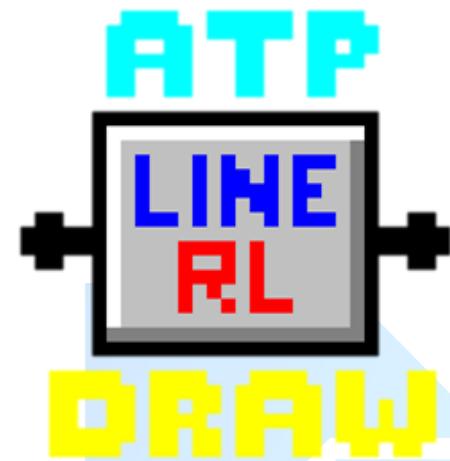




UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÚCLEO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E DINÂMICA DE
SISTEMAS ELÉTRICOS



Curso de ATPDraw

EQUIPE TÉCNICA:

Eng. Alex Reis
Eng. Arnaldo J. P. Rosentino Jr
Eng. Daniel Caixeta
Eng. Fabricio Parra Santilio
Eng. Guilherme H. Bernardes Cunha
Eng. Isaque Nogueira Gondim
Eng. João Areis Ferreira Barbosa Jr
Eng. Paulo Henrique Oliveira Rezende
Eng. Thiago Vieira da Silva

Uberlândia-MG
Março/2012



Sumário

1 - INSTALAÇÃO FÁCIL DO SIMULADOR ATPDRAW	7
1.1 – Instalação	7
1.2 - Como fazer as instalação completa do ATPDraw	7
1.3- Abrindo o programa pela primeira vez	15
1.4 - Conhecendo o programa	18
1.4.1 – Conhecimento da Biblioteca do ATPDraw	18
1.4.2 – Localização dos Componentes	19
1.4.3 – Criação de um Circuito no ATPDraw	20
1.4.4 – Configuração da simulação	26
1.4.5 – Saída de dados	30
2 - MODELAGEM E SIMULAÇÕES DE CIRCUITOS ELEMENTARES – RL, RC, RLC	39
2.1 – Introdução	39
2.2 - Elementos Básicos	39
2.3 - Utilizando ATPDraw	40
2.4 - Simulação de Circuitos Elétricos Lineares	48
3 - MODELAGEM MATEMÁTICA DE CARGAS MONOFÁSICAS E TRIFÁSICAS	58
3.1 - Introdução	58
3.2 - Modelagem de Cargas Monofásicas	58
3.3 - Modelagem de Cargas Trifásicas	60
3.3.1 - Carga com ligação Delta em paralelo	60
3.3.2 - Carga com ligação Estrela em série	62



3.4 - Explorando o ATPDraw	63
3.5 - Modelagem de um Banco de Capacitor	65
3.6 - Modelagem de Reator	67
3.7 - Estudo de Caso	68
4 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS NO ATP	70
4.1 – Introdução	70
4.1.1 – Definições	72
4.2 - Estimativa dos Parâmetros Básicos de um Transformador	72
4.3 - Modelagem de Transformadores Monofásicos no Atpdraw	79
4.3.1 - Transformadores Ideias	80
4.3.2 - Transformadores Saturáveis	81
4.4 - Exemplo de Aplicação	84
4.5 - Ensaio a Vazio do transformador:	91
4.6 - Ensaio em curto-círcuito do transformador	93
5 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DOIS ENROLAMENTOS NO ATP	96
5.1 – Introdução	96
5.2 – Localização dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATPDraw	96
5.3 - Características dos transformadores de dois enrolamentos no ATPDraw	97
5.4 - Exemplos de Aplicações	100
5.4.1 - Transformador D – Y	100
5.4.2 - Transformador Y – D	104
5.4.3 - Transformador Y – Y	109
5.4.4 - Transformador D – D	113



