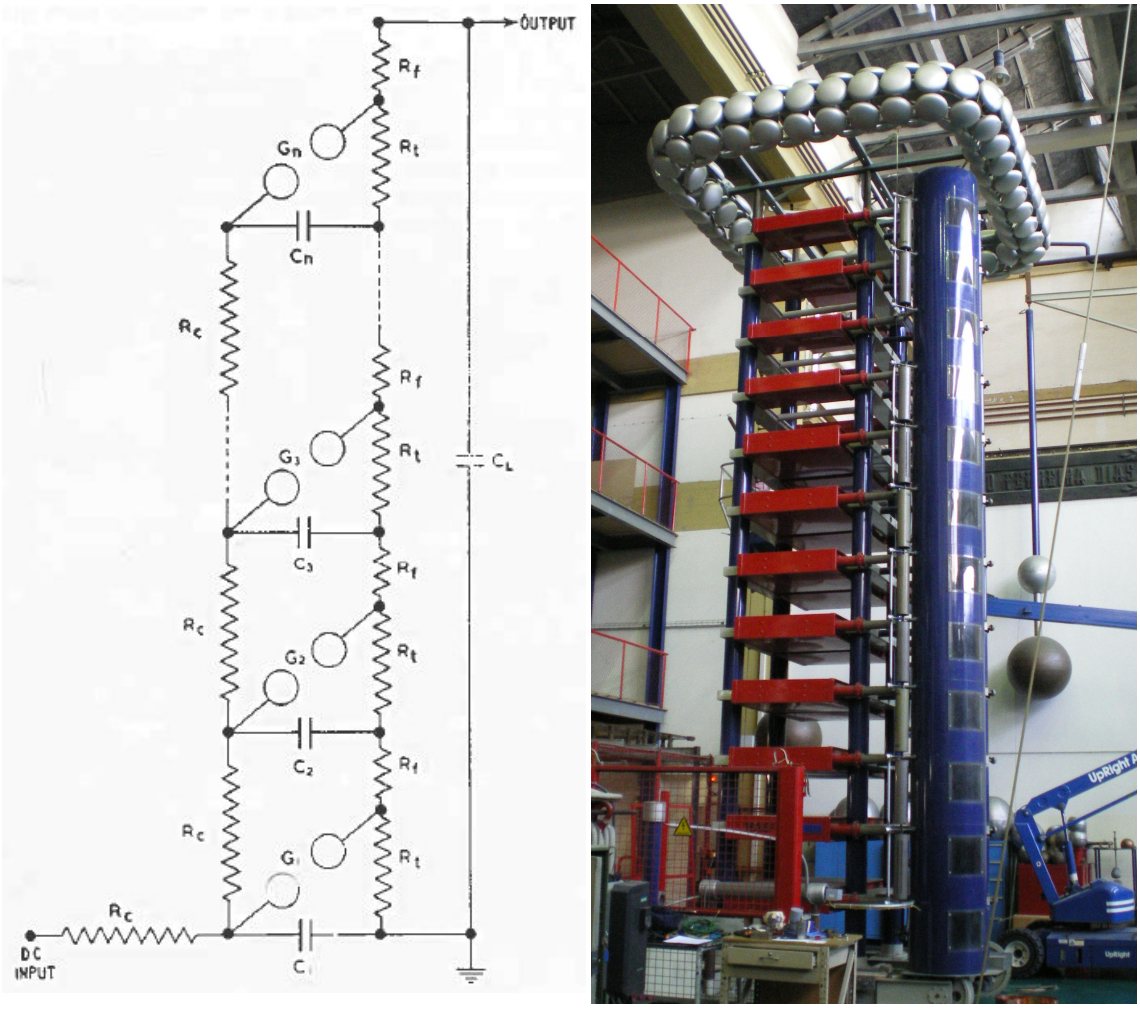


Figura 3. 4 - Gerador de impulso e respectivo esquema eléctrico simplificado **[4]**.

CONDIÇÕES DE ENSAIO E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Os terminais das linhas aos quais não será aplicado o escalão de tensão poderão ser ligados directamente à massa ou através de resistências cujo valor não ultrapasse valores pré-definidos para cada nível de tensão. Os terminais de neutro são directamente ligados à massa, com excepção de enrolamentos de baixa impedância. Neste caso, para garantir uma duração aceitável da cauda da onda, pode-se ligar uma resistência não superior a 500Ω ao terminal ligado à massa, ou intercalar um circuito indutivo/resistivo entre o gerador de impulso e o terminal de entrada do enrolamento.

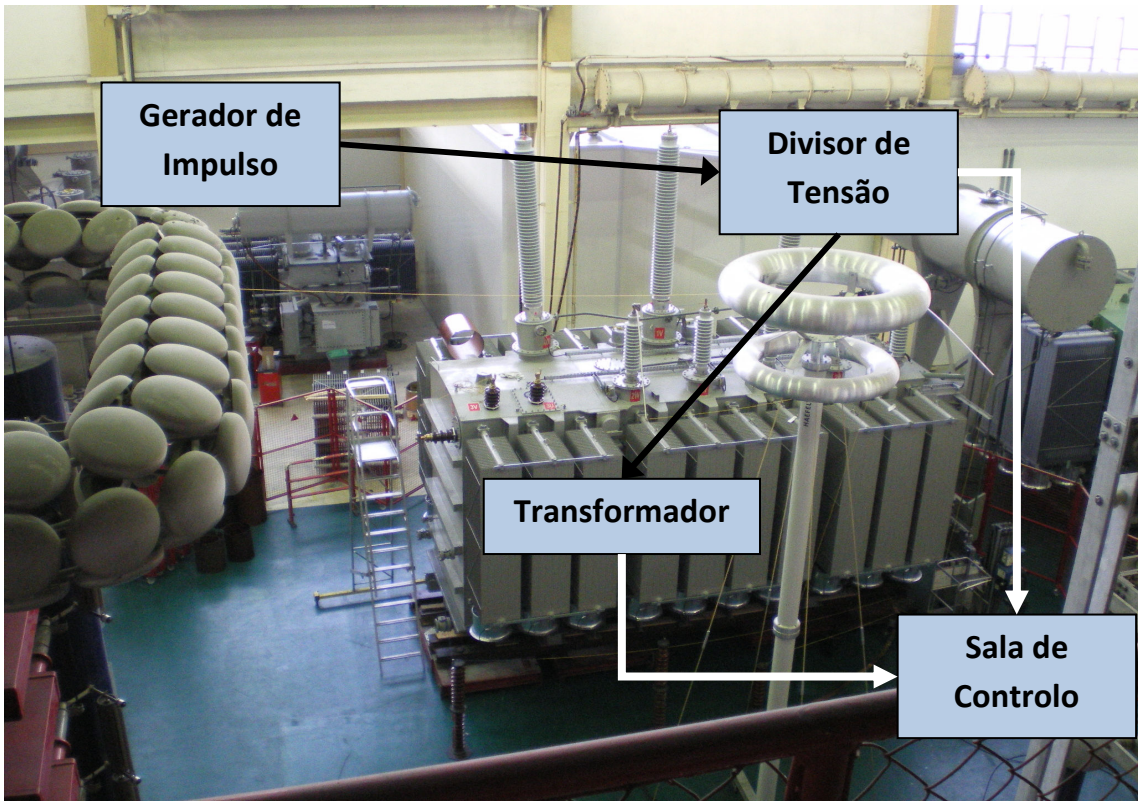


Figura 3.5 - Transformador em ensaio. Esquema de ligação.

A forma de onda do escalão de tensão é medida com um osciloscópio ligado a um divisor de tensão entre o gerador e o terminal. Um outro osciloscópio, ligado a um transformador de corrente conectado entre o terminal oposto do enrolamento "chocado" e a massa, mede a forma de onda da corrente de impulso.

Com todas as ligações efectuadas, o ensaio começa pela aplicação de um impulso de calibração com 50% a 70% da tensão máxima especificada. As formas de onda da tensão e corrente obtidas são registadas e posteriormente comparadas com as de uma onda com 100% de tensão. O sucesso do ensaio é ditado pela sobreposição de ambos os oscilogramas, salvo a diferença de magnitude. A detecção de uma falha no isolamento parte do pressuposto que uma descarga provocará uma variação da impedância do enrolamento, conduzindo a uma modificação na corrente que flui através do enrolamento ou na tensão entre os seus terminais, facilmente detectada por comparação de oscilogramas.

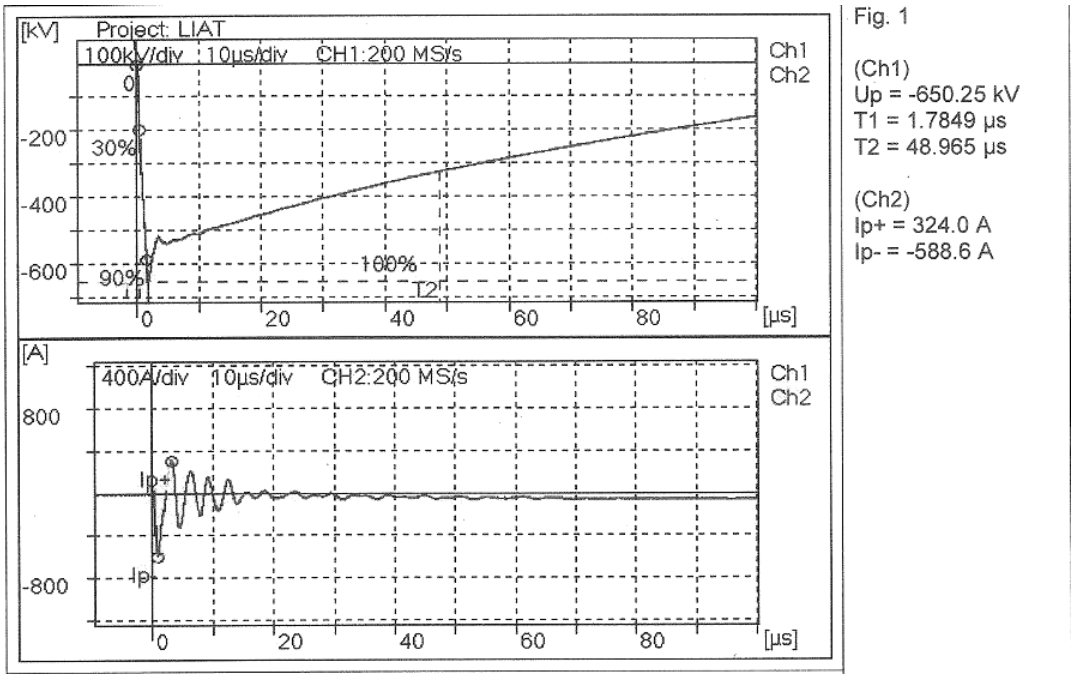


Figura 3.6 - Formas de onde de tensão e corrente de uma transformador de 400 MVA para um impulso de calibração a 50%.

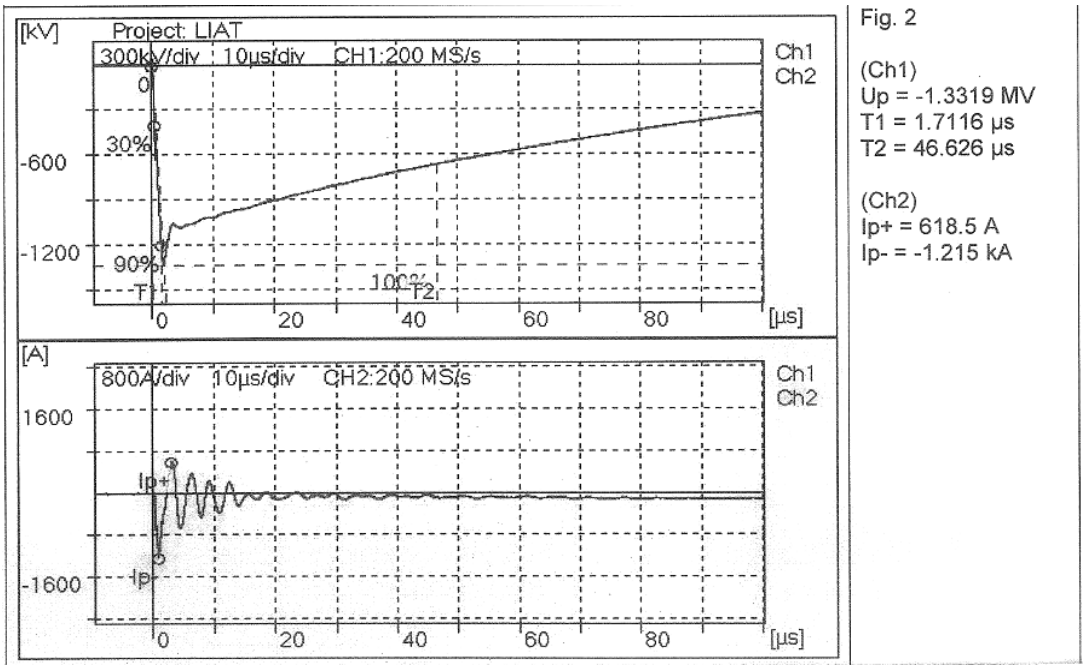


Figura 3.7 - Formas de onde de tensão e corrente de uma transformador de 400 MVA para um impulso a 100%.

As figuras 3.6 e 3.7 referem-se ao ensaio de um transformador de 400 MVA. Note-se que não existe diferença discernível das formas de onda para a tensão e a corrente entre a descarga de tensão reduzida e a descarga a 100%, indicando a resposta adequada do transformador.

3.4 – Solicitações no Transformador

Além da resistência e indutância consideradas em regime permanente sinusoidal, um enrolamento de transformador tem associadas capacidades distribuídas entre espiras e galetes – C_s – e entre espiras e massas do transformador ligadas à terra – C_p [2]. Às frequências normais de operação, o efeito destas capacidades é desprezável já que, como se sabe, a reactância capacitiva varia inversamente com a frequência. Como resultado, um enrolamento a estas frequências consiste, basicamente, numa rede de indutâncias, já que as correntes capacitivas são desprezáveis face às indutivas.

Como se expôs ao longo deste capítulo, sobretensões de manobra e, especialmente, de descarga atmosférica são fenómenos de alta tensão e alta frequência. Nestas condições, as correntes capacitivas não só assumem uma maior importância, como são mesmo predominantes [4]. Isto significa que, quando exposto a uma onda de choque, a distribuição de potenciais ao longo do enrolamento nos instantes iniciais vai estar quase exclusivamente condicionada pelas características da sua rede de capacidades. Por exemplo, se a capacidade entre espiras for baixa na porção inicial do enrolamento relativamente à das espiras finais, obter-se-á uma elevada concentração de potencial nas espiras iniciais que pode resultar na descarga através do isolamento. O mesmo acontecerá se a capacidade à terra for elevada relativamente à capacidade entre espiras, já que a corrente à massa será igualmente elevada em relação à corrente entre espiras, provocando também um acentuado gradiente de potencial. Daqui se tiram conclusões sobre a problemática do dimensionamento da estrutura isolante. A solução mais óbvia para assegurar a protecção dos enrolamentos contra descargas entre espiras e entre galetes seria reforçar a respectiva camada isolante. Isso, no entanto, resultaria numa diminuição de C_s devido ao aumento das distâncias entre condutores, levando a uma distribuição ainda mais prejudicial de potenciais, além de problemas graves de aqecimento.

Não são apenas as capacidades, no entanto, que influenciam a distribuição de potenciais. À medida que a energia armazenada nas capacidades é descarregada através da indutância própria do enrolamento, tende-se para uma distribuição final uniforme da tensão quando o terminal do enrolamento está ligado à massa ou tensão constante quando está isolado. A transição da distribuição inicial para a final dá-se através de um fenómeno oscilatório amortecido. A existência de circuitos LC em série e paralelo, com diferentes constantes, ao longo do enrolamento, significa que existe uma ampla gama de frequências para as quais poderão surgir fenómenos de ressonância, resultando em importantes diferenças de potencial.

Considere-se ainda que uma onda que atinge um transformador pode originar significativas sobretensões ao atravessar pontos onde exista mudança das constantes do circuito, tais como tomadas isoladas, devido à subsequente reflexão e refracção da onda.

3.5 – Atenuação dos Efeitos de uma Onda de Choque

Como se referiu no ponto anterior, as principais sobretensões num enrolamento sujeito a uma onda de choque surgem no instante inicial de aplicação da onda e no período transitório entre esta distribuição de potenciais e a distribuição final uniforme. Então, se fosse possível obter uma distribuição uniforme no instante inicial, não existiria período transitório e a

tensão decresceria linearmente entre o terminal de entrada e o terminal de saída. Como a distribuição inicial será tão mais uniforme quanto maior C_s for relativamente C_p, é então correcto assumir que a melhor protecção de um transformador contra os efeitos de uma onda de choque será aproximar tanto quanto possível de zero a relação C_p/C_s. Observe-se na figura 3.8 a distribuição inicial de potenciais ao longo dos enrolamentos para diferentes valores de $\alpha = \sqrt{C_p/C_s}$. Na figura representa-se, também, como as oscilações entre a distribuição inicial e final resultam em tensões máximas de grande amplitude.

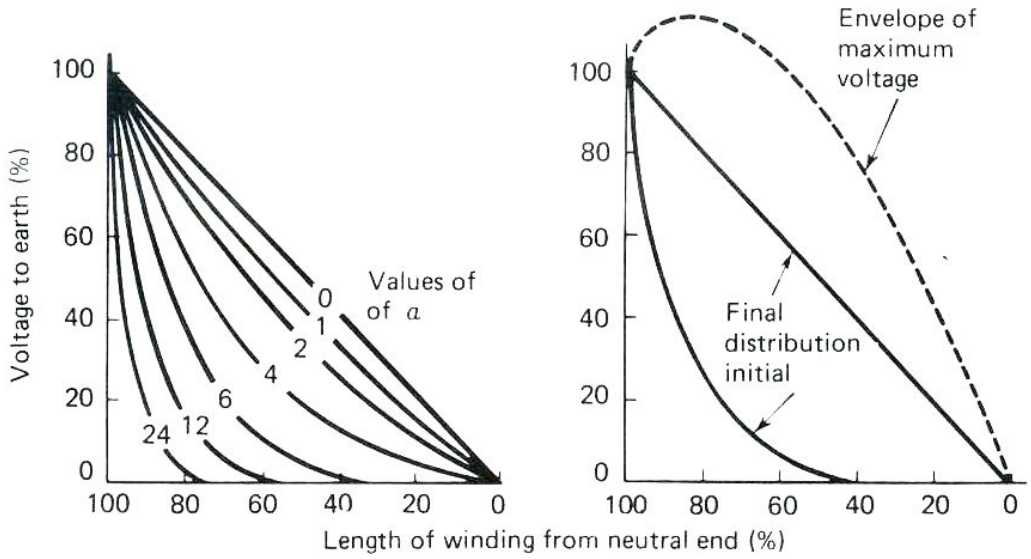


Figura 3.8 - Distribuição de potenciais no enrolamento. **[12]**

Uma solução passa pela utilização de anéis de guarda. Consistem em superfícies condutoras que são colocadas junto aos terminais dos enrolamentos, paralelamente às galetes, que criam superfícies equipotenciais que provocam um aumento da capacidade série, sobretudo nas espiras das galetes mais próximas. Os anéis não podem constituir circuitos eléctricos fechados para não permitir a formação de correntes induzidas, pela que a sua superfície condutora é constituída por fitas enroladas radialmente.

Também relativamente à distribuição de potenciais a adopção de enrolamentos em galetes é vantajosa. Consegue-se naturalmente um factor C_p/C_s baixo, pois a área comum entre espiras e galetes adjacentes è elevada e, por outro lado, entre espiras e as massas é bastante reduzida.

3.6 – Conclusão

Ao longo do capítulo anterior referiram-se as principais sobretensões que podem atingir um transformador, os esforços a que está sujeito e como se podem minimizar esses esforços. Concluiu-se que a variação dos potenciais ao longo de um enrolamento está relacionada com as suas características eléctricas, que condicionam a distribuição inicial de potenciais, a distribuição final e o período oscilatório entre ambas.

A problemática dos fenómenos transitórios de alta frequência é complexa. As descargas são altamente energéticas e provocam nos enrolamentos oscilações com harmónicos muito variados. Os ensaios referidos permitam validar a construção do transformador, mas podem

igualmente resultar na sua destruição total ou parcial, pelo que é crucial estimar, na fase de projecto, como os potenciais se vão desenvolver.

Embora os cálculos associados às distribuições inicial e final sejam mais simples, determinar a distribuição durante o período oscilatório envolve modelos bastantes complexos. Estes modelos e a determinação dos seus parâmetros serão o objecto de estudo no seguimento.

Capítulo 4

Programa *Impulse*

Originalmente criado em 1975 na linguagem de programação Fortran, o programa *Impulse* simula a resposta de um transformador do tipo Shell quando é aplicado um escalão de tensão a um dos seus terminais. A geometria, as características eléctricas e magnéticas do transformador são processadas com o objectivo de se determinarem os parâmetros de resistência, indutância e capacidade do circuito equivalente do transformador. Posteriormente, recorrendo ao método de Pade para resolução de equações diferenciais, são determinados os potenciais ao longo dos enrolamentos, para uma janela temporal definida pelo utilizador.

Neste capítulo, será feita uma descrição das capacidades de simulação do programa. Far-se-á uma análise do funcionamento do programa, no entanto, devido a restrições inerentes à confidencialidade do código fonte, serão omitidos alguns aspectos que não se consideram essenciais à sua compreensão. Nomeadamente, nas secções relativas ao cálculo dos parâmetros do circuito equivalente, são apresentadas soluções exemplificativas que correspondem ao resultado de pesquisa do autor e podem não coincidir com os métodos de cálculo empregues pelo programa.

O presente capítulo está segmentado em quatro partes, correspondentes às fases distintas da lógica de funcionamento do programa. A aquisição de dados (A), o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do transformador (B), o cálculo da distribuição de potenciais (C) e a apresentação dos resultados (D), como se ilustra na figura 4.1.