5.5 - Exemplo de Aplicação	117
5.6 - Ensaio a Vazio do transformador:	121
5.7 - Ensaio em curto-círcuito do transformador	124
6 - TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE 3 ENROLAMENTOS	127
6.1 - Introdução	127
6.2 - Características dos Transformadores de Três Enrolamentos no ATP	128
6.3 - Cálculo dos Parâmetros em Ohms	131
6.3.1 - Cálculo da Reatância Indutiva em Ohms	131
6.3.2 - Cálculo da Indutância Primária, Secundária e Terciária	133
6.3.3 - Cálculo das Correntes a Partir da Potência Trifásica	134
6.3.4 - Cálculo das Resistências	135
6.3.5 - Tabela Resumida Com as Equações	140
6.4 – Exemplo numérico:	141
7 - TRANSFORMADORES: CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO E CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO	152
7.1 - Introdução	152
7.2 - Características dos Materiais Ferromagnéticos	154
7.2.1- Perdas por correntes induzidas:	155
7.2.2 - perdas por histerese:	156
7.2.3 - As perdas anômalas:	157
7.3 - Propriedades Gerais dos Laços de Histerese	158
7.3.1 - Curva de magnetização inicial	160
7.3.2 - Densidade de fluxo magnético de saturação (B_S)	160
7.3.3 - Densidade de fluxo remanescente ($B_R(H)$)	160
7.3.4 - Intensidade de campo magnético coercitivo (H_C)	160
7.3.5 - Permeabilidade	160



7.4 - Transformadores Saturáveis no Programa ATP	162
7.5 - Cálculo da Curva de Saturação para um Transformador Monofásico	168
7.5.1 - Exemplo: Cálculo dos Parâmetros Elétricos e da Curva de Saturação de um Transformador Trifásico de Distribuição	171
8 - LINHAS DE TRANSMISSÃO	175
8.1 – Introdução	175
8.2 - Modelagem de Linhas de Transmissão	175
8.2.1 - Resistência das LT	176
8.2.2 - Indutância das LT	176
8.2.3 - Capacitância das LT	177
8.2.4 - Classificando as Linhas de Transmissão	177
8.3 - Linhas e cabos no ATPDraw	178
8.3.1 - MODELO Π	179
8.3.2 - MODELO CLARKE (<i>Transposed Lines</i> - Linhas Transpostas)	181
8.3.3 - LINEZT_6	183
8.3.4 - MODELO KCLee (<i>Untransposed Lines</i> - Linhas sem transposição)	184
8.3.5 – LCC	185
8.3.6 - Read PCH files...	202
8.4 - EXEMPLO PRÁTICO	203
8.4.1 - Dados da torre de transmissão para simulação	203
8.4.2 - Parâmetros do circuito	205
8.4.3 - Torres de transmissão	206
8.4.4 - Energização direta	207
8.4 - ANEXO 1	208
8.5 - ANEXO 2	209
9 - SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO COMPLETO NO ATP	213
9.1 - Introdução	213



9.1.1 - Dados do sistema elétrico

213

10 - MODELAGENS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO NO ATP

219

10.1 – Configuração do ATP Settings

219

10.2 – Exemplo de modelagem de motores de indução trifásicos no ATPDraw

220

10.2.1 – Dados de placa do motor de indução trifásico

220

10.2.2 – Esquema de montagem e modelagem do moto UM3

222

10.2.3 - Momento de Inércia:

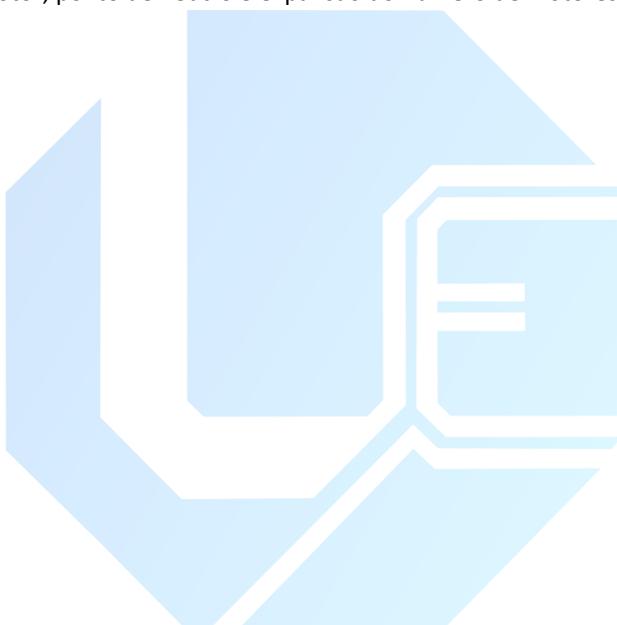
226

10.2.4 - Conjugado resistente:

227

10.2.5 - Inicialização do motor, ponto de neutro e expansão do numero de motores:

227





1 - INSTALAÇÃO FÁCIL DO SIMULADOR ATPDRAW

1.1 – Instalação

Na pasta de arquivos do ATP serão instalados 3 arquivos:

- Conjunto Base - **InstATP116.exe** - Se você quiser rodar o ATP e desenhar um gráfico com o PlotXY ou GTPPLOT, basta executar este instalador.
- Conjunto Adicional - **InstATP116add.exe** - Alguns manuais, exemplos e ferramentas adicionais estão incluídas neste conjunto.
- Versão Atualizada do Instalador do ATP - **ATPLnchUpdate.exe** - Utilize este pacote somente se você quiser usar a versão atualizada do Instalador ATP incluído no "Conjunto Base".
- Versão atualizada do pacote do ATPDraw 116 - **ATPDrawUpdate.exe**
- Versão atualizada da biblioteca do ATPDraw 116 - **InstATP116_lib.exe** – Inserção de novos componentes pre-dimensionados.

1.2 - Como fazer as instalação completa do ATPDraw

- 2.1- Click no arquivo **InstATP116** como é mostrado na Figura 1.1, para iniciar a instalação.

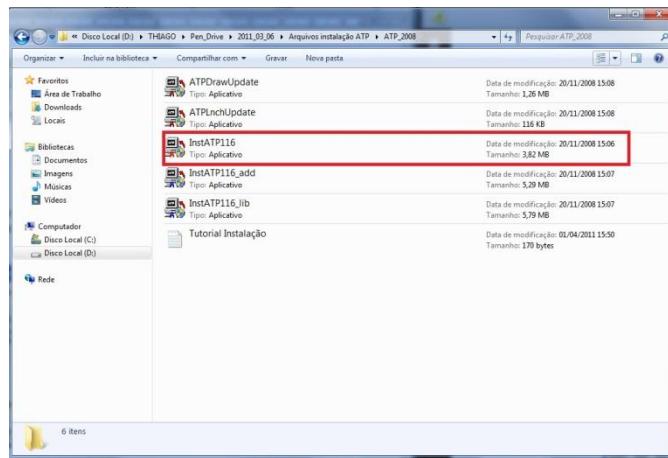


Figura 1.1 – Pasta onde se encontram os arquivos

O processo de instalação é iniciado e a janela da Figura 1.2 é aberta. Click no botão **Next >** no canto inferior direito para continuar a instalação.

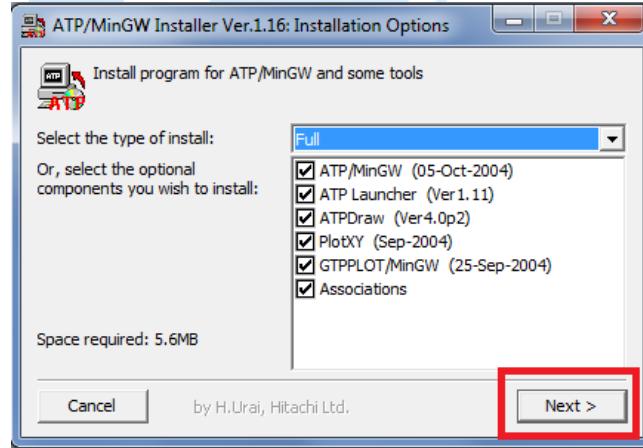


Figura 1.2. Janela Subsequente da instalação do Software ATPDRAW

Em seguida abrirá a janela da Figura 1.3, onde mostra o diretório no qual o programa vai ser instalado no computador. É recomendado que não faça nenhuma alteração neste diretório. Para continuar a instalação, basta dar um click no botão **Install** no canto inferior direito da janela e aguardar alguns segundos em quanto os arquivos são copiados para a pasta selecionada.