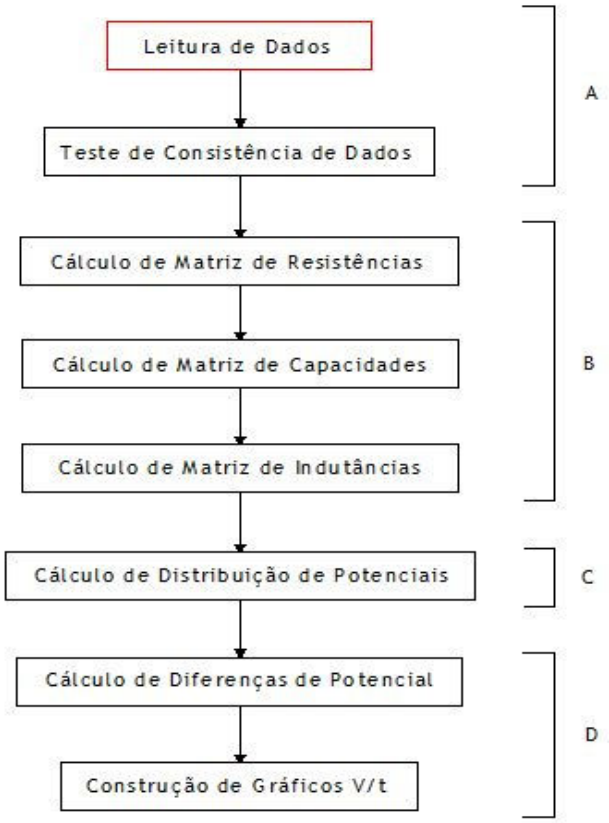


Figura 4.1 - Diagrama de Sequência do programa *Impulse*.

4.1- Aquisição de Dados

A caracterização eléctrica do transformador exige, naturalmente, um conhecimento detalhado dos seus aspectos construtivos pelo que a lista de dados que devem ser especificados é considerável. Aquando da concepção do programa *Impulse*, o conceito de interfaces gráficas de utilizador não estava vulgarizado pelo que a introdução de dados era feita através de linha de comandos, de forma sequencial. Em programas que necessitavam de uma lista extensa de dados, este processo era moroso e potencialmente frustrante caso o utilizador cometesse um erro, já que a impossibilidade de corrigir os valores inseridos significava o reinício do processo. Para evitar esta situação, programas como o *Impulse* eram fornecidos com *datasheets*. Estas permitiam que os dados fossem preparados em papel, na sua totalidade, com a formatação correcta e serviam de referência durante a introdução dos mesmos.

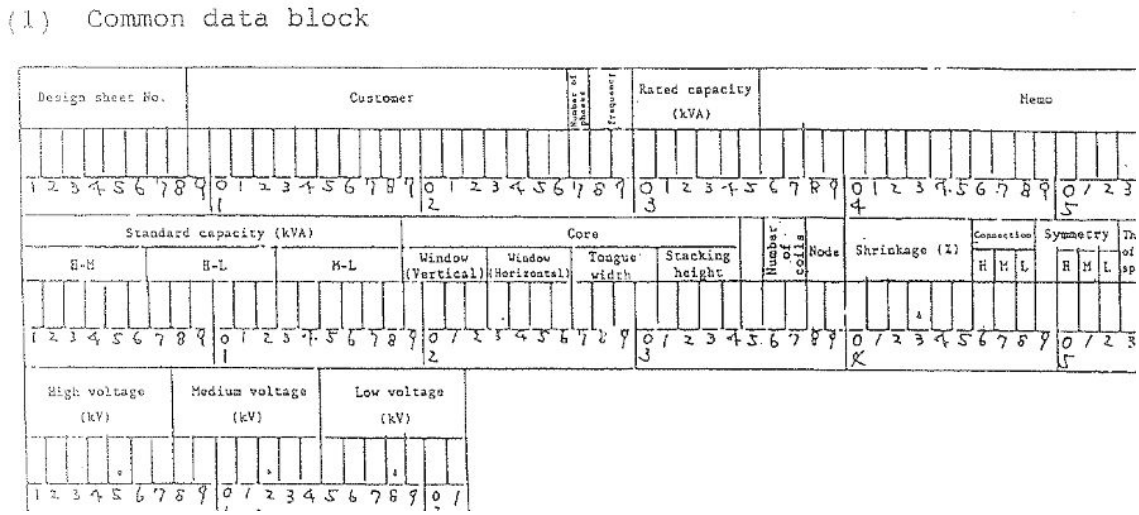


Figura 4.2 - *Datasheet* do programa *Impulse*.

Nos anos 90, o programa foi alterado de maneira a adquirir os dados directamente a partir de um ficheiro de texto que deve ser preenchido com uma formatação correspondente à indicada nas *datasheets* (figura 4.2). Recentemente, foi desenvolvida uma solução para tornar este processo mais eficiente. O utilizador preenche os campos de uma folha de cálculo e a formatação dos dados é assegurada por macros que completam automaticamente o ficheiro de texto de entrada.

A lista de dados necessários à execução do programa è extensa. Dados de identificação do transformador, propriedades magnéticas e eléctricas dos materiais, dimensões físicas do núcleo, das galetes e das camadas isolantes, ligações eléctricas entre galetes dos enrolamentos, componentes dos circuitos externos, parâmetros da onda aplicada, etc, todos devem ser inseridos manualmente num processo que, embora facilitado pelas macros que executam a formatação, é moroso e, em certos casos, pouco claro. Na figura 4.3 está representado um segmento de um destes ficheiros de entrada.

```
|  0000                    160225000          675MVA 352kV          1
225000225000     0 8201441 9411774 40      .
 192.50  22.00     .
   1         22.0                                    22.0
M  81266.302.001.250763 766 9952036 022.0022.03132100                3132
M  81266.302.001.250763 766 9952036 012.5012.532 0100                 032
M  81266.302.001.250763 766 9952036 012.5012.535 0100                 035
M  81266.302.001.250763 766 9952036 012.5012.53435100                3435
H 15 356.302.001.480728 73110432084T    .   44. 2223125              2223
H 15 356.302.001.480728 73110432084T 44.     .   022125               022
H 31 356.302.001.480728 73110432084 010.0020.521 0125                 021
H 30 356.302.001.480715 71810432084 020.5010.02021125                2021
H 30 356.302.501.480702 70510692110 010.0020.51920125                2019
H 29 356.302.501.480689 69210692110 020.5010.01819125                1819
H 30 356.002.801.480676 67910952136 010.0023.51718150                1817
H 29 356.002.801.480663 66610952136 023.5010.01617150                1617
H 26 356.302.501.480650 65311212162 010.0020.51516150                1615
H 26 356.302.501.480637 64011212162 020.5010.01415150                1415
H 25 356.702.001.480622 62711472188 010.0020.51314175                1413
H 24 356.702.001.480606 61411472188 020.5010.0 113175                 113
M  81266.302.001.250763 766 9952036 148.0148.03031100                3130
M  81266.302.001.250763 766 9952036 012.5012.5 030100                 030
```

Figura 4.3 - Segmento de ficheiro de entrada.

Quando o programa é executado, a rotina de leitura percorre o ficheiro, linha a linha, e atribui às variáveis o valor especificado para cada campo. Como exemplificado na fig 4.4, a introdução de um valor errado pode ter a consequência de alterar os valores das variáveis subsequentes. Se os valores forem considerados válidos pelo programa, o resultado do cálculo ficará deturpado, sem que o utilizador se aperceba.

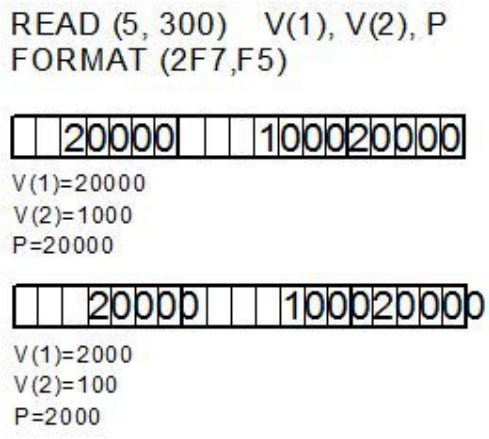


Figura 4.4 - Forma de leitura dos dados da *datasheet*.

A construção do circuito equivalente dos enrolamentos requer, naturalmente, informação relativa às ligações eléctricas entre as galetes bem como a da geometria das fases. No panorama actual, um programa de simulação desta natureza far-se-ia acompanhar por um interface gráfico que permitisse desenhar esta mesma geometria de uma maneira intuitiva, com as ferramentas de desenho condicionadas à própria lógica do programa. Um interface por linha de comandos elimina, naturalmente, esta opção, pelo que a informação geométrica deve ser inserida segundo uma lógica que o utilizador deve ter presente.

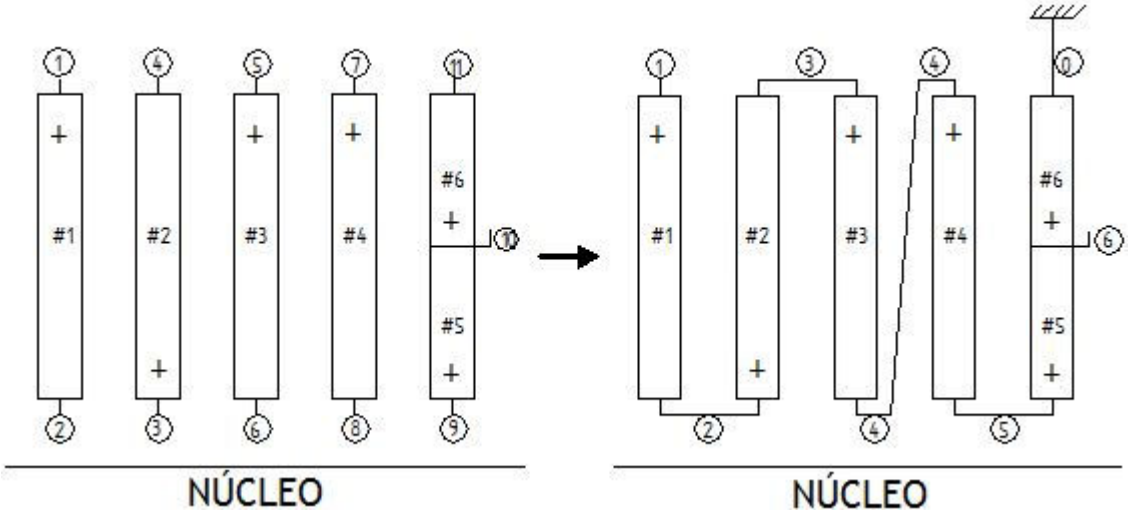


Figura 4.5 - Lógica de numeração do *Impulse* para a descrição de ligações.

4.1.1 - Lógica De Numeração Dos Nós

Como se observa na figura 4.5, as galetes são numeradas sequencialmente da esquerda para a direita, sendo atribuído a cada galete um nó em cada uma das suas extremidades. A ligação eléctrica das galetes é especificada pela atribuição de um nó comum às pontas que estejam conectadas. Pontas ligadas à massa ficam com o algarismo 0, pontas às quais vai ser aplicada a descarga eléctrica atribui-se o número 1.

A numeração dos nós é feita atendendo a dois aspectos. Os campos (+, -) especificam o sentido de bobinagem das espiras, consequentemente, o sentido do potenciais crescentes, necessária para o cálculo das indutâncias mútuas, e os campos (Exterior, Interior) indicam os nós que ocupam, respectivamente, a periferia exterior e interior da galete. Na galete 1, por

exemplo, esta bobinada de maneira a ter potenciais decrescentes do nó 1 para o nó 2, com o nó 1 a ocupar a posição externa.

Tabela 4.1 - Numeração das galetes.

Galete	+	-	Exterior	Interior
#1	1	2	1	2
#2	2	3	3	2
#3	3	4	3	4
#4	4	5	4	5
#5	5	6	6	5
#6	6	0	0	6

As galetes de regulação introduzem-se com a mesma lógica de numeração, no entanto considera-se que a galete é dividida em secções e cada secção é tratada como uma galete individual. O programa apenas suporta a divisão da galete de regulação até um máximo de três secções, pelo que apenas se podem atribuir nós a duas tomadas por galete, especificando o número de espiras entre cada um dos nós. Na figura 4.6 está exemplificado como a mesma galete de regulação pode ser considerada de duas maneiras distintas.



Figura 4.6 - Possíveis numerações de tomadas para a mesma galete.

4.2 - Modelo do Transformador e Cálculo dos seus Parâmetros

Para prever o desempenho de enrolamentos expostos a tensões transitórias de alta frequência, é necessário dispor de um modelo do transformador apropriado.

Wagner [13], propôs um modelo infinitesimal considerando as capacidades série e paralelo do enrolamento e indutância própria. O seu modelo, no entanto, só é aplicável a transformadores de enrolamentos homogéneos sob o efeito de um degrau de tensão. Visto que os enrolamentos de um transformador Shell são compostos por elementos discretos bem definidos, nomeadamente as galetes, e que, adicionalmente, as características diferem de elemento para elemento, a utilidade deste modelo é limitada.

Vários modelos finitos foram propostos ao longo dos anos, diferindo na divisão elementar dos enrolamentos e na importância atribuída às diferentes características do transformador. Em [14] e [15] são apresentados dois dos muitos modelos existentes baseados em medições, apenas aplicáveis a transformadores construídos e testados. Em [16], é proposto um modelo considerando indutâncias de fugas, o núcleo magnético, capacidade série e paralela e perdas por correntes de Foucault, com cálculo dos parâmetros do circuito baseados em nos métodos propostos em [17] e [18].

Considera-se que o modelo da figura 4.7, além do recorrentemente descrito nos modelos estudados, representa uma aproximação do utilizado pelo *Impulse*. Este, considera cada

enrolamento como a estrutura elementar do modelo, as pontas das galetes correspondendo a nós do circuíto. Assim,

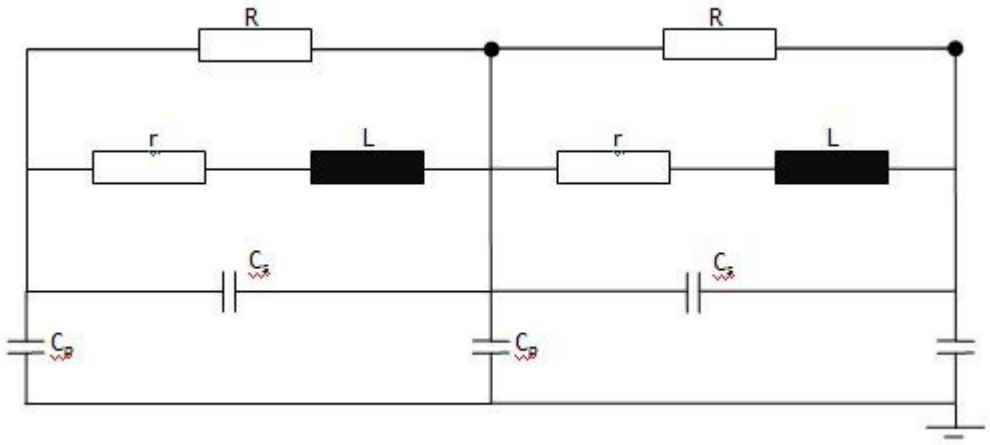


Figura 4. 7- Modelo finito de um enrolamento.

Na figura, *R* representa a resistência correspondente às perdas no ferro, *r* é a resistência do condutor da galete, *L* a indutância total da galete, C_s a capacidade série e C_p a capacidade à massa.

Para que se possa efectuar o cálculo dos parâmetros, o *Impulse* deve, primeiro, estabelecer a geometria dos enrolamentos com base nos dados de entrada.

4.2.1 - Definição da geometria dos enrolamentos

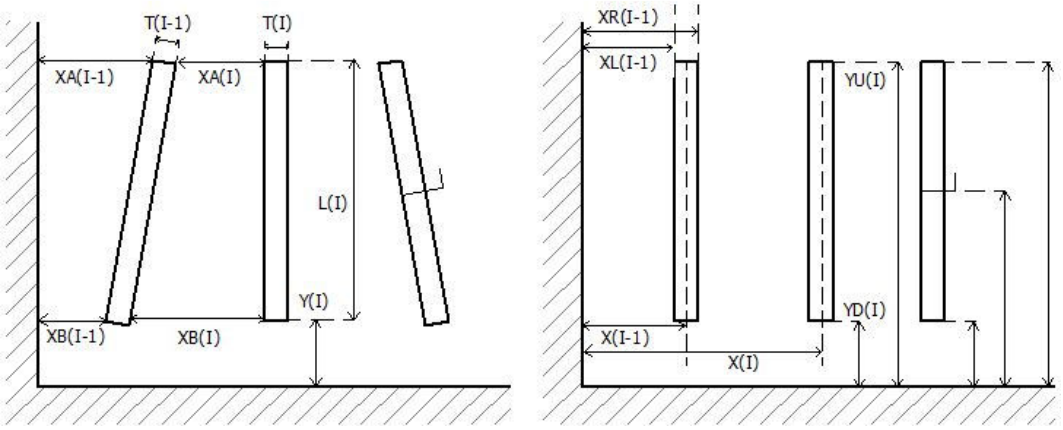


Figura 4.8 - Lógica do *Impulse* para a determinação da geometria dos enrolamentos.

A informação que é fornecida ao programa relativamente à distribuição espacial das galetes refere-se à largura do canal interior, XB, e exterior, XA, à esquerda da galete e o raio interno e externo. No sentido de facilitar o cálculo das constantes do circuito equivalente, é definido um sistema de coordenadas em relação ao qual são calculados todos os parâmetros.

Através das transformações,

$$\mathrm{XA(I)} = \mathrm{XA(I-1)} + \mathrm{XA(I)} + 0{,}5 \times \big(\mathrm{T(I-1)} + \mathrm{T(I)}\big), \tag{4.2}$$

$$\mathrm{XB(I)} = \mathrm{XB(I-1)} + \mathrm{XB(I)} + 0{,}5 \times \big(\mathrm{T(I-1)} + \mathrm{T(I)}\big), \tag{4.3}$$

obtém-se as coordenadas em x, externa e interna, do eixo axial de cada uma das galetes referidas à travessia do circuito magnético. O valor médio de XA e XB, X, é então calculado, e as variáveis XA e XB são eliminadas, considerando-se desprezável o efeito da inclinação das galetes no cálculo das constantes do circuito. As distâncias das superfícies esquerda e direita de cada galete são calculadas durante o ciclo,

$$\mathbf{XL(I) = X(I) - 0,5 \times T(I)}, \tag{4.4}$$

$$\mathbf{XR(I) = X(I) + 0,5 \times T(I)}, \tag{4.5}$$

O cálculo das coordenas das galetes fica completo com as operações YD=Y e YU=Y+L, ficando completamente especificados os limites de cada galete.

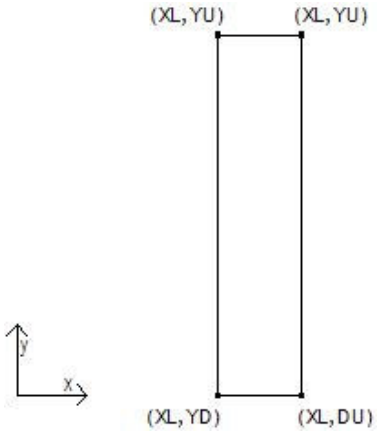


Figura 4.9 - Coordenadas das galetes.

Com a geometria assim definida, é possível executar todos os cálculos referentes à determinação dos parâmetros.

4.2.2 - Capacidades

A capacidade série num transformador Shell é constituída por duas partes, sendo a resultante da capacidade entre espiras e a capacidade entre galetes. A importância da caracterização das capacidades de um enrolamento já foi referida no capítulo 3, sendo, essencialmente, o factor determinante da distribuição inicial de potenciais.

A conhecida formula para determinar a capacidade entre duas superfícies condutoras pode ser adaptada ao cálculo da capacidade entre espiras de acordo com [13]. Admitindo que o raio é suficientemente grande para se considerarem as espiras cilíndricas, a seguinte fórmula é aplicável:

$$\mathbf{C_e = \varepsilon_t \varepsilon_0 \frac{D\pi(h + 2\delta_t)}{2\delta_t} \quad F}, \tag{4.6}$$

onde D é o diâmetro médio da galete, h a altura do condutor de cobre, δ_t a espessura do isolamento entre espiras e ε_t a sua permitividade e ε_0 a permissividade eléctrica do vazio. Note-se que à altura do condutor foi adicionada a espessura do isolamento, compensando pelo valor real da capacidade ligeiramente mais elevado devido às linhas de fuga do campo eléctrico entre as superfícies.

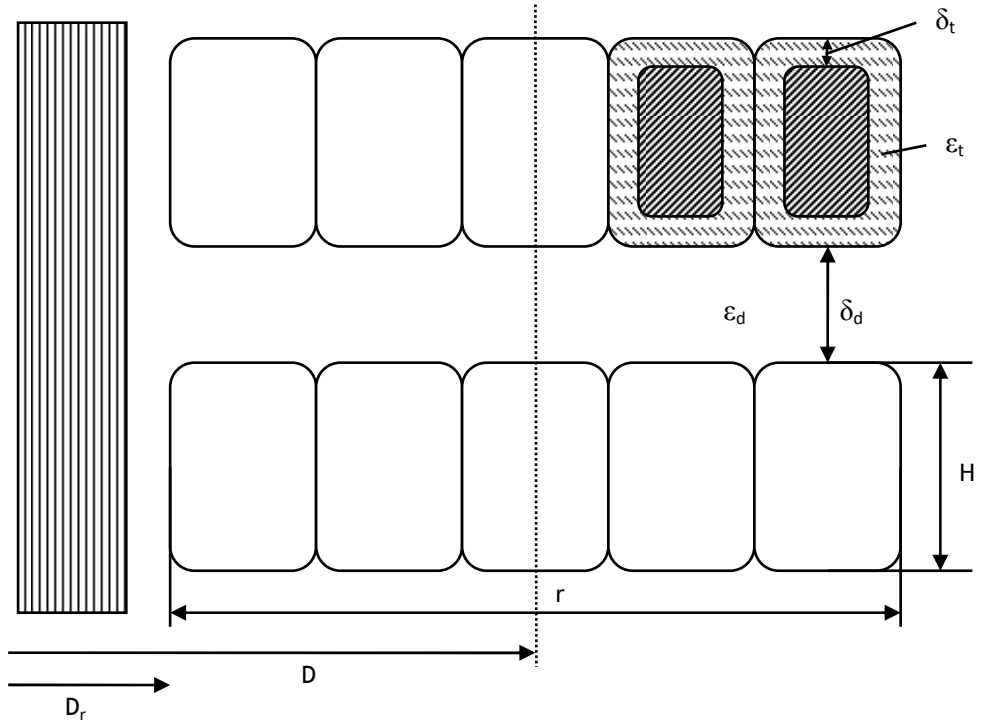


Figura 4.10 - Esquema de enrolamento para cálculo das capacidades.

Admitindo a aproximação de uma galete como uma superfície homogénea plana, a capacidade entre galetes pode ser calculada recorrendo à seguinte fórmula:

$$\mathbf{C_g = \frac{1}{3}\left[\varepsilon_0 D \pi \frac{r+\delta_d}{\frac{2\delta_t}{\varepsilon_t}+\frac{\delta_d}{\varepsilon_d}}\right]\ F}, \tag{4.7}$$

onde r é o comprimento radial da galete, δd a espessura do isolamento entre galetes e εd a respectiva permissividade.

O valor total da capacidade série, C_s, para uma galete com *n* espiras será então,

$$\mathbf{C_s = \left(\frac{C_e}{n}+\frac{4}{3}C_{dr}\right)\ F}, \tag{4.8}$$

Para o cálculo das capacidades paralelas, deve considerar-se o efeito capacitivo entre os enrolamentos e todos os componentes do transformador que estejam ligados à terra, isto é, paredes da cuba, núcleo, outros enrolamentos ou travessias. O método de cálculo é característico da geometria do próprio transformador, no entanto o principio utilizado no cálculo das capacidades série também é aplicável na dedução das fórmulas para as capacidades paralelas. A capacidade entre o enrolamento e o núcleo, por exemplo, corresponde á seguinte expressão:

$$\mathbf{C_p = \frac{27,8 D_r \times 1,1 H}{\frac{\delta_o}{\varepsilon_o}+\frac{\delta_r}{\varepsilon_r}} \times 10^{-12} F}, \tag{4.9}$$

em que H é a largura da galete, D_r a diâmetro médio do isolamento entre a galete e a massa.

4.2.3 - Indutância Própria e Mútua

A indutância pode ser determinada com menor exactidão do que a capacidade. Mesmo que se conhecesse a relação entre a indutância e a frequência do transformador, o cálculo considerando a dependência da frequência tornar-se-ia desnecessariamente complexo. Com base em comparações de valores medidos e calculados, o valor de indutância a ser considerado é 1/15 a 1/40 da indutância do transformador em vazio.

A indutância em vazio de grandes transformadores pode ser calculada, com boa aproximação, a partir da relação

$$\boldsymbol{L_{nl} = \mu_r \mu_0 \frac{A}{l_c} N^2 \quad H,} \tag{4.10}$$

onde μ_r é a permeabilidade do núcleo, μ_0 a permeabilidade do vácuo, A a secção do núcleo em m^2, e N o número de espiras do enrolamento. A descrição do método de cálculo da indutância mútua é complexo e está descrito em [13] e [19].

4.2.4 - Resistência

As oscilações de tensão num enrolamento são amortecidas pela resistência do enrolamento e pelas perdas no ferro. Este amortecimento é considerado no esquema equivalente do enrolamento colocando uma resistência em série com a indutância, representando a resistência dos condutores, e uma resistência em paralelo, representando as perdas no ferro.

A resistência paralela, R, pode ser conhecida a dividindo uniformemente pelo número de elementos as perdas no ferro, conhecidas pela multiplicação da massa total do circuito magnético pelas perdas por quilograma.

Segundo [19], a resistência dos condutores, por galete, é dada por

$$r_{cc} = \rho \frac{n l_m}{A_c} \quad \Omega,, \tag{4.11}$$

onde ρ é a resistividade do condutor, n o número de espiras, l_m o comprimento médio de cada espira e Ac a secção do condutor. Devido ao efeito pelicular, a resistência do enrolamento sujeito a fenómenos de alta frequência é, efectivamente, superior ao valor correspondente à resistência em corrente contínua. O valor da resistência em função da frequência é dado por:

$$r_{ca} = r_{cc}\left[\varphi(\xi) + \frac{z^2 - 1}{3}\psi(\xi)\right] \quad \Omega \tag{4.12}$$

onde,

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \tag{4.13}$$

$$\varphi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \tag{4.13}$$

$$\xi = h\sqrt{\left(\pi\mu_0 y f \frac{b}{a}\right)} \tag{4.14}$$

onde f é a frequência em Hertz, y é a condutância em $1/\Omega$, h a espessura do condutor e z o número de camadas.

4.4 - Cálculo dos Potenciais

O método de cálculo do Impulse foi determinado pela análise do código do programa e recorrendo a [20].

Se a corrente que entra no enrolamento através da indutância referente ao nó de aplicação do impulso i for I_{iL}, a corrente resistiva for I_{iR} e a corrente capacitiva for I_{iC}, estas podem ser expressas pelas seguintes expressões:

$$\begin{bmatrix} I_{1C} \\ \vdots \\ I_{iC} \\ \vdots \\ I_{nC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1i} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \\ C_{i1} & \cdots & C_{ii} & \cdots & C_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ C_{n1} & \cdots & C_{ni} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PV_1 \\ \vdots \\ PV_i \\ \vdots \\ PV_n \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

$$\begin{bmatrix} I_{1R} \\ \vdots \\ I_{iR} \\ \vdots \\ I_{nR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \\ G_{i1} & \cdots & G_{ii} & \cdots & G_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ G_{n1} & \cdots & G_{ni} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

$$\begin{bmatrix} I_{1L} \\ \vdots \\ I_{iL} \\ \vdots \\ I_{nL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \cdots & \Gamma_{1i} & \cdots & \Gamma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \\ \Gamma_{i1} & \cdots & \Gamma_{ii} & \cdots & \Gamma_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ \Gamma_{n1} & \cdots & \Gamma_{ni} & \cdots & \Gamma_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1/P \\ \vdots \\ V_i/P \\ \vdots \\ V_n/P \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

onde (C_{ij}) é a matriz de capacitância, (G_{ij}) a matriz de condutância e (Γ_{ij}) a matriz inversa de indutância, obtidas a partir dos parâmetros do circuito equivalente em 4.7.

De acordo coma lei de Kirchhoff, o total da soma das correntes em cada um dos nós, com excepção do nó i é igual a 0.

$$\begin{bmatrix} I_{1C} \\ \vdots \\ \\ \vdots \\ I_{nC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{1R} \\ \vdots \\ \\ \vdots \\ I_{nR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{1L} \\ \vdots \\ \\ \vdots \\ I_{nL} \end{bmatrix} = 0 \tag{4.18}$$

Isto é,

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1i} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \\ C_{i1} & \cdots & C_{ii} & \cdots & C_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ C_{n1} & \cdots & C_{ni} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PV_1 \\ \vdots \\ PV_i \\ \vdots \\ PV_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \\ G_{i1} & \cdots & G_{ii} & \cdots & G_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ G_{n1} & \cdots & G_{ni} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \cdots & \Gamma_{1i} & \cdots & \Gamma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \\ \Gamma_{i1} & \cdots & \Gamma_{ii} & \cdots & \Gamma_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ \Gamma_{n1} & \cdots & \Gamma_{ni} & \cdots & \Gamma_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1/P \\ \vdots \\ V_i/P \\ \vdots \\ V_n/P \end{bmatrix} = 0 \tag{4.19}$$

Derivando e equação 4.19 em função do tempo, e passando para a direita a tensão conhecida no nó i, obtém-se, finalmente:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^2V_1 \\ \vdots \\ P^2V_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & & \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PV_1 \\ \vdots \\ PV_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \cdots & \Gamma_{1n} \\ \vdots & & \\ \Gamma_{n1} & \cdots & \Gamma_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

$$= - \begin{bmatrix} C_{1i} \\ \vdots \\ C_{ni} \end{bmatrix} P^2V_i - \begin{bmatrix} G_{1i} \\ \vdots \\ G_{ni} \end{bmatrix} PV_i - \begin{bmatrix} \Gamma_{1i} \\ \vdots \\ \Gamma_{ni} \end{bmatrix} V_i \tag{4.20}$$

A equação (4.20) é a equação básica do circuito e a distribuição de potenciais pode ser determinada pela sua resolução.

4.3 - Apresentação de Resultados

A forma como são apresentados os resultados do cálculo depende das opções escolhidas pelo utilizador. Como dados de entrada, podem ser especificados pares de nós cuja tensão diferencial se pretenda conhecer ao longo do tempo de simulação. A evolução destes potenciais é registada para cada instante de cálculo, pelo que numa simulação com 40 nós, durante 100 μs e com um passo de 0,5 μs, obtém-se uma lista com ${}^{40}P_2 \times (100/0{,}5 + 1) = 156780$ valores. A análise de uma lista assim extensa de dados é, naturalmente, impraticável.

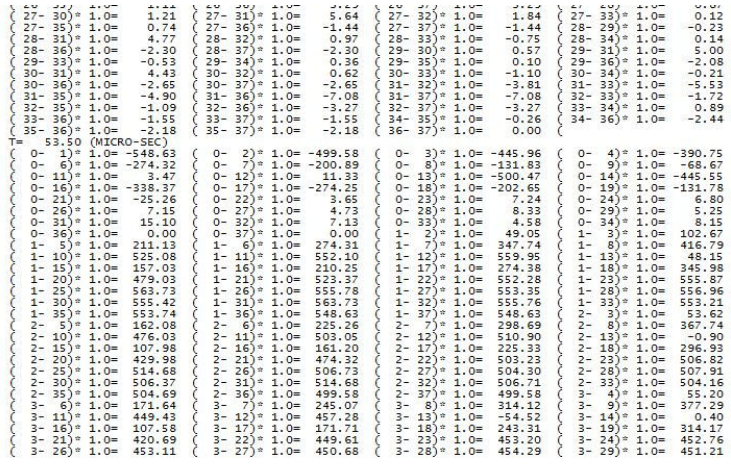


Figura 4.11 - Segmento de folha de resultados do programa *Impulse*.

Assim sendo, a análise de resultados recai, essencialmente, sobre o valor máximo da tensão que se desenvolve nos pares de nós ao longo do tempo de simulação, também apresentado como output do programa. Embora o conhecimento destes valores seja suficiente para validar a estrutura isolante do transformador, perde-se a capacidade de analisar o desenvolvimento dos potenciais nos enrolamentos ao longo do tempo.

O programa também oferece a possibilidade de apresentar gráficos com a evolução do potencial nos diferentes nós. Embora este método seja preferível para a análise individual de nós, não permite a sobreposição de gráficos e, assim, dificulta a análise da simulação no seu todo.

4.4 - Conclusão

No presente capítulo descreveu-se o funcionamento do programa *Impulse*. Embora oferecendo uma boa flexibilidade de modelização e capacidade de aproximação dos resultados reais comprovada empiricamente, a complexidade e morosidade associada à preparação dos dados afasta-se de tal forma da filosofia actual deste tipo de programas de simulação que a sua utilidade num meio empresarial fica claramente comprometida.

No próximo capítulo veremos como as principais dificuldades da utilização do programa podem ser ultrapassadas, recorrendo às possibilidades oferecidas pela informatização do processo de projecto dos transformadores na Efacec, procurando manter todas as funcionalidades associadas ao programa.

Capítulo 5

Pré-Processador

O programa *Impulse* tornou-se, ao longo do tempo, numa ferramenta indispensável no apoio ao projecto de transformadores Shell na Efacec. Os seus utilizadores ganharam uma confiança nos resultados confirmada pela boa aproximação à resposta de transformadores em situações reais de ensaio. No entanto, no panorama actual, bons resultados não são suficientes. Um programa deve ser de fácil e rápida utilização e com uma lógica de funcionamento acessível, qualidades claramente deficientes na actual implementação do *Impulse*. Essa foi, aliás, a motivação para o desenvolvimento de uma interface de entrada mais interessante e eficaz que as soluções presentemente disponíveis na Empresa tal como se descreve no capítulo anterior e se reafirmará no corrente capítulo. Esta interface, bem como todas as rotinas de aquisição de dados a ela associadas, constituem o pré-processador.

A criação de um Pré-processador para o *Impulse* apresenta fundamentalmente dois problemas. O primeiro, o estabelecimento de comunicação entre os actuais recursos informáticos da Efacec e o programa. O segundo, a criação de um interface com o utilizador que seja de fácil compreensão e minimize o tempo de utilização, sem comprometer nenhuma das actuais funcionalidades do programa.

Ao longo deste capítulo, expõe-se como foi feita a abordagem a estes problemas, começando pela descrição do sistema de desenvolvimento existente e como é estabelecida a ligação ao *Impulse*. Pela complexidade do problema, a descrição das rotinas responsáveis pela numeração dos nós será feita com especial pormenor.

5.1 - Enquadramento

A gradual informatização do processo produtivo dos transformadores na Efacec Transformadores iniciou-se na década de 70. Até então, os programas existentes de apoio ao cálculo estavam sujeitos à introdução manual de um grande volume de dados de entrada, um processo demorado e repetitivo, sujeito a erros de transcrição por parte do utilizador. A necessidade de optimizar este processo conduziu à criação do sistema de informação Wintree, cujo interface está representado na figura 5.1. Inserido transversalmente na actividade da

empresa, constituiu, eventualmente, um ambiente de trabalho integrando as actividades de cálculo, projecto, fabrico e qualidade.



Figura 5.1 - Ambiente de desenvolvimento Wintree.

O Wintree faz a comunicação com o sistema SQLServer 2005 que gere a base de dados onde é guardada toda a informação relativa a um determinado transformador. Todos os programas de cálculo integrados no Wintree podem ser executados a partir de qualquer terminal, com a mínima intervenção do utilizador no que diz respeito à introdução de dados e, assim, aumentando a rapidez e a fiabilidade do processo.

A actual implementação do *Impulse* representa uma ruptura deste *workflow*, como mostrado na figura 5.2. O levantamento dos dados do transformador é feito por consulta manual da base de dados e a sua preparação requer um profundo conhecimento da lógica de funcionamento do programa. Por se tratar de um processo iterativo, o desenho do transformador é sujeito a constantes revisões que obrigam a reconstrução da folha de dados de entrada.

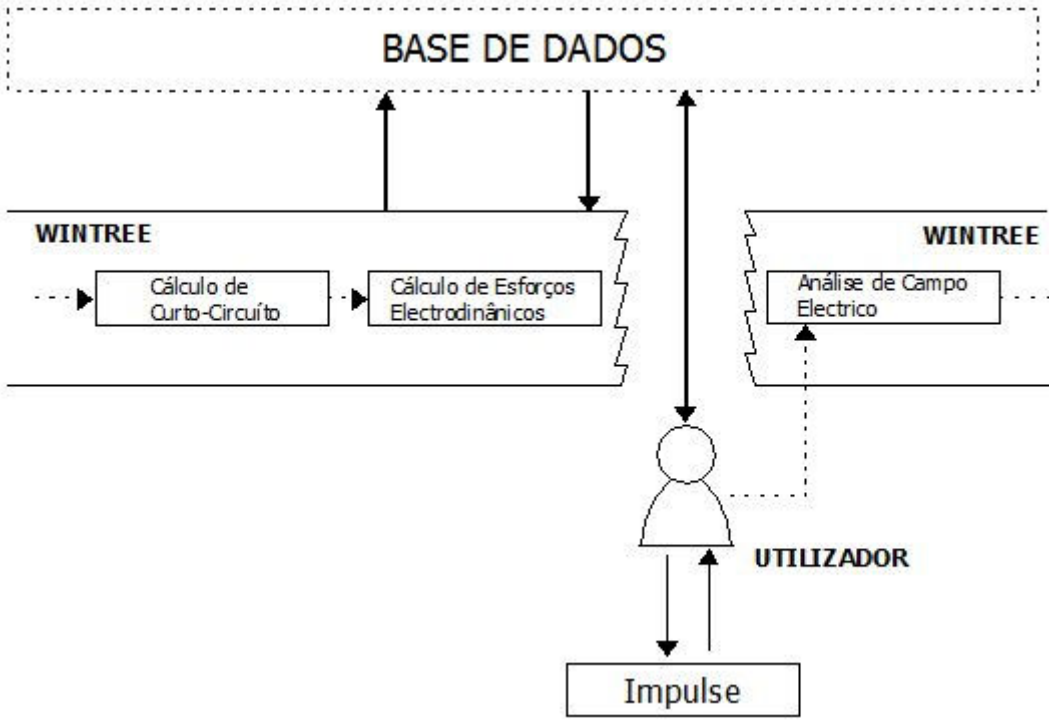


Figura 5.2 - Implementação actual do *Impulse*.

A inexistência de comunicação entre o Wintree e o *Impulse* obriga, adicionalmente, à introdução manual dos resultados da análise de distribuição de potenciais no programa de

análise de campo eléctrico existente no Wintree, com todas as desvantagens que estão associadas a este processo.

Prevê-se que a integração do *Impulse* no sistema de informação da Efacec permitirá uma gestão optimizada do processo, diminuindo o tempo de cálculo e evitando os problemas associados à transcrição de dados pelo utilizador.

A automatização do processo de aquisição de dados deve ser feita de tal modo a que não haja perda de funcionalidades do programa, mesmo as que não sejam presentemente exploradas. É também importante ter em mente que, embora ineficiente, a introdução manual de dados oferece ao utilizador uma flexibilidade na definição da estrutura do transformador que se deve procurar manter.

Na fase inicial de implementação, é especialmente importante que o utilizador tenha a possibilidade de verificar e arquivar os dados que foram fornecidos ao programa para garantir a congruência dos mesmos e a robustez da lógica das rotinas criadas no Wintree.

Tanto quanto possível, esta lógica deve assentar em rotinas já existentes no Wintree e aproveitar ao máximo a disponibilidade de informação do transformador na base de dados, minimizando a intervenção do utilizador na definição da sua estrutura. Quando solicitada a intervenção do utilizador, a sua maneira de actuar deve ser inequívoca, assentando numa lógica de fácil compreensão e rápida resposta.

5.2 - Comunicação Wintree/*Impulse*

O Wintree é escrito na linguagem de programação Pascal. A integração do *Impulse* neste sistema de informação deve começar pela definição da forma de comunicação dos dois programas entre si.

Como executável, o programa *Impulse* está sujeito à aquisição de dados através do ficheiro de texto que foi descrito no capítulo 5. Nesta forma, única comunicação possível entre os dois programas seria obrigando o Wintree a exportar os dados para esse mesmo ficheiro, que seria posteriormente lido pelo *Impulse*. A disponibilização do código fonte do programa *Impulse* abre outras alternativas que permitem uma integração mais fiável e robusta, nomeadamente a conversão do *Impulse* de executável para uma biblioteca dinâmica.

5.2.1 - *Impulse* como biblioteca dinâmica

Uma DLL (Dynamic Link Library) é um componente de software ao qual um programa faz a ligação durante a execução. Suponha-se a DLL "mat.dll" que contém a função "solver". Se se escrever um programa que utiliza a função "solver" e se fizer a ligação dinâmica para "mat.dll", o programa não irá conter o código da função, conterá antes a instrução de chamada para o endereço de "solver" dentro de "mat.dll". Quando o programa é executado, "mat.dll" é carregado da primeira vez que a função "solver" é chamada.

A vantagem da utilização de DLLs é a possibilidade de partilhar funções entre programas sem a duplicação de código. É apenas necessário garantir que a DLL existe no computador onde o programa vai ser executado. A DLL funciona, então, como uma biblioteca de um conjunto de funções que podem ser partilhadas por vários programas. A chamada de funções dentro de uma DLL pode ser feita com a passagem de argumentos, pelo que se torna possível transferir os dados directamente do Wintree para as respectivas variáveis dentro do programa *Impulse*.

A conversão do *Impulse* de executável para DLL é feita pela alteração das opções de compilação do compilador. O código contido no programa *Impulse* é declarado como uma função chamada Impulso. Obtém-se assim a biblioteca dinâmica "*Impulse*.dll" contendo a função "Impulso" que pode ser chamada directamente a partir do Wintree.

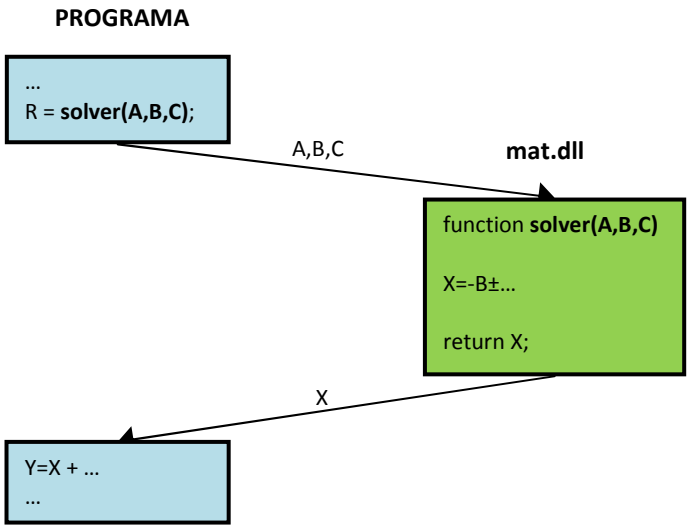


Figura 5.3 - Exemplo de sequência de chamada de DLL.

5.2.2- Passagem de Variáveis

A função Impulso necessita de uma grande quantidade de valores pelo que passá-los como argumentos da função Impulso seria um processo pouco prático, deficientemente estruturado e propenso a erros. Para melhor controlar o processo de transferência de variáveis, aproveitou-se o facto de uma DLL poder conter um número ilimitado de funções, para criar um método para transferir os dados de forma faseada.

Como referido no Capítulo 5.1, o programa *Impulse* é acompanhado de *datasheets* que descrevem os dados a inserir na folha de texto. Admitiu-se que cada linha destas *datasheets* corresponderia a uma subrotina e que os argumentos dessa subrotina seriam as variáveis indicadas nessa linha. Assim, como exemplificado na figura 5.4, as subrotinas Dados1, Dados2 e Dados3 enviam, respectivamente, os dados da primeira, da segunda e da terceira linha da *datasheet*.

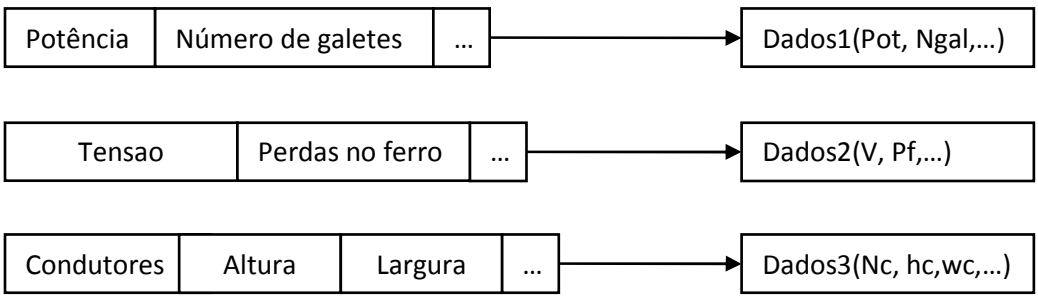


Figura 5.4 - Modo de envio dos dados.

Quando todas as subrotinas tiverem sido executadas, todos os dados necessários à execução da função Impulso estarão carregados nas respectivas variáveis. Obviamente, o código do Impulso deve ser reformulado para que as variáveis não sejam lidas a partir ficheiro de entrada original, nomeadamente pela eliminação das funções "*READ*" anteriormente existentes, que mantidas resultariam na substituição dos dados já carregados.

5.3 - Aquisição de Dados

Os dados podem ser divididos em dois grupos. Dados das características do transformador, extraídos directamente da base de dados, compreendem informações sobre a geometria e materiais do circuito magnético, número de fases, níveis de tensão, potência entre fases, número e características das galetes, anéis de guarda, etc. Dados de ensaio, definidos pelo utilizador, consistem em parâmetros como o tempo de simulação, forma de onda e tensão do escalão aplicado, passo de cálculo, conexões entre enrolamentos, ligações à massa, entre outros. Os dados das características do transformador, pelo seu carácter invariável, não estão sujeitos a alteração por parte do utilizador directamente no interface do *Impulse*. Os dados de ensaio, por outro lado, são específicos das condições de simulação e devem ser definidos pelo utilizador.

5.3.1 - Interface

A janela de interface criada para o *Impulse* está dividida por abas correspondentes aos diferentes tipos de dados que o utilizador deve especificar.

No menu "Cálculo", define-se o tipo de impulso aplicado: degrau, sinusóide, onda completa, frente de onda e onda cortada, bem como os respectivos parâmetros. Aqui o utilizador pode também definir o tempo de cálculo e o passo de integração. Os valores apresentados na figura são carregados por defeito, por serem os valores tipicamente utilizados.

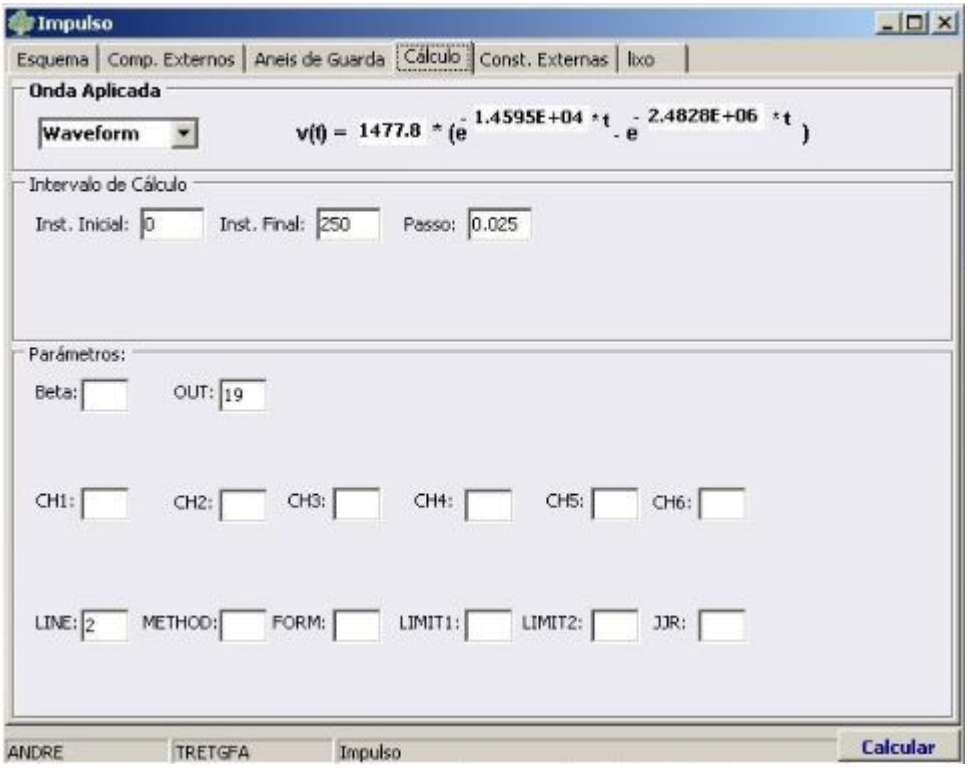


Figura 5.5 - Janela "Cálculo" do interface do Pré-Processador.

O menu "Componentes Externos" utiliza-se quando algum nó do transformador sujeito a testes está ligado através de um circuito externo a outro nó ou à massa, como é o caso da ligação do neutro à terra por meio de uma resistência em transformadores com baixa impedância.

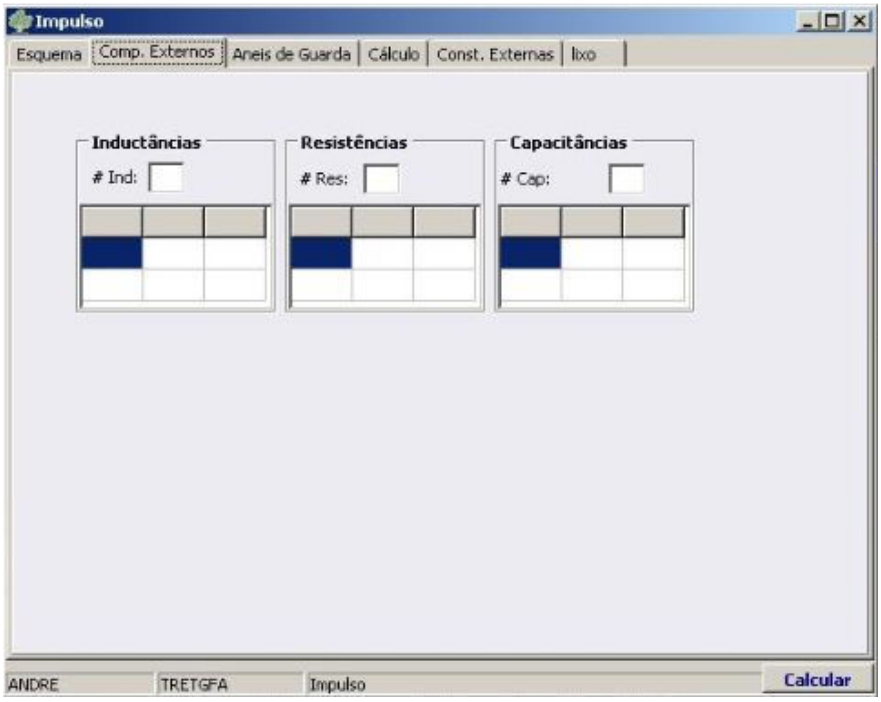


Figura 5.6 - Janela "Componentes Externos" do interface do Pré-Processador.

O menu da figura 5.5, "Anéis de Guarda", permite ao utilizador conferir os parâmetros dos anéis de guarda carregados da base de dados, bem como alterar o valor assumido por defeito das permitividades do isolamento.

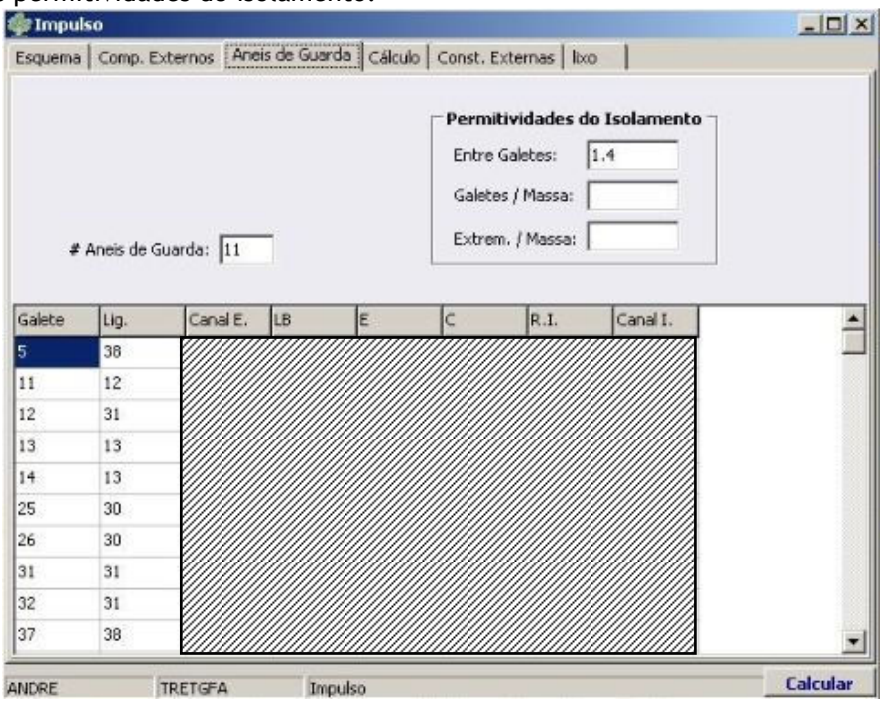


Figura 5.7 - Janela "Anéis de Guarda" do interface do Pré-Processador.

O menu "Esquema" apresenta a matriz de pontas das ligações que deve ser preenchida pelo utilizador em função da situação de ensaio do transformador. Esta matriz é essencial para a correcta numeração dos nós.

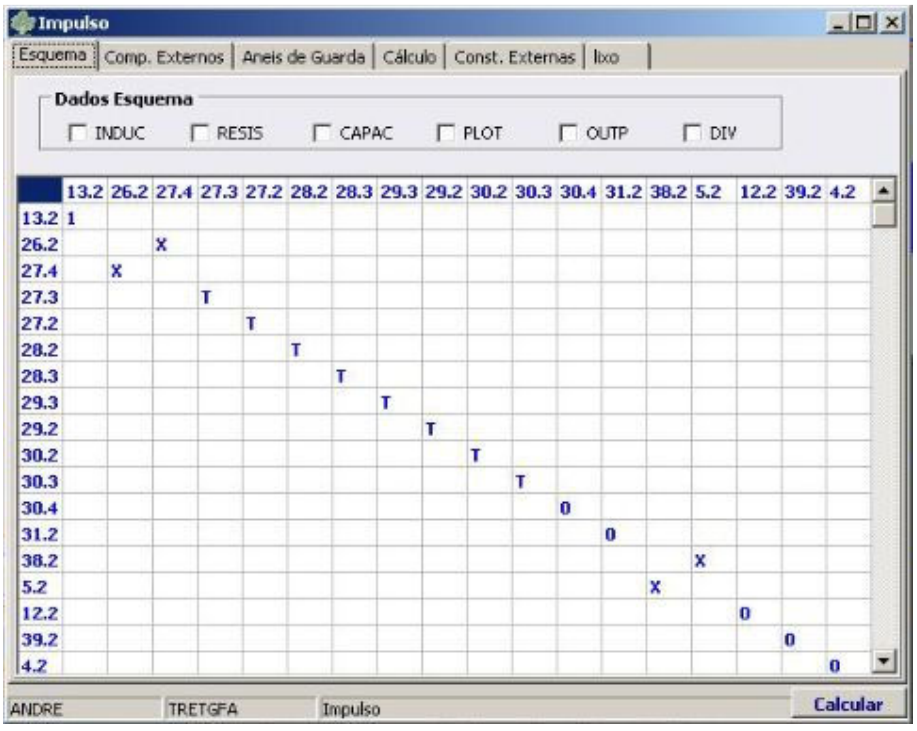


Figura 5.8 - Janela "Esquema" do interface do Pré-Processador.

5.4 - Numeração de Nós

O processo mais complexo da integração do *Impulse* no Wintree é a atribuição de nós às pontas das galetes. A numeração atribuída às pontas define como estão ligadas as galetes e os seus sentidos de bobinagem, as conexões entre enrolamentos e à massa, bem como o ponto de aplicação do escalão de tensão. Algumas destas condições variam de ensaio para ensaio, pelo que a numeração não pode ser feita sem a intervenção do utilizador. Um dos objectivos da integração do *Impulse* é a simplificação deste processo, escondendo a lógica complexa existente por detrás de uma de mais fácil compreensão.

O método desenvolvido utiliza a informação existente no Wintree, combinando-a com a fornecida pelo utilizador para automaticamente proceder à numeração.

5.4.1 - Esquematização da ligação no Wintree

Existem programas integrados no Wintree que fazem uso da informação das ligações dos enrolamentos. Para melhor compreender como a informação existente pode ser aplicada ao *Impulse*, vejamos como estas ligações são definidas.

Com a informação das galetes existente na base de dados, o Wintree desenha uma representação do corte na janela do transformador.

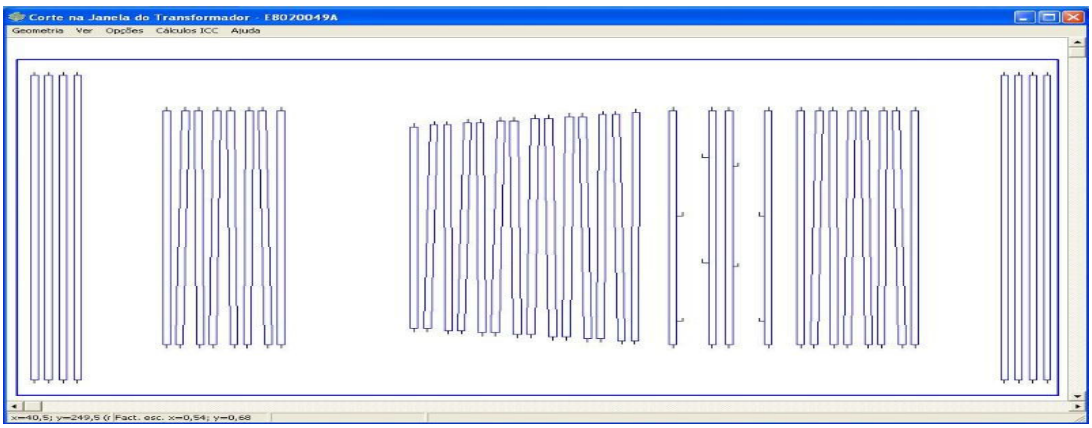


Figura 5.9 - Representação do corte na janela.

As galetes são apresentadas pela sua ordem de numeração da esquerda para a direita e as pontas numeradas sequencialmente do interior para o exterior, como mostrado na figura 5.8.

Existe uma multiplicidade de conexões possíveis entre as galetes, pelo que cabe ao utilizador definir ligações entre as pontas das galetes tais como estas existirão no transformador real e quais destas pontas estarão ligadas a bornes exteriores.

Considere-se o transformador com dois enrolamentos de quatro galetes das figuras 5.9 e 5.10. Um dos enrolamentos possui uma galete de regulação com quatro tomadas. As linhas a vermelho representam duas ligações reais entre galetes tal como definidas pelo utilizador. A ligação 2, neste caso, representa a regulação na tomada 5. Seria possível definir uma ligação para cada uma das diferentes posições de regulação, obtendo-se um total de cinco ligações diferentes para este transformador.

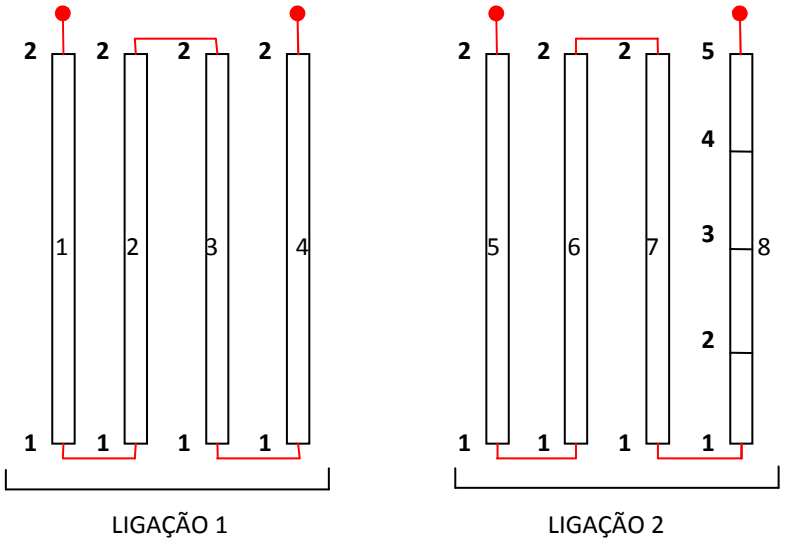


Figura 5. 10 - Corte na janela com ligações 1 e 2 representadas.

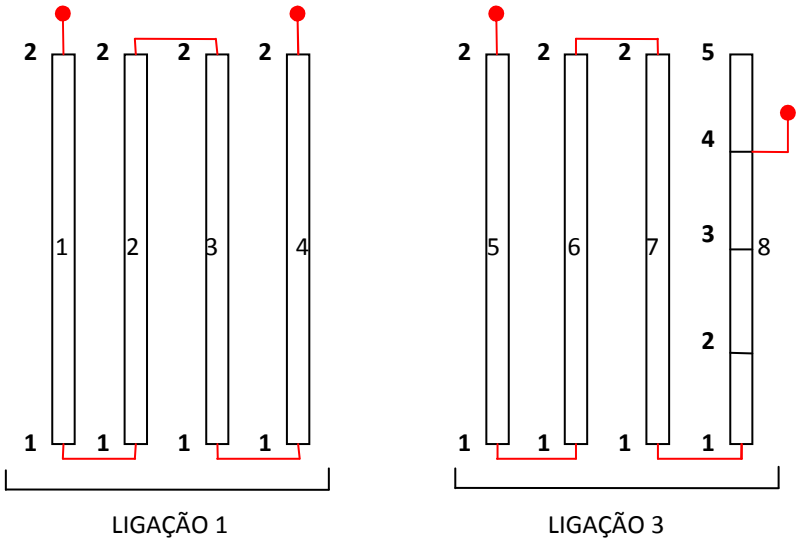


Figura 5.11 - Corte na janela com ligações 1 e 3 representadas.

Enquanto o utilizador desenha uma ligação, é criada em paralelo uma tabela que guarda numericamente a informação dessa ligação. Atente-se à tabela 5.1, referente à ligação 1. A ligação inicia-se na galete 1, ponta 0 (borne exterior), conectada à ponta 2 da galete 1. Esta, por sua vez, está conectada à ponta 1 da galete 2, através das 10 espiras que constituem a galete. Assim sucessivamente é especificada a sequência de pontas desde o inicio até ao fim de cada ligação.

Tabela 5.1 - Tabela da ligação 1.

LIGAÇÃO 1				
GALETE INICO	PONTA INICIO	GALETE FIM	PONTA FIM	ESPIRAS
0	0	1	2	10
1	1	2	1	10
2	2	3	2	10
3	1	4	1	10
4	2	0	0	0

Tabela 5.2 - Tabela da ligação 2.

LIGAÇÃO 2				
GALETE INICO	PONTA INICIO	GALETE FIM	PONTA FIM	ESPIRAS
0	0	5	2	10
5	1	6	1	10
6	2	7	2	10
7	1	8	1	10
8	5	0	0	0

As possíveis combinações de ligações definem regimes de funcionamento diferentes do transformador. Assim, a título de exemplo, a combinação das ligações 1 e 2 constitui um regime, as ligações 1 e 3 constituem um outro. Tanto as ligações como os regimes de cada transformador são guardados na base dados do Wintree. O pré-processador foi concebido e concretizado de modo a aproveitar esta informação existente.



Figura 5.12 - Janela de definição de regimes do Wintree.

O funcionamento do *Impulse* requer o conhecimento da estrutura completa dos enrolamentos. Assim, antes de correr o programa o utilizador deve especificar um regime "*Impulse*" que inclua as ligações completas, que no caso do transformador de exemplo são as ligações 1 e 2. Se se incluíssem as ligações 1 e 3, a ponta 5 da galete de regulação não seria considerada no cálculo.

O regime *Impulse* inclui todas as ligações do transformador. Não descreve, no entanto, conexões entre diferentes ligações, ou quais das pontas se encontram ligadas à massa ou a quais será aplicado o escalão de tensão. Cabe ao utilizador fornecer esta informação.

5.4.2 - Informação adicional de conexões

A informação existente no Wintree permite identificar as conexões entre as galetes que constituem um enrolamento. É necessário, no entanto, conhecer como estão ligados entre si os enrolamentos e quais deles estão ligados à terra durante a simulação. Estas condições, a

que chamaremos esquemas, variam de ensaio para ensaio, devendo por isso ser facilmente alteráveis.

A definição do esquema é feita através do preenchimento da matriz apresentada no menu "Esquema". Os índices das linhas e das colunas são as pontas das galetes que correspondem a pontas de enrolamentos, incluindo ligações às travessias e tomadas de regulação. Como estas não estão claramente identificadas na informação da base de dados, desenvolveu-se um algoritmo que, aplicado a todas as tabelas de ligações do regime, determina que pontas serão da matriz. Este algoritmo é aplicado a todas as ligações do regime seleccionado na altura de execução do programa.

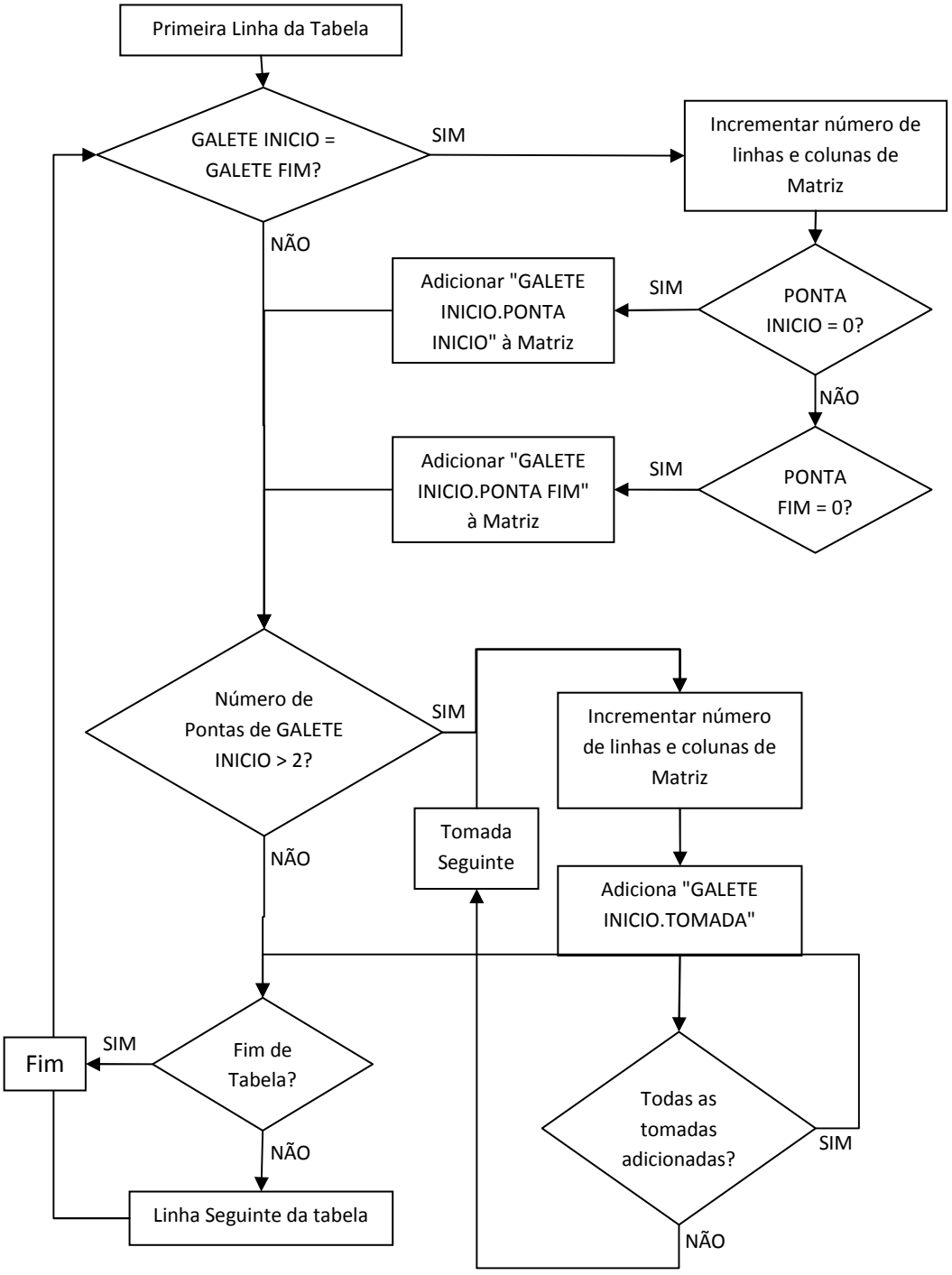


Figura 5.13 - Diagrama de sequência de construção da matriz de esquema.

Suponha-se novamente o exemplo da figura 5.9. Com o regime 1 seleccionado, a matriz obtida seria a da figura 4.12.

	1.2	4.2	5.2	8.2	8.3	8.4	8.5
1.2							
4.2							
5.2							
8.2							
8.3							
8.4							
8.5							

Figura 4.12 - Matriz de esquema obtida para o exemplo da figura 4.9.

O preenchimento da matriz é feito apenas com o rato do computador, clicando sobre as células. Clicando sucessivamente sobre uma célula da diagonal principal, define-se a ponta correspondente como estando ligada à massa ou como ponto de aplicação do escalão de tensão, representados, respectivamente, por um "0" e um "1". Deixada em branco, a célula traduz-se num circuito aberto na tomada correspondente.

Recorde-se que o *Impulse* não suporta a divisão de galetes de regulação em mais que três segmentos, isto é, não se podem atribuir nós a mais do que duas tomadas intermédias. Naturalmente, deve ser dada ao utilizador a possibilidade de escolher quais as tomadas a ser consideradas. Assim, no caso de a galete ser de regulação, há a possibilidade de atribuir a letra "T" na diagonal principal, significando que embora a tomada não esteja ligada à massa ou a outro enrolamento, se deseja conhecer o valor da tensão nesse ponto. Apenas um máximo de dois "T"s por galete é permitido.

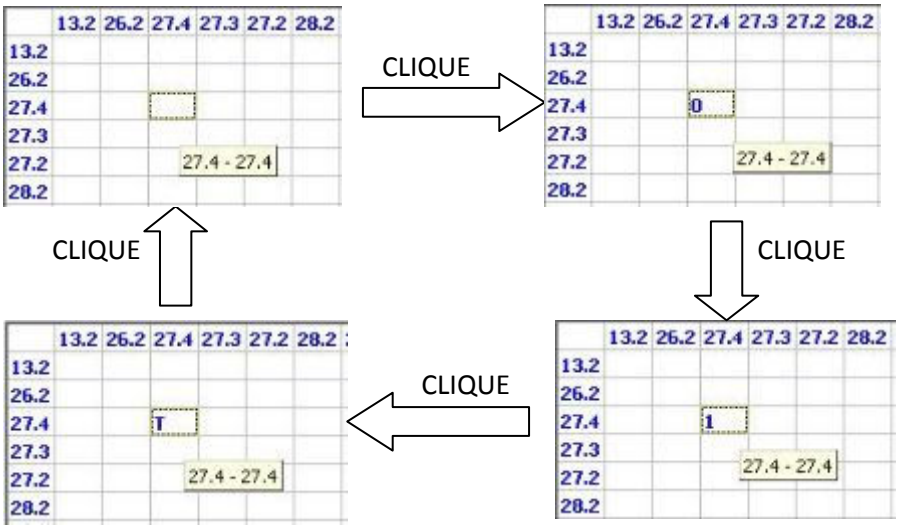


Figura 5.14 - Método de preenchimento de matriz esquema.

A indicação que duas pontas se encontram ligadas dá-se clicando na célula da matriz correspondente à intersecção das duas pontas, ficando esta marcada com um "X". Implementaram-se rotinas de maneira a garantir que a interpretação da matriz seja unívoca. Assim, se o utilizador clicar sobre uma posição no triângulo superior da matriz, a posição correspondente do triângulo inferior é automaticamente actualizada. Adicionalmente, se uma

de duas pontas que estão conectadas entre si for, por exemplo, ligada à massa, a outra é também automaticamente ligada. Desta forma é possível rapidamente definir o esquema de ligação evitando problemas de ambiguidade da interpretação da matriz.

Suponha-se que, para o transformador de exemplo, o utilizador tenciona definir o esquema representado em 5.14.

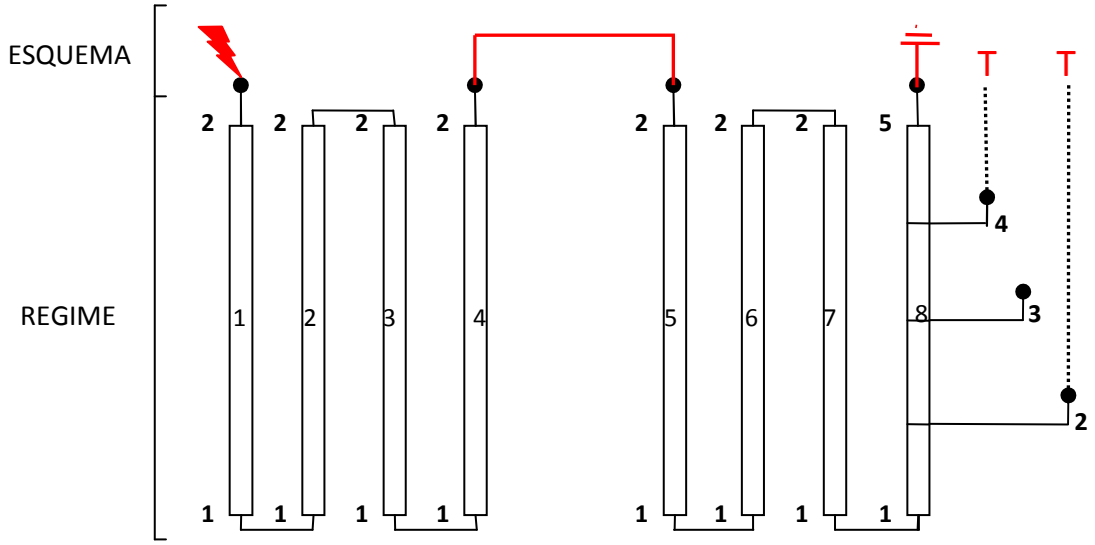


Figura 5.15 - Regime de funcionamento e esquema de conexões.

A matriz de esquema deveria ser preenchida da maneira descrita em X.

	1.2	4.2	5.2	8.2	8.3	8.4	8.5
1.2	1						
4.2			X				
5.2		X					
8.2				T			
8.3							
8.4						T	
8.5							0

Figura 5.16 - Matriz de esquema relativa à figura 5.14.

Consegue-se assim substituir o processo original de numeração dos nós, complexo e demorado, por um que oferece a mesma flexibilidade, acrescido de uma compreensão e execução bastante mais fácil. Em alguns minutos o utilizador preenche todos os dados de entrada apresentados em 5.2.1, cabendo ao pré-processador, agora com toda a informação carregada, traduzir esta informação para a lógica intrínseca ao *Impulse*.

5.4.3 - Lógica de Numeração do Pré-processador

A numeração dos nós é feita em três fases. A listagem das pontas das galetes, a pré-numeração e a numeração completa. Estas três fases respondem às perguntas: "Quantos nós existem a numerar?", "Que nós estão ligados entre si?", "Que nós estão à massa?", "A que nós se aplica o impulso?". Com estas perguntas respondidas pode proceder-se à numeração dos nós.

PRÉ-NUMERAÇÃO

Concluiu-se que, para determinar a numeração dos nós, seria necessário relacionar a seguinte informação, guardando-a no *array* "RefConexões".

Galete	Ponta	Esquema	Nó	Ligação

Esta informação existirá para cada ponta e tomada do transformador às quais se irá atribuir numeração do nó. Assim, deve ser feita a listagem das pontas que existem no transformador e das tomadas que serão consideradas. A listagem é feita com um algoritmo que percorre todas as ligações à procura de galetes e respectivas pontas. Quando é encontrada uma galete de regulação, é feita uma consulta à matriz de esquema para identificar as tomadas que devem ser consideradas e, portanto, adicionadas ao *array*.

Aplicando o algoritmo ao transformador de exemplo da figura 5.14, obtêm-se o *array* "RefConexões" com o seguinte conteúdo:

Tabela 5. 3 - Tabela obtida para o exemplo da figura 5.14.

GALETE	PONTA	ESQUEMA	NÓ	LIGAÇÃO
1	2	1	-1	1
1	1	-1	-1	1
2	1	-1	-1	1
2	2	-1	-1	1
3	2	-1	-1	1
3	1	-1	-1	1
4	1	-1	-1	1
4	2	2	-1	1
5	2	2	-1	2
5	1	-1	-1	2
6	1	-1	-1	2
6	2	-1	-1	2
7	2	-1	-1	2
7	1	-1	-1	2
8	1	-1	-1	2
8	2	-1	-1	2
8	4	-1	-1	2
8	5	0	-1	2

Note-se que a tomada 3 de regulação não faz parte do *array* pois não há nenhuma informação a ela referente na matriz de esquema da figura 5.15.

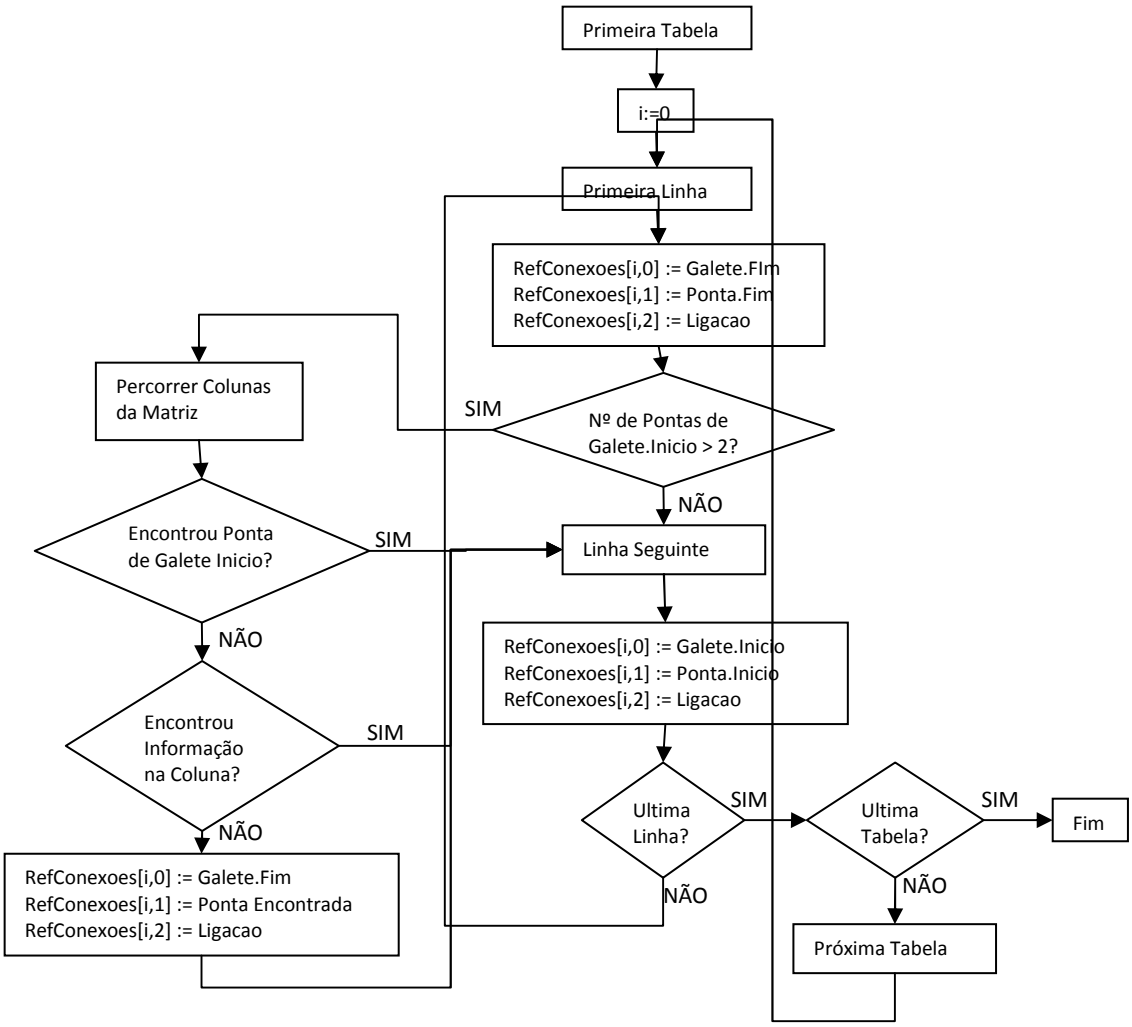


Figura 5.17 - Diagrama de sequência de construção de *array* "RefConexões".

O próximo passo consiste em determinar as pontas que estão ligadas à massa, aquelas a que será aplicado o escalão e as que estão ligadas entre si. Para tal, percorre-se novamente a matriz esquema, célula a célula. Quando uma célula da diagonal principal tem um "0" ou um "1", coloca-se, respectivamente, um 0 ou 1 na coluna "Esquema" da ponta correspondente no *array* RefConexões.

Quando é encontrado um "X", coloca-se em "esquema" uma notação que indica que as pontas correspondentes à linha e coluna dessa célula estão ligadas. Nesse caso, coloca-se em "Esquema" um número que relaciona todas as pontas dessa conexão.

No final deste processo, o *array* RefConexões do nosso transformador de exemplo contém a informação da tabela 5.4. Note-se que a tomada de regulação 3 da galete 8 não consta nesta matriz, pois não estava marcada com nenhuma informação na matriz de esquema de exemplo. No que ao resto do processo diz respeito, esta ponta deixou de existir.

Tabela 5.4 - Tabela obtida para o exemplo da figura 5.14.

GALETE	PONTA	ESQUEMA	NÓ	LIGAÇÃO
1	2	1	-1	1
1	1	-1	-1	1
2	1	-1	-1	1
2	2	-1	-1	1
3	2	-1	-1	1
3	1	-1	-1	1
4	1	-1	-1	1
4	2	2	-1	1
5	2	2	-1	2
5	1	-1	-1	2
6	1	-1	-1	2
6	2	-1	-1	2
7	2	-1	-1	2
7	1	-1	-1	2
8	1	-1	-1	2
8	2	-1	-1	2
8	4	-1	-1	2
8	5	0	-1	2

NUMERAÇÃO

A lógica de numeração do pré-processador assenta na relação entre os dados das diferentes colunas do *array* "RefConexões". Da maneira que foi preenchido, existe uma relação unívoca entre os dados existentes nessa coluna e o número que deve ser atribuído ao nó. O algoritmo foi escrito de maneira a respeitar a relação descrita na tabela 5.5.

Tabela 5. 5 - Relação entre os dados da matriz "RefConexões" e o respectivo tipo de ponta.

DADOS	TIPO DE PONTA	NUMERAÇÃO
"ESQUEMA" = **0**	Ponta à massa	"**NÓ**" = 0
"ESQUEMA" = **1**	Ponta de aplicação do impulso	"**NÓ**" = 1
"ESQUEMA" = **-1** "LIGAÇÃO" ≠ "LIGAÇÃO" **da linha anterior**	Ponta em circuito aberto	Novo "**NÓ**"
"ESQUEMA" ≠ **-1** "NÓ" = **-1**	Grupo de pontas conectadas não numeradas	Novo "**NÓ**", igual para todas as pontas
"ESQUEMA" ≠ **-1** "NÓ"≠ **-1**	Grupo de pontas conectadas já numeradas	Avançar
"ESQUEMA" = **-1** **Primeira Linha de RefConexões**	Ponta em circuito aberto	Novo "**NÓ**"
"ESQUEMA" = **-1** "GALETE" ≠ "GALETE" **da linha anterior** "LIGAÇÃO" = "LIGAÇÃO" **da linha anterior** **Linha de RefConexões ≠ Primeira**	Primeira ponta de galete	"**NÓ**" = "**NÓ**" da ponta anterior
"ESQUEMA" = **-1** "GALETE" = "GALETE" **da linha anterior** "LIGAÇÃO" = "LIGAÇÃO" **da linha anterior** **Linha de RefConexões ≠ Primeira**	Segunda ponta de galete ou tomada de regulação	Novo "**NÓ**"

O *array* "RefConexões" resultante para o transformador de exemplo seria o da tabela 5.6. Note-se que a numeração dos nós já se aproxima da lógica de numeração do *Impulse*, com pontas ligadas representadas por nós comuns. De facto, é possível com base na informação contida nesta tabela desenhar a representação das ligações como na figura 5.14.

Tabela 5.6 - Aspecto final da matriz "RefConexões".

GALETE	PONTA	ESQUEMA	NÓ	LIGAÇÃO
1	2	1	1	1
1	1	-1	2	1
2	1	-1	2	1
2	2	-1	3	1
3	2	-1	3	1
3	1	-1	4	1
4	1	-1	4	1
4	2	2	5	1
5	2	2	5	2
5	1	-1	6	2
6	1	-1	6	2
6	2	-1	7	2
7	2	-1	7	2
7	1	-1	8	2
8	1	-1	8	2
8	2	-1	9	2
8	4	-1	10	2
8	5	0	0	2

Como se indicou em 4.1.1, o programa *Impulse* necessita que se indique, para cada galete, o sentido de bobinagem (+,-) e a posição relativa dos nós (Exterior, Interior). A posição conhece-se pelo número da ponta, já que um número mais alto indica uma posição mais extrema. O sentido de bobinagem é uma informação existente na base de dados, pelo que é possível determinar directamente se em que sentido se dá a queda de tensão na galete.

Tabela 5.7 - Solução de numeração das pontas obtida para o exemplo da figura 5.14.

	Sentido	+	-	Exterior	Interior
1	+	1	2	1	2
2	-	2	3	3	2
3	+	3	4	3	4
4	-	4	5	5	4
5	+	5	6	5	6
6	-	6	7	7	6
7	+	7	8	7	8
8	-	8	9	9	8
9	-	9	10	10	9
10	-	10	0	0	10

5.4 - Conclusão

Ao longo do capítulo anterior abordou-se o problema do desenvolvimento do pré-processador para o *Impulse*. As modificações feitas ao código fonte do programa e a interface de utilizador criada permitiram definir uma lógica robusta de tradução das informações existentes da base de dados da Efacec para dados necessários ao funcionamento do Wintree, minimizando a intervenção do utilizador em processos complexos como a numeração dos nós ou a definição dos canais de isolamento. Com o pré-processador descrito conseguiu-se encurtar drasticamente o tempo de preparação de execução do programa, mantendo todas as funcionalidades anteriormente existentes. Procurou-se criar um *interface* intuitivo, utilizando termos familiares a colaboradores da Efacec. De facto, um utilizador que não esteja

familiarizado com o programa na sua forma anterior, pode em poucos minutos compreender as funcionalidades do programa e executar uma simulação. No Anexo A, estão descritos os passos para a simulação de um transformador de exemplo, sob a forma de um "Manual do Impulse" que se pretende que venha a ser incluído na documentação interna da Efacec. Embora uma análise comparativa rigorosa dos tempos de preparação dos dados não tenha sido efectuada, é da opinião do autor que a simplicidade dos passos descritos no manual atesta à rapidez com que uma simulação pode ser efectuada.

No capítulo seguinte, abordar-se-á a questão da apresentação dos resultados ao utilizador e de que maneira o envio directo dos resultados para o Wintree pode acelerar adicionalmente o projecto de um transformador Shell.

Capitulo 6

Pós-Processador

A rapidez e facilidade de interpretação dos resultados são, obviamente, pontos importantes na concepção de um software de simulação. Como se expôs na secção 4.3, também nestes aspectos a actual implementação do *Impulse* é deficiente. Para garantir que as potencialidades de cálculo do programa são devidamente aproveitadas, há que desenvolver meios de apresentação de resultados mais práticos que as tabelas actualmente utilizadas. A integração no Wintree permitirá não só desenvolver um interface com ferramentas que satisfaçam estes requisitos, mas também acelerar a comunicação com programas "a jusante" no processo de concepção de um transformador Shell.

Ao longo deste capítulo, mostra-se como são importados para o Wintree os resultados da simulação e como, através das suas capacidades gráficas, poderão ser apresentados ao utilizador sem o sobrecarregar com a análise de milhares de valores numéricos.

6.1 - Aquisição de Resultados

Como referido na secção 4.3, o resultado da execução do *Impulse* são os potenciais entre nós para os diferentes instantes da simulação. A gestão de tão grande volume de dados poderia tornar-se problemática, no entanto, os dados são extremamente redundantes: conhecendo o potencial à massa de todos os nós, para todos os instantes, é possível calcular directamente o potencial entre pares de nós. Assim, apenas é necessário importar do *Impulse* os dados relativos aos potenciais à massa, sendo o cálculo dos potenciais entre nós efectuado do lado do Wintree. Recorrendo a esta solução, reduzem-se consideravelmente os requisitos de memória do programa.

O cálculo dos potenciais no *Impulse* é feito de forma iterativa e programado de tal maneira que ao longo de cada iteração os resultados da iteração anterior são eliminados: uma solução para as limitações de memória que computadores da época apresentavam. Isto significa que a passagem dos potenciais em cada instante para o Wintree deve ser feita repetidamente, no final de cada iteração. Para tal, há que determinar em que ponto do código do *Impulse* é feita a transcrição dos potenciais para a folha de resultados e substituir

as instruções de escrita por uma instrução de envio para o Wintree. Eliminam-se assim, definitivamente, as folhas de dados de entrada e de saída associadas ao *Impulse*.

6.2 - Apresentação de Resultados

Apenas com o recurso a um interface gráfico pode um tão grande conjunto de dados ser analisado eficientemente. A representação do corte na janela do transformador existente no Wintree é um bom ponto de partida para o desenvolvimento deste interface.

Os valores dos potenciais podem ser apresentados numericamente na figura. No entanto, embora mais intuitivo que uma lista de resultados, esta solução apresenta o inconveniente de ser pouco inteligível, já que a figura fica sobrecarregada de valores. Caso o utilizador deseje analisar um número específico de nós, pode faze-lo sem muita dificuldade. Por outro lado, ter uma visão geral da distribuição ao longo de toda a fase não é possível por este método. Especialmente, tendo em consideração que o horizonte temporal de análise estará subdividido em centenas de intervalos.

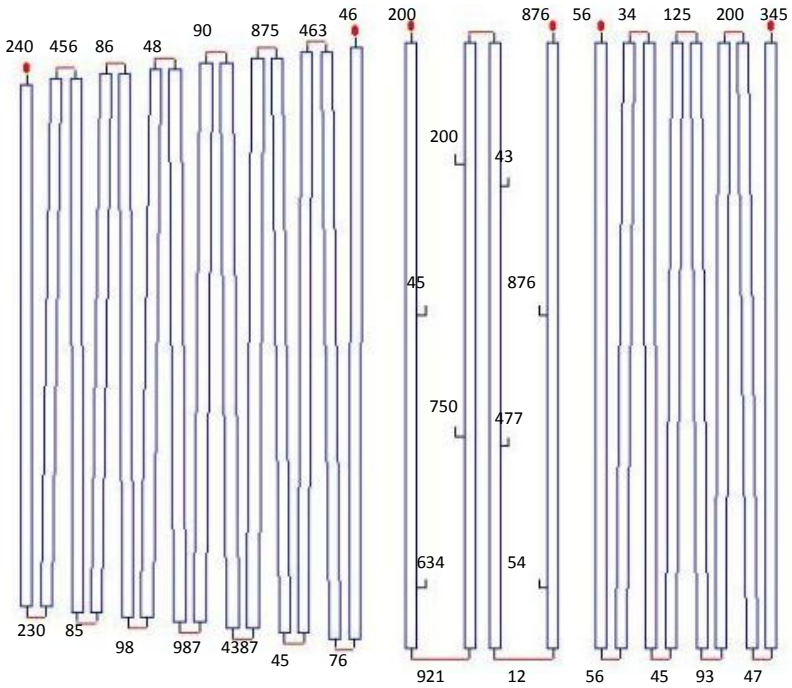


Figura 6.1- Conceptualização de uma apresentação numérica dos resultados.

Por esta razão, decidiu-se que o método principal de apresentação de resultados seria feito através de um mapa de cores que permitisse, muito rapidamente, detectar pontos de elevado potencial no enrolamento e detectar gradientes de potencial que possam comprometer a estrutura isolante do transformador.

6.2.1 - Mapa de Cores

Um mapa de cores permite analisar rapidamente a resposta do transformador ao longo da simulação. Em vez de apresentar o valor numérico do potencial a que se encontra cada ponta,

pretende-se representar na figura do corte na janela o potencial ao longo da galete com uma cor entre o verde, para potencial mínimo, e o vermelho, para potencial máximo.

Percorrendo o *array* de potenciais determina-se qual o valor máximo e mínimo que é atingido por qualquer nó ao longo da simulação. Sabe-se que segundo o modelo de cores aditivas RGB (Vermelho, Verde, Azul), adoptado pelo Delphi, o verde corresponde a (R=0,G=255,B=0) e o vermelho a (R=255, G=0,B=0). Sabendo que o potencial máximo corresponderá a um valor de R igual a 255 e o mínimo igual a 0, a cor correspondente ao potencial em cada nó pode ser encontrada recorrendo à estandardização da equação 6.1,

$$R = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 255, \tag{6.1}$$

onde V_{max} e V_{min} são, respectivamente, o potencial máximo e mínimo atingido por qualquer nó durante a simulação. O valor de G será simplesmente $G = 255 - R$ e $B = 0$.

Os resultados do *Impulse* apenas fornecem o potencial a que se encontram as pontas das galetes. No entanto, sabe-se que a queda de tensão ao longo do raio da galete é aproximadamente linear, pelo que conhecendo os potenciais das duas pontas, pode-se admitir uma variação constante do potencial de uma extremidade à outra.

Considere-se o caso da figura 6.2 de exemplo.

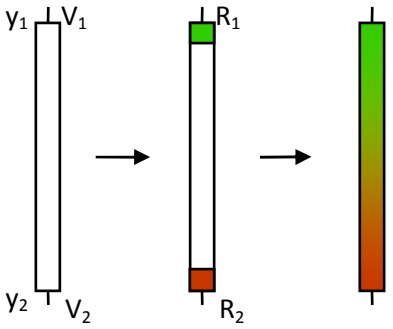


Figura 6.2 - Sequência de preenchimento de uma galete.

Sabe-se que o potencial da ponta 1 é V_1 e a sua coordenada em Y é y_1 e que o potencial da ponta 2 é V_2 e a sua coordenada em Y é y_2. Com recurso à fórmula X, determina-se o valor de R para cada uma das pontas. Sabe-se que de y_1 a y_2 a gradação de cor será linear entre R_1 e R_2. Assim, o valor de R correspondente a cada pixel entre y_1 a y_2 pode ser determinada recorrendo a uma estandardização do tipo:

$$R = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \times (R_2 - R_1) + R_1 \ , \tag{6.2}$$

Aplicando este princípio a cada uma das galetes obtém-se uma representação dos potenciais como a mostrada na figura 6.3, um programa modelo criado para testar a validade deste conceito.

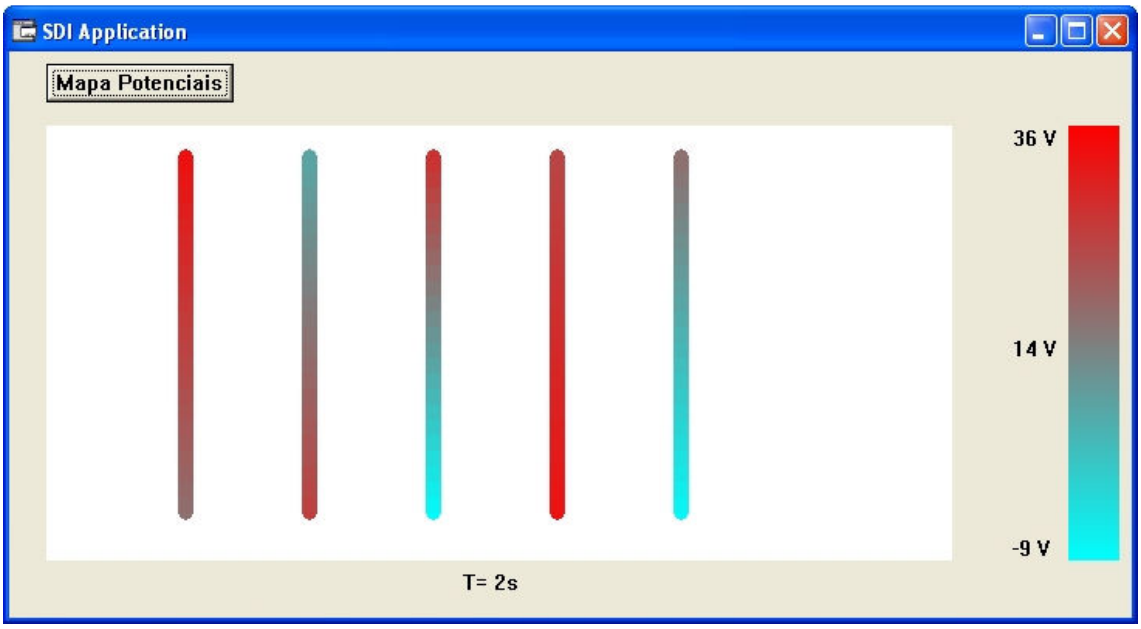


Figura 6.3 - Programa modelo com mapa de cores.

O programa modelo foi feito de tal forma a que pressionando as teclas "+" e "-" do teclado, varia-se o instante de simulação, obtendo assim uma animação da evolução dos potenciais tanto espacialmente como temporalmente.

Caso o utilizador pretenda acompanhar a evolução da diferença de potencial entre pares específicos de pontas, pode faze-lo clicando sobre a sua posição na imagem. É apresentada uma tabela com as pontas seleccionados e o respectivo potencial entre elas. A actualização dos valores desta tabela está igualmente associada às teclas "+" e "-".

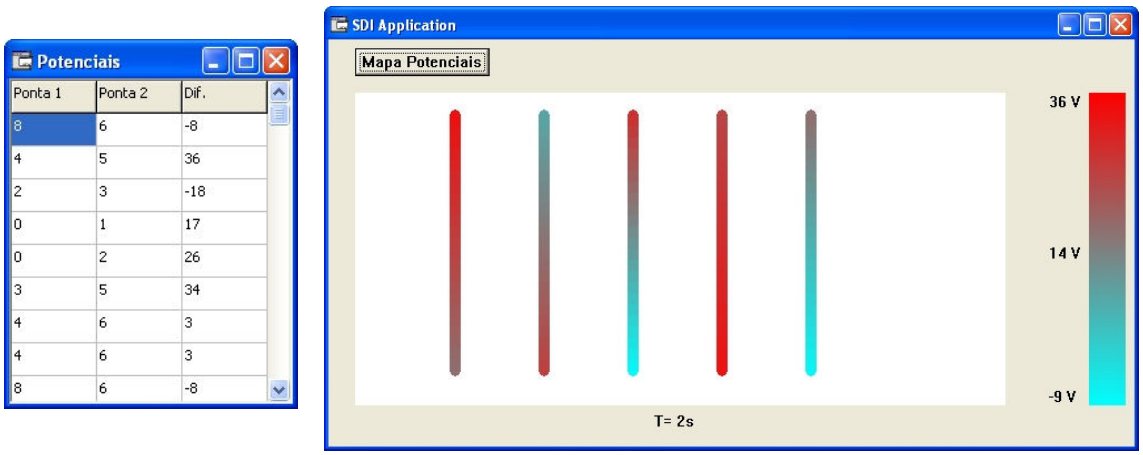


Figura 6.4 - Mapa de cores e tabela de potenciais.

6.2.2 - Gráficos

A implementação de um mapa de cores não dispensa a necessidade da implementação de uma visualização gráfica da evolução temporal dos potenciais. Os gráficos gerados pelo programa *Impulse*, embora detalhados, tornam-se pouco úteis ao não permitir a visualização simultânea de varias curvas, quer referentes ao potencial numa determinada ponta, quer referentes a diferenças de potencial entre pontas. O sistema implementado para apresentar a

tabela de potenciais pode ser adaptado e expandido para traçar as curvas das pontas seleccionadas numa janela independente a pedido do utilizador.

6.3 - Conclusão

Ao criar um pós-processador para um programa que gera um tão grande volume de dados, deve ser dada especial importância à forma como são apresentados os resultados ao utilizador. A implementação de um mapa de cores permitirá fazer uma rápida análise geral do comportamento dos enrolamentos, chamando a atenção do utilizador para zonas que poderão ser problemáticas a nível de isolamento. Uma análise mais detalhada da evolução dos potenciais será dada pela tabela de potenciais e traçados das curvas, exclusivamente para pontas seleccionadas pelo utilizador. A apresentação dos dados é então feita por fases: a primeira, uma visão global mas vaga dos resultados, a segunda, uma análise detalhada de uma amostra específica dos resultados. Espera-se, assim, conseguir uma avaliação mais eficaz da resposta do transformador do que a possível com os métodos anteriormente disponíveis.

Capitulo 7

Conclusões

Ao longo deste documento, procurou-se fazer uma descrição cuidada do trabalho desenvolvido na Efacec.

No primeiro capítulo, abordaram-se as necessidades da Efacec que condicionaram os objectivos do trabalho desenvolvido.

No segundo capítulo, apresentaram-se os principais aspectos construtivos de um transformador do tipo Shell. Focaram-se, sobretudo, os aspectos estruturais em detrimento dos aspectos funcionais já que a utilização do programa *Impulse* pressupõe um conhecimento profundo da geometria dos componentes do transformador que se pretende modelizar.

No terceiro capítulo, descreveu-se, brevemente, o mecanismo por detrás da origem das descargas atmosféricas e os ensaios levados a cabo para testar resistência da estrutura isolante do transformador aos picos de tensão por elas provocados.

Estes dois capítulos serviram para enquadrar o problema das sobretensões em transformadores e porque é tão importante dispor de ferramentas que permitam, com alguma segurança, prever a resposta a sua resposta a escalões de tensão.

No quarto capítulo, fez-se a análise do programa *Impulse*, desde a aquisição de dados até à apresentação de resultados, fazendo referência às principais funcionalidades e limitações do programa. Identificaram-se os principais problemas que a criação de pré e pós-processadores deveriam eliminar, nomeadamente: a ruptura na filosofia de funcionamento com os restantes programas utilizados na Efacec; a grande quantidade de dados introduzidos manualmente; a dificuldade de adaptação à lógica de numeração dos nós; o tempo necessário para a preparação dos dados; os erros cometidos durante a transcrição de dados e numeração dos nós; a dificuldade de interpretação dos resultados da simulação.

No quinto capítulo, descreveu-se como com o pré-processador desenvolvido se abordou, sistematicamente, cada um dos problemas acima referidos. Com a sua implementação, conseguiu-se reduzir para alguns minutos o processo de preparação dos dados que, anteriormente, se estendia por dois ou três dias, dependendo do número de elementos do transformador. O processo foi de tal forma optimizado que é agora viável a utilização do programa em qualquer projecto de transformador Shell, quando anteriormente a sua aplicação estava reservada para transformadores de construção excêntrica, cujo comportamento fosse difícil de prever.

A minimização da intervenção do utilizador na fase de *input* significa que o processo ficou menos propenso a erros de transcrição. Crê-se, inclusivamente, que a autonomia do pré-processador na aquisição dos dados é de tal forma elevada que a utilização do programa fica aberta a qualquer colaborador da Efacec em contacto com o projecto, dispensando sessões de formação para familiarização com a lógica do programa.

No sexto capítulo descreveu-se de que maneira a utilização de um pós processador virá a facilitar legibilidade dos resultados. Prevê-se que a sua implementação permita fazer uma análise mais cuidada da simulação, efectivamente rentabilizando as capacidades de cálculo do programa, até agora francamente subaproveitadas por não ser viável a análise da grande quantidade de dados gerados.

No panorama geral, é da opinião do autor que os esforços feitos se revelarão uma mais-valia para o departamento de Transformadores Shell da Efacec, com impacto relevante na metodologia de projecto de transformadores de potência.

7.1 - Futuro Desenvolvimento

A integração do *Impulse* abriu múltiplas possibilidades de desenvolvimento do software, quer a nível de facilidade de utilização, quer a nível de novas funcionalidades. Nomeadamente, relativamente ao pós-processador, as funcionalidades descritas no capítulo 6 estão numa fase de implementação que continuará para lá do âmbito do estágio curricular do qual resultou esta dissertação. Destacam-se, para além das já referidas, outras vias promissórias por onde poderá seguir o desenvolvimento:

-Na fase de proposta ao cliente de um transformador, ainda não existem na base de dados informações sobre este, pelo que a simulação não pode ser feita. Ao nível do pré-processador, é possível incorporar um modelo base de um transformador cujas características gerais possam ser definidas. Os resultados serviriam como estimativa do comportamento do transformador que poderia ser apresentada ao cliente.

-Desenvolvimento de um módulo do pós-processador que permita a alteração, informalmente, de alguns aspectos da estrutura do transformador, tais como espessura dos canais de isolamento, número de condutores, número de espiras das galetes, anéis de guarda etc. Os resultados obtidos com estas alterações poderão ser comparados com a solução original, no sentido de procurar uma distribuição de potenciais mais interessante, sem ser necessário introduzir alterações no transformador ao nível da base de dados.

-A Efacec dispõe de programas capazes de calcular o campo eléctrico no transformador a partir dos dados obtidos com o *Impulse* e, assim, prever a ruptura da estrutura isolante. Estabelecer a comunicação entre o pós-processador e este módulo é um passo importante na integração completa do *Impulse* no Wintree.

Anexo A

Manual de Utilização do *Impulse*

A.1 - Preparação de Execução

A nova rotina de numeração dos nós funciona pela interpretação das tabelas das ligações associadas a um regime na altura da execução. É pela leitura destas tabelas que se faz a enumeração das galetes do transformador, por isso, é importante que, na altura da execução, o regime apropriado tenha sido seleccionado.

Para efeitos de exemplo, considera-se, daqui em diante, o projecto E8020049A.



Figura A.1 -Botão "*Parte Activa Shell*".

Clicando no botão "*Parte Activa Shell*" e activando o corte na janela, a ferramenta de cálculo de impulsos fica acessível na zona inferior de "*Parte Activa ST*".



Figura A.2 - Localização do programa *Impulse*.

A sua execução não é, no entanto, ainda possível. De facto, clicando neste momento sobre "Impulso", resulta na seguinte mensagem de erro:



Figura A.3 - Mensagem de erro.

Vejamos qual o regime apropriado para a execução da simulação neste transformador.

No instante em que é iniciada a execução do *Impulse*, é feita uma enumeração das galetes do transformador percorrendo as ligações que lhe estão associadas. Logo, galetes que não constem nas ligações, não serão consideradas no cálculo. Antes da execução do programa é então necessário garantir que um regime com ligações que percorram todas as galetes de todos os grupos existe e está seleccionado. Veja-mos um exemplo de um regime que não é apropriado para o cálculo.

Relativamente ao projecto E8020049A, atente-se à ao regime "*Tomada 4*", constituído pelas ligações "*Comum Neutro*", "*Série*", "*Regulação Tom.4*" e "*Comum*".

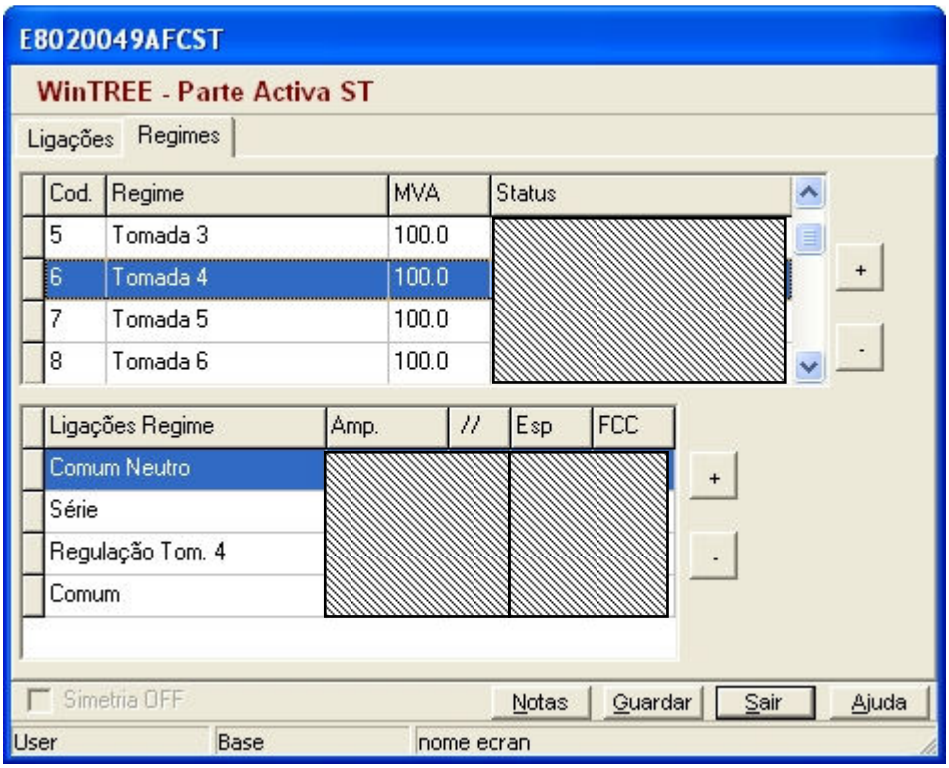


Figura A.4 - Regime "*Tomada 4*"

Note-se que não existe ligação referente ao enrolamento terciário e que a ligação "*Regulação Tom. 4*" não percorre o grupo de regulação até ao fim. Embora seja possível executar o *Impulse* com este regime seleccionado, os resultados obtidos não seriam válidos. Não só não haveria informação relativamente à distribuição de potenciais nestes componentes, mas também o seu efeito na distribuição dos potenciais nos restantes componentes não se faria sentir.

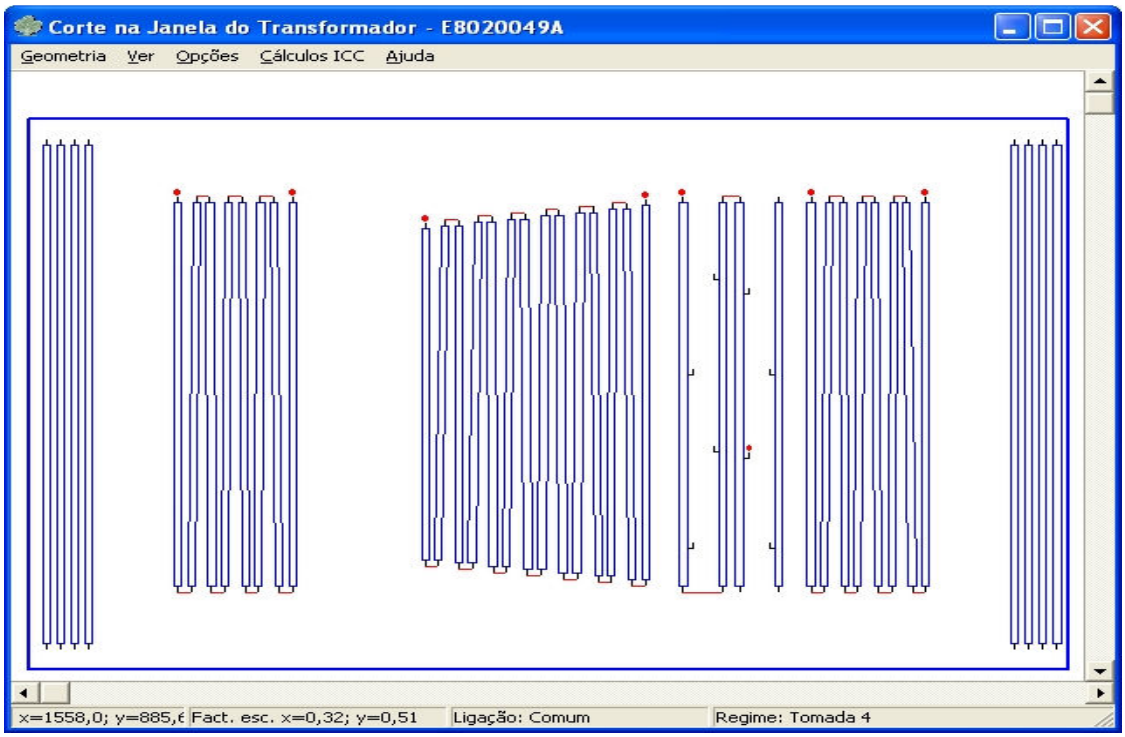


Figura A.5 - Representação das ligações do "*Regime 4*".

Recomenda-se, então, que a execução do *Impulse* parta de um regime criado especificamente para o efeito.

Adicione-se um novo regime com o nome "Impulso".

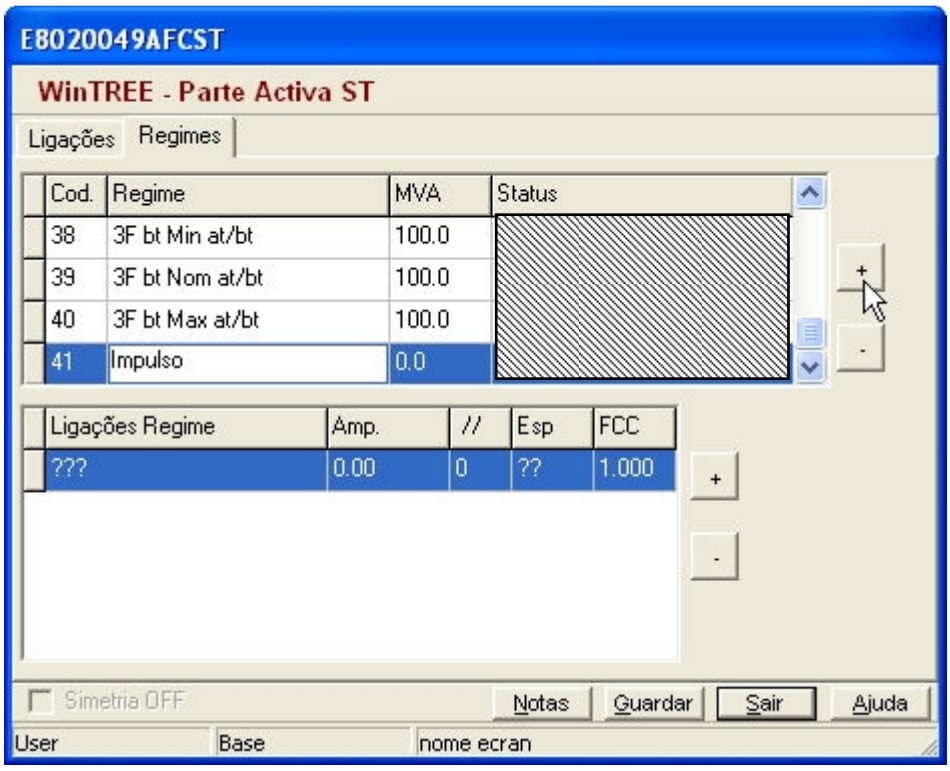


Figura A.6 - Definição de regime "*Impulso*".

Queremos que o regime contenha as ligações que percorrem todas as galetes de todos os grupos. No caso do E8020049A, estas ligações serão "*Serie*", "*Reg. Tom. 1*", "*Comum*", "*Comum Neutro*", "*Terciário*". Outras combinações seriam válidas, desde que, no corte na janela, a representação do regime tenha o aspecto da figura A7. O algoritmo é insensível à direcção da corrente nos grupos.

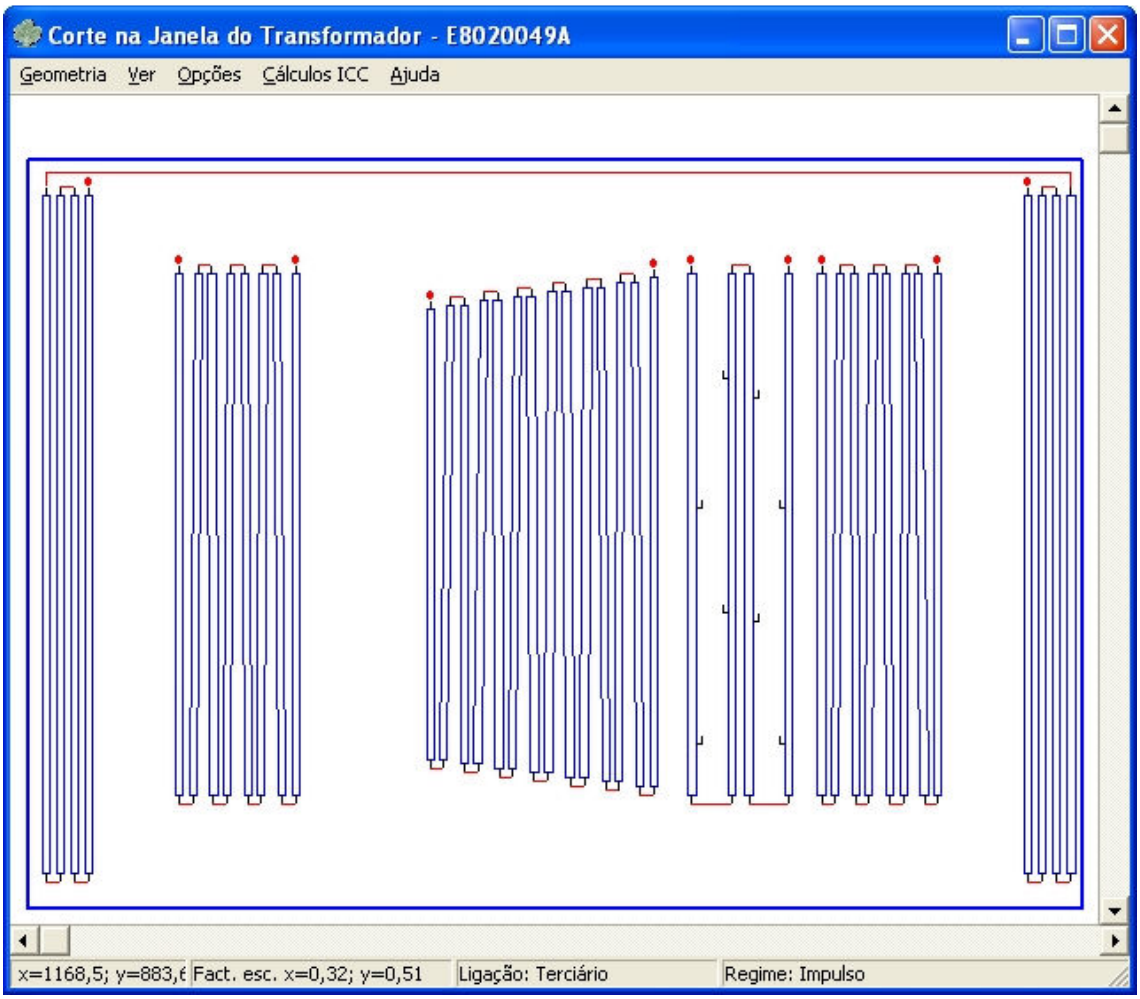


Figura A. 7 - Representação das ligações do regime "*Impulso*".

Com este novo regime seleccionado, pode-se agora executar o programa.

A2 – Preenchimento dos Dados

A2.1 - Esquema

O regime criado serve para especificar as ligações entre as galetes de cada grupo. Neste separador são definidas as ligações externas dos grupos.

Percorrendo as tabelas das ligações, o programa identifica pontas e tomadas que podem ser ligadas à massa, ligadas entre elas ou às quais pode ser aplicado o impulso e apresenta-as como índices de uma matriz quadrada. Para o transformador E8020049A, a matriz de esquema tem o aspecto da figura A8.

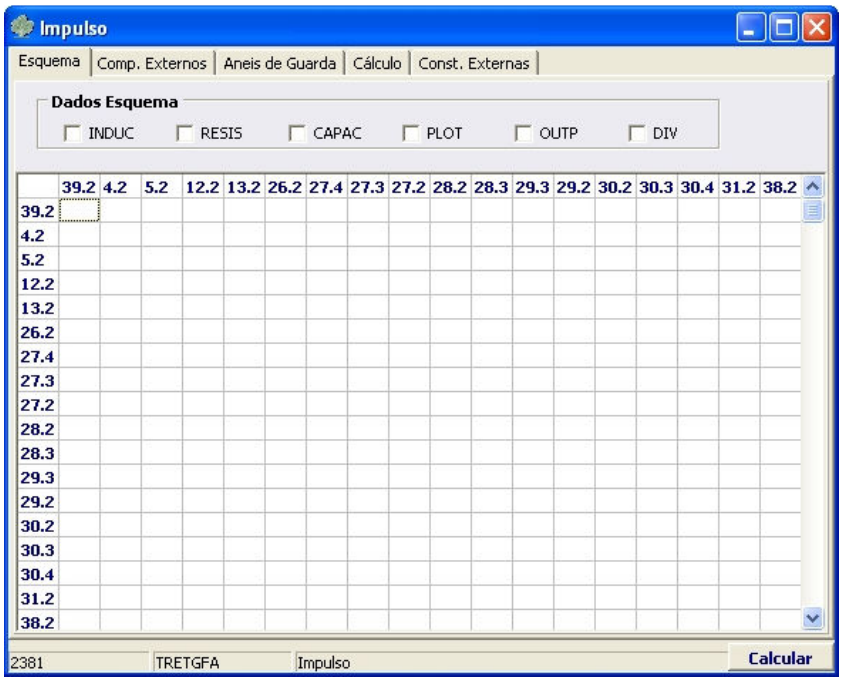


Figura A.8 - Matriz de esquema do regime "*Impulso*" do transformador E8020049A.

Suponha-se que se deseja especificar o esquema da figura A9.

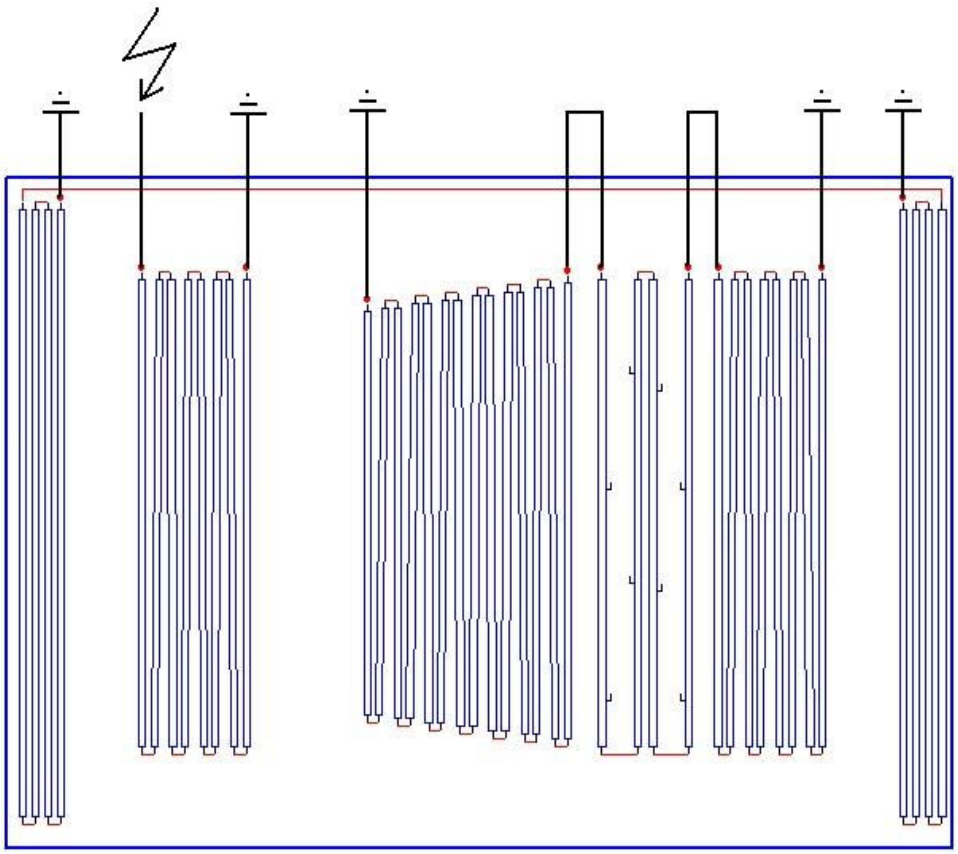


Figura A.9 - Exemplo de esquema pretendido.

Então, clicando duas vezes sobre a célula da diagonal principal correspondente à ponta 5.2, define-se o ponto de aplicação do impulso.

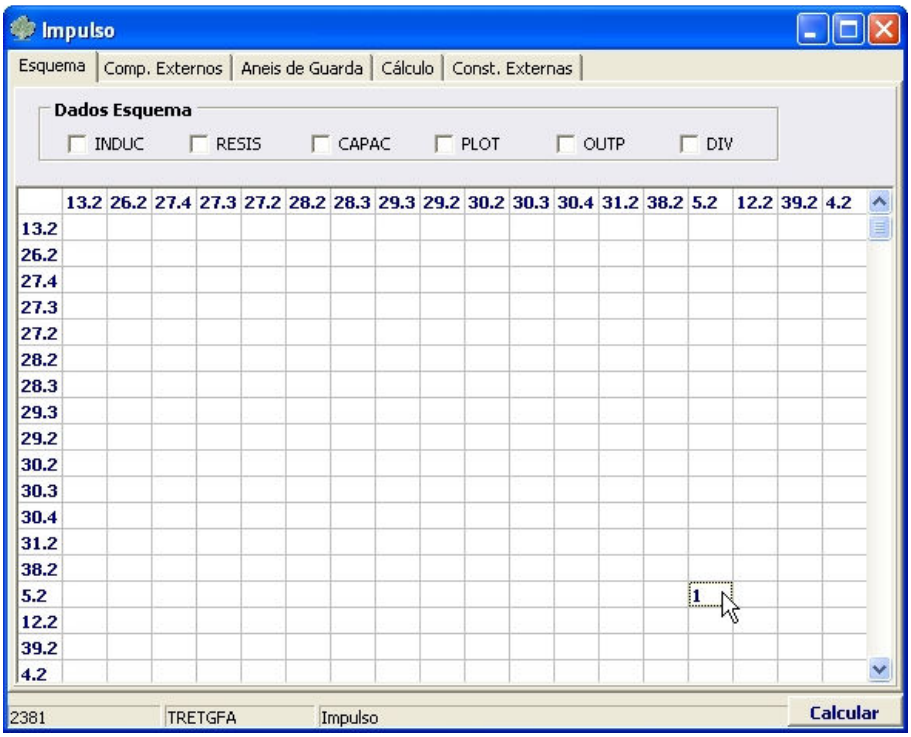


Figura A.10 - Definição de ponta de aplicação do Impulso.

Com um clique nas diagonais principais de 13.2, 38.2, 12.2, 39.2 e 4.2, definem-se as pontas ligadas à massa.

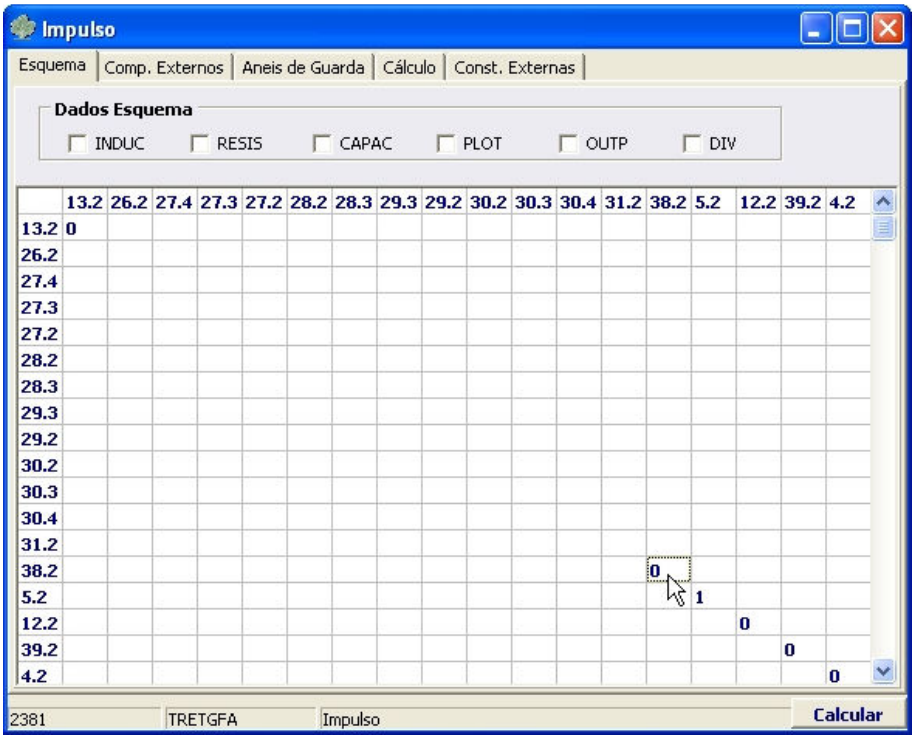


Figura A.11 - Definição das pontas à massa.

Finalmente, definem-se as pontas ligadas entre si clicando sobre a célula correspondente á intersecção da linha e da coluna correspondente. O clique pode ser feito quer no triângulo superior, quer no triângulo inferior, já que as células são actualizadas automaticamente.

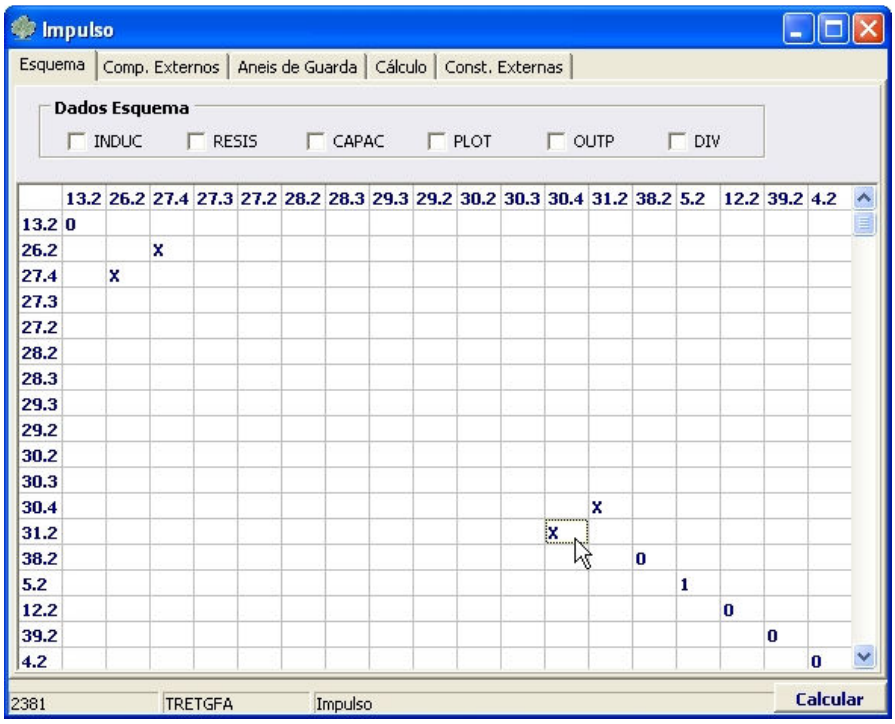


Figura A. 12 - Definição das pontas conectadas.

O método de cálculo do *Impulse* não permite a divisão da galete e mais do que 3 bocados. Como tal, para além do esquema de ligação, nesta matriz devem definir-se quais as tomadas que devem ter nós atribuídos assinalando com um "*T*" a posição correspondente da diagonal principal. Se isto não for feito, as galetes de regulação serão consideradas galetes normais, e os potenciais nas suas tomadas não serão conhecidos. Se a selecção feita resulta numa divisão da galete em mais do que três bocados, será apresentado um aviso.

No caso do transformador de exemplo, todas as tomadas podem ser assinaladas.

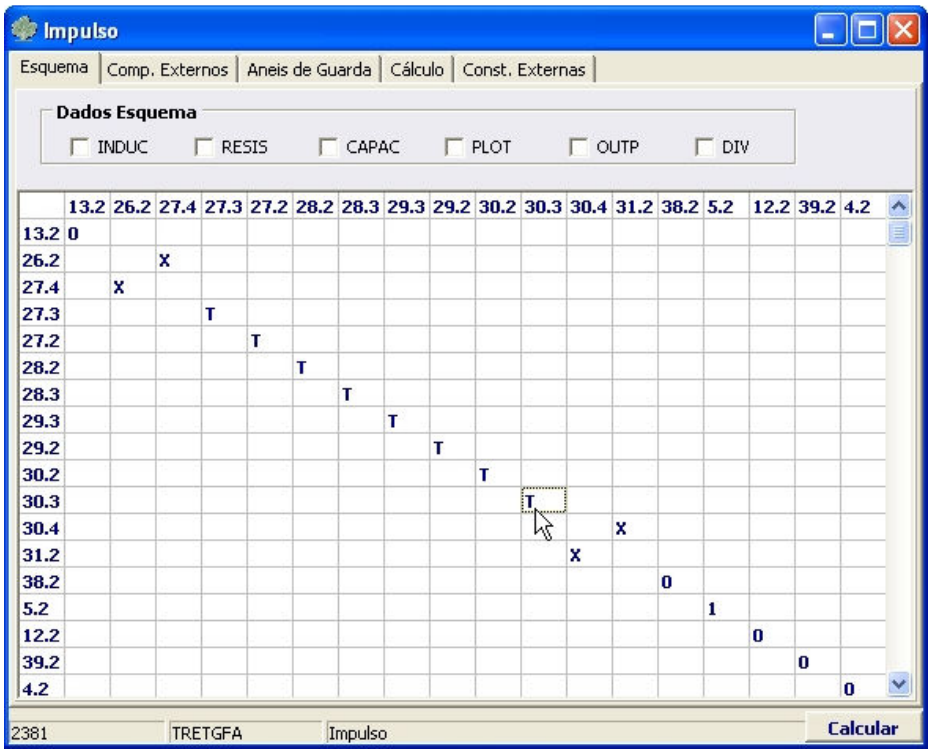


Figura A. 13 - Definição das tomadas a considerar.

CÁLCULO TRIFÁSICO

O programa assume por defeito o cálculo para um transformador monofásico. O cálculo trifásico é feito assinalando a caixa "*DIV*" em "Dados Esquema" (as restantes opções servem para *debugging* e devem ser ignoradas).

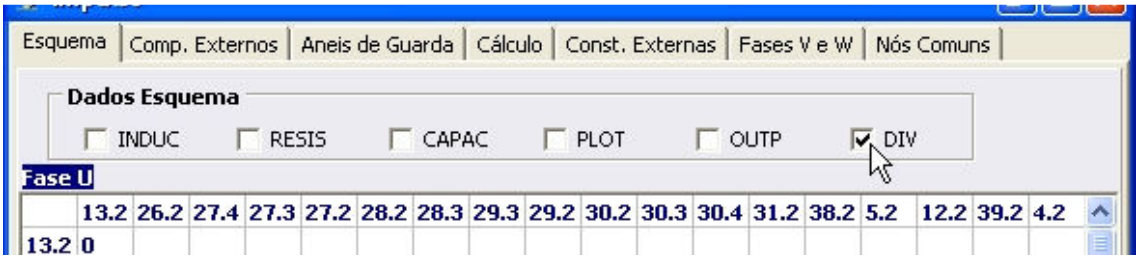


Figura A.14 - Selecção de Cálculo Trifásico

Ao activar esta opção, surgem dois novos separadores, específicos a este tipo de cálculo. A matriz do separador esquema é automaticamente copiada para as matrizes das fases V e W, encontradas no separador com o mesmo nome.

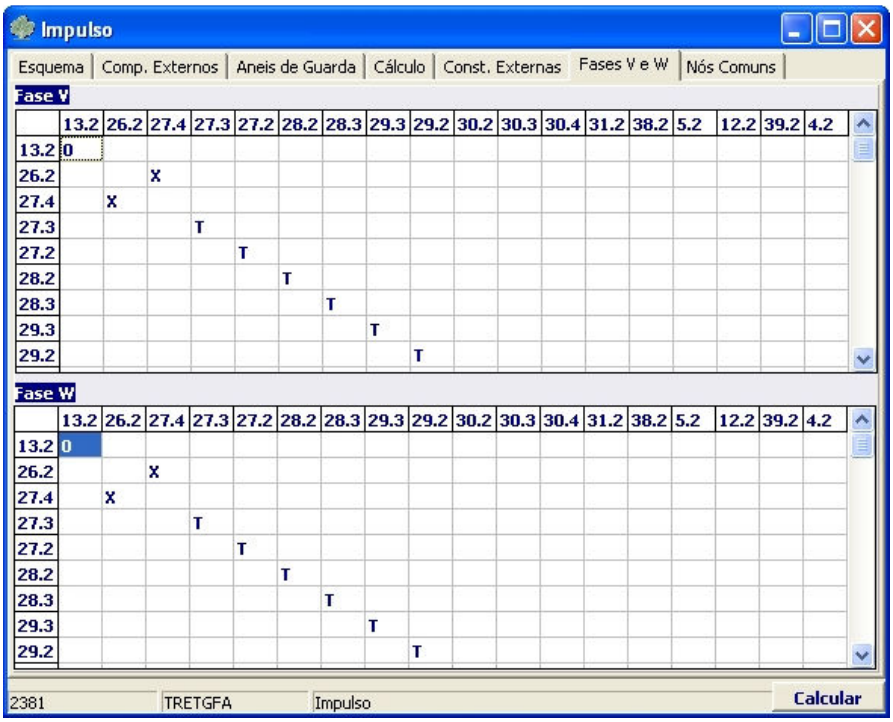


Figura A.15 - Matrizes de Esquema das fases V e W.

Caso o esquema de ligações difira entre fases, estas matrizes podem ser alteradas pelo mesmo método que o utilizado na matriz da fase U.

A ligação entre fases deve ser especificada em "*Nós Comuns*", seleccionando na tabela as pontas ligadas entre sí.

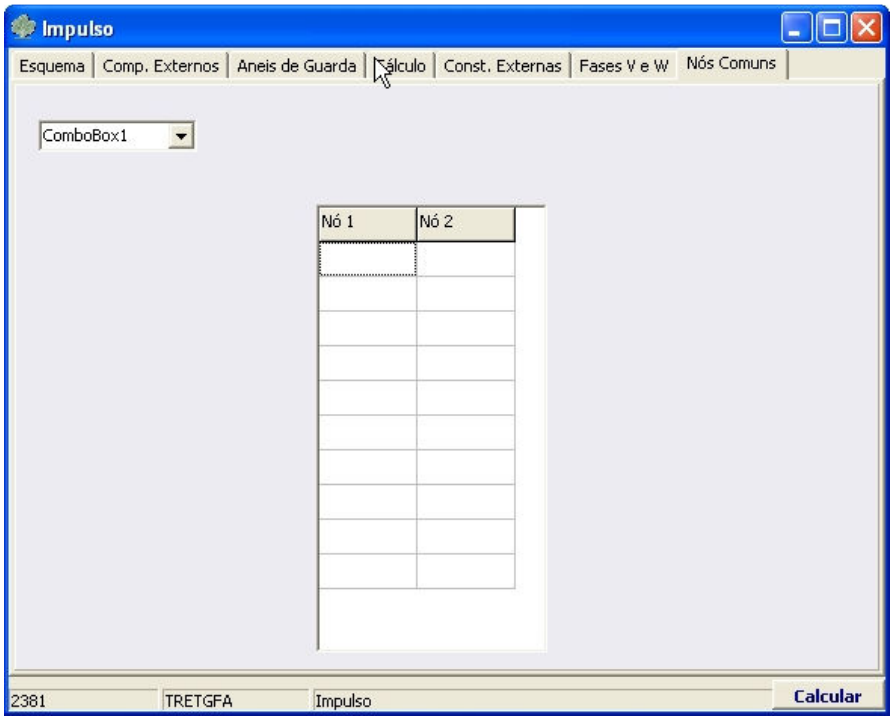


Figura A.16 - Separador de especificação dos nós comums.

A2.2 - Anéis de Guarda

O programa de cálculo *Impulse* assume anéis de guarda com espessura de 0.1 mm. Estes representam uma aproximação aceitável aos anéis de guarda tipo C. Para os anéis tipo U e R, com espessuras superiores, coloca-se um anel de guarda na posição correspondente a cada uma das superfícies. Este processo é feito automaticamente e o resultado pode ser conferido no separador "*Anéis de Guarda*".

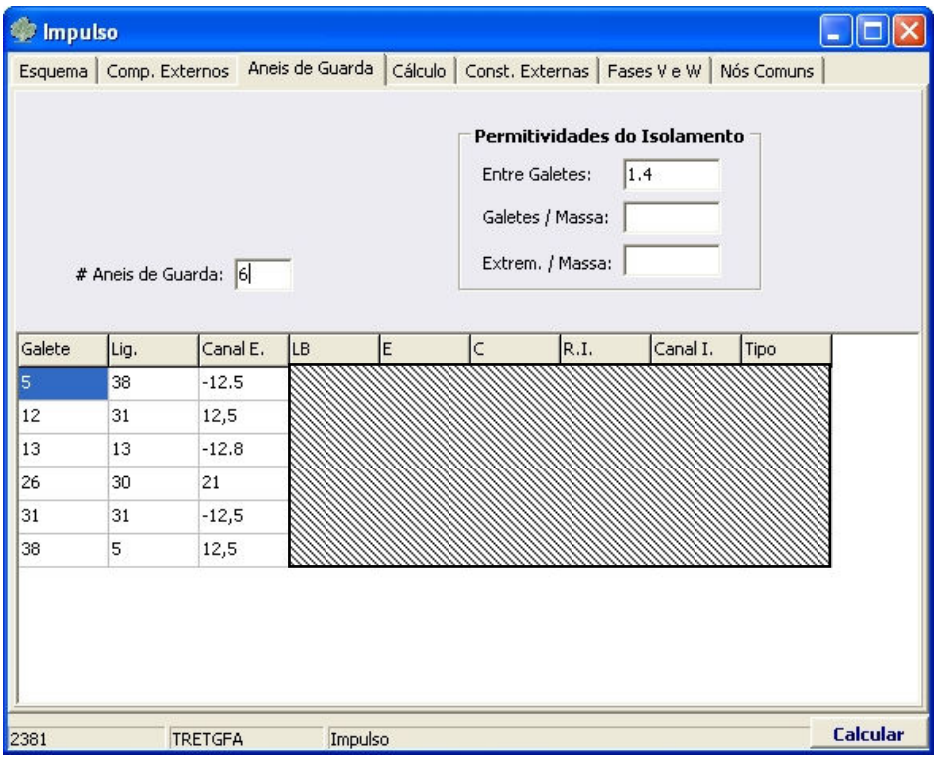


Figura A.17 - Separador "*Anéis de Guarda*".

Também aqui é possível alterar os valores atribuídos por defeito à permitividade do isolamento.

A2.3 - Forma de Onda e Parâmetros de Cálculo

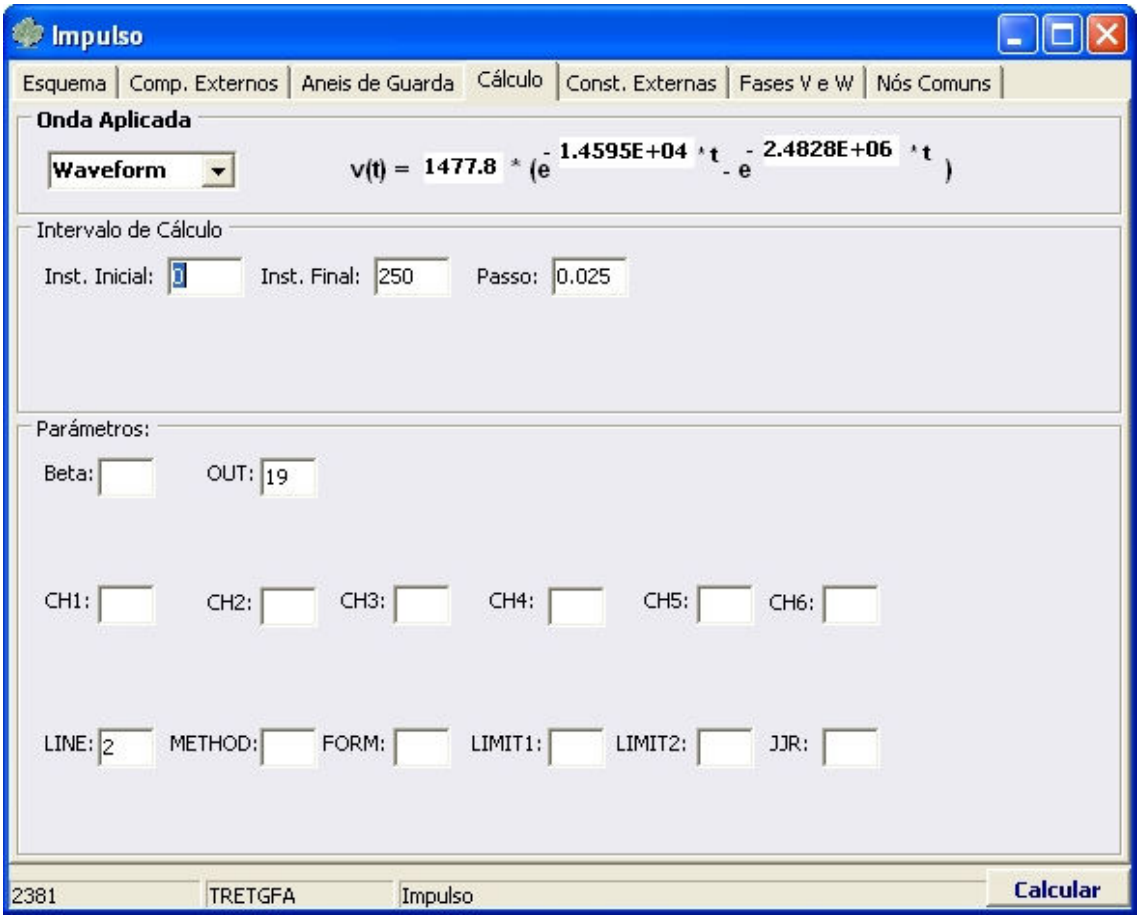


Figura A.18 - Separador "*Cálculo*".

No separador "*Cálculo*", define-se a onda a aplicar á ponta assinalada com "*1*" na matriz de esquema.



Figura A.19 - Selecção de tipo de onda.

A forma de especificar a onda pode ser escolhida recorrendo á dropdown box.

Estão disponíveis as típicas ondas 1x40 e 1x50, neste caso, basta especificar o valor de pico. Qualquer outro tipo de onda deve ser especificado por uma dupla exponencial. Nesse caso à que definir os valores para K, α e β.

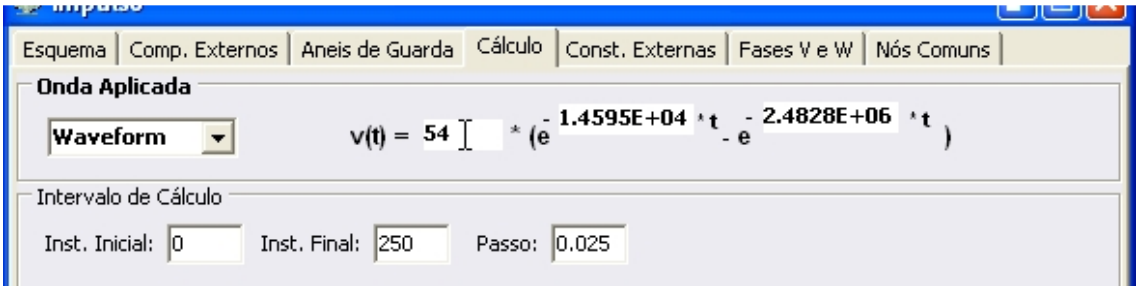


Figura A.20 - Parâmetros da onda dupla exponencial e parâmetros de cálculo.

Os parâmetros "*Inst. Inicial*", "*Inst. Final*" e "*Passo*", referem-se à duração da janela de simulação e ao passo de integração. Valores inferiores a 0.025 para o passo não são possíveis.

A2.4 - Componentes Externos

Em alguns casos, pode ser útil especificar circuitos externos acoplados aos enrolamentos. Suponha-se o circuito da figura A.21, intercalado entre a ponta 13.2 e a massa.

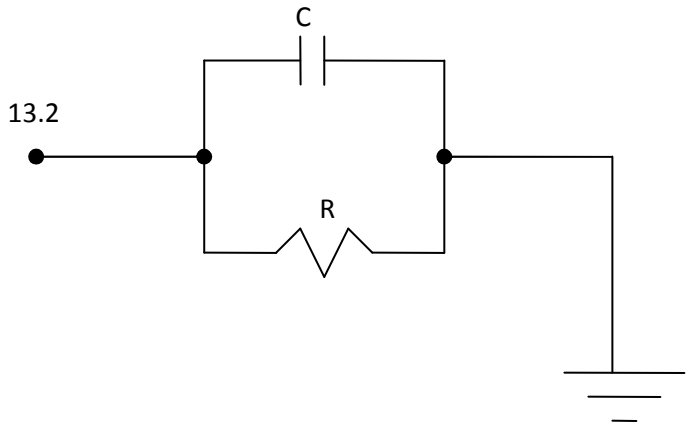


Figura A.21 - Circuito externo de exemplo.

Em primeiro lugar, define-se o número de cada tipo de componente que faz parte do circuito, neste caso uma resistência e uma capacitância.

Seguidamente, coloca-se na tabela a constante do componente respectivo, ao centro, com os nós aos quais está ligado de cada lado. Uma ligação à massa representa-se com um 0.

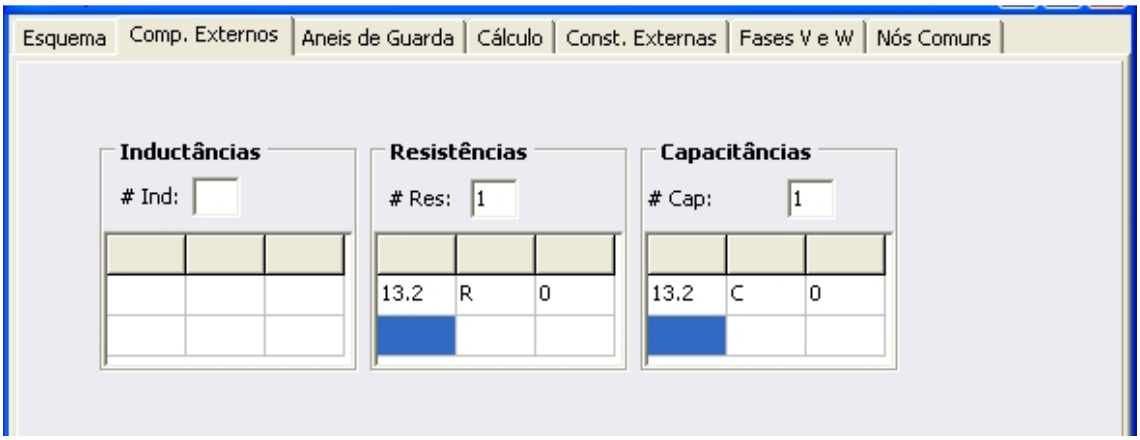


Figura A. 22 - Definição de componentes externos.

A3 - Execução do Cálculo

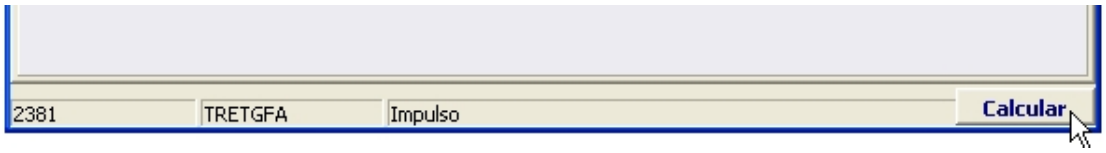


Figura A. 23 - Botão de inicio de cálculo.

Os únicos dados cuja especificação é obrigatória são os correspondentes à matriz esquema. Todos os outros assumem valores por defeito. Uma vez completa a introdução dos dados, clicando no botão "*Calcular*" no canto inferior direito da janela, inicia-se a simulação.

Referências

[1]. IEEE Std C57.98-1993, I*EEE Guide for Transformer Impulse Tests.*, 1993. 1-55937-399-7.

[2]. Carvalho, Carlos Castro. *Transformadores*. Porto : Editorial Engenharia, 1983.

[3]. Massachusetts Institute of Technology. *Magnetic Circuits and Transformers.* Massachusetts : John Wiley & Sons, Inc., 1949.

[4]. Stigant, S. Austen and Franklin, A. C. *The J&P Transformer Book*. England : Newnes-Butterworths, 1973. 0-408-00094-5.

[5]. Calafate, Ilídio. *Acção de Formação Transformadores Shell Type - Core Type*. Porto : Efacec Energia, 2008.

[6]. Foster, Derek R. Dry-Type "disc wound transformers in medium voltage applications." [Online] Available:www.olsun.com/Disc%20Wound%20Transformers.pdf.

[7]. Hart, William C. and Malone, Edgar W. *Lightning and Lightning Protection*. s.l. : Don White Consultants, 1979.

[8]. Greenwood, Allan. *Electrical Transients In Power Systems - 2nd* ed. , John Wiley & Sons, 1991.

[9]. Teixeira, Carlos Jorge. "Estudo e Análise de Sobretensões de Origem Atmosférica em Linhas Aéreas". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2005. Dissertação de Mestrado.

[10]. IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distributio, Power, and Regulating Tranformers. New York : IEEE, 2006. 0-7381-5252-8.

[11]. International Electrotechnical Commission. "Power Transformers - Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests and External Clearances in Air." Genebra : IEC, 2000.

[12]. Laughton, M. A. and Say, M. G. *Electrical Engineer's Reference Book - 14th Edition.* London : Butterworth & Co, 1985.

[13]. Karsai, K. *Large Power Transformers* . Elsevier Publishing Company, 1987. pp. 187-348

[14]. M.J. Manyahi; R. Thottappillil, "Simplified model for estimation of lightning induced transient transfer through distribution transformer", Elsevier, 2003.

[15]. Martinez, J.A., et al. *Parameter Determination for Modeling System Transients - Part III: Transformers.* 2005.

[16]. León, Francisco de and Semlyen, Adam. "Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients". Toronto : University of Toronto, 1994.

[17]. Leon, F. de and Semlyen, A. "Efficient Calculation of Elementary Parameters of Transformers". *IEEE Transactions of Power Delivery, Vol 7, No.1*, 1992.

[18]. Leon, F. de and Semlyen, A.. "Detailed Modeling of Eddy Current Effects for Transformer Transients." Trabalho submetido para apresentação em IEEE/PES Winter Meeting, 1993.

[19]. Koley, Chiranjib and Chakravorti, Sivaji. "Time-Frequency Representation of Resistance for Modeling of Transformer Winding Under Inpulse Test." *IEEE Transactions on power delivery. 3, 2006, Vol. 21.*

[20]. Mitsubishi Electric Corporation. *Input Manual for Impulse Voltage Distribution Calculation Program of Shell Type Transformer*. Japan : Mitsubishi Electric Corporation, 1980.

[21]. Júdez, Gaudencio Zoppetti. *Estaciones Transformadoras Y de Distribuición, 4ª Edição*. Barcelona : Editorial Gustavo Gili, S.A., 1972.

[22]. McPherson, George. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. Missouri-Rolla : John Wiley & Sons, 1986.
[23]. Peterson, Harold A. *Transients in power System*s. s.l. : Constable and Company Ltd., 1951. 0-486-61685-1.
[24]. Matsch, Leander W. *Electromagnetic & Electromechanical Machines, Second Edition*. s.l. : Harper & Row, Publishers, Inc., 1977. 0-7002-2501-3.
[25]. Kostenko, M. *Máquinas eléctricas*. Barcelona : Montaner Y Simón, 1968 . pp. 385
[26]. Oliva, Enrique Ras. *Transformadores de potencia : de medida y de protección*. Barcelona : Ediciones Técnicas Marcombo, 1972 . pp.1
[27]. Engelmann, Richard H. *Static and Rotating Electromagnetic Devices*. New York : Marcel Dekker, 1982 .pp.89
[28]. Chapman, Stephen J. *Electric machinery fundamentals*. Boston : McGraw Hill, 2005 .pp.57
[29]. Chapman, Stephen J.. *Introduction to Fortran 90/95*. Boston, MA : WCB McGraw-Hill, 1998.
[30]. Richardson, Donald V. *Rotating Electric Machinery and Transformer Technology*. Virginia : Reston Publishing Company, 1982 .pp.360
[31]. Chang, Sheldon S. L. *Energy Conversion*. Long Island : Prentice-Hall, Inc., 1963.
[32]. Lopez-Fernandes, Xose and Alvarez-Mariño, Casimiro. "Computational Method for Transients in Power Transformers With Lossy Windings." Vigo : Universidade de Vigo, 2009.
[33]. Mehdi Bagheri, Mehdi Vakilian, Arsalan Hekmati. "Influence of Electrostatic Shielding of Disc Winding on Increasing the Series Capacitance in Transformer." 2007.
[34]. Cantú, Marco. *Mastering Delphi 6. San Francisco :* SYBEX, 2001 .