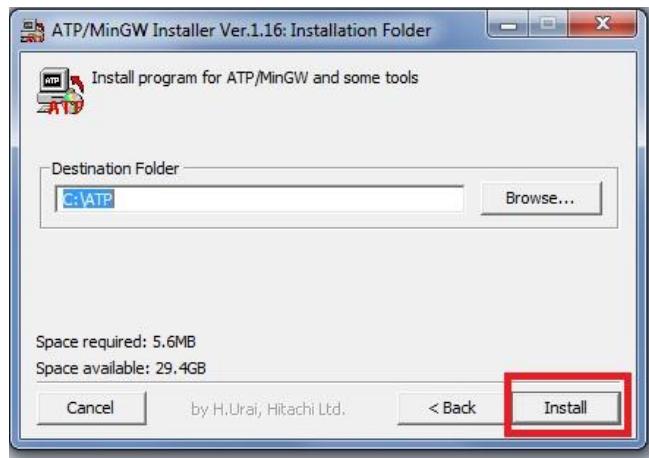


Figura 1.3 – Janela para escolha de diretório de instalação.

Finalmente, click no botão **Close** no canto inferior direito da janela, como é mostrado na Figura 1.4.

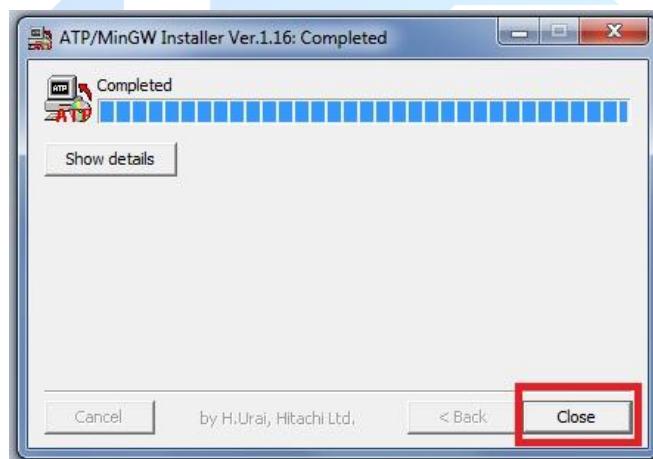


Figura 1.4 – Janela para fechamento da instalação do programa.

Instala-se agora um conjunto adicional, como alguns manuais, exemplos e ferramentas adicionais que estão incluídas neste conjunto. Click no arquivo **InstATP116add** como é mostrado na Figura 1.5, para iniciar a instalação.

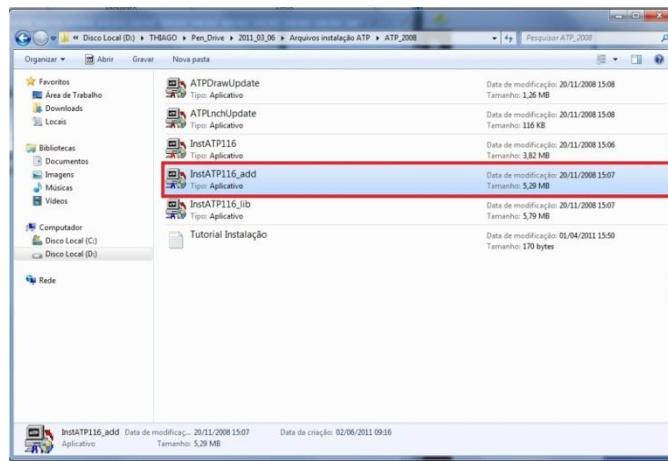


Figura 1.5 – Localização do Programa para execução do arquivo de adição do ATPDraw.

O processo de instalação é iniciado e a janela da Figura 1.6 é aberta. Para continuar a instalação, basta dar um click no botão **Install** na canto inferior direito da janela e aguardar alguns segundos em quanto os arquivos são copiados para a pasta selecionada.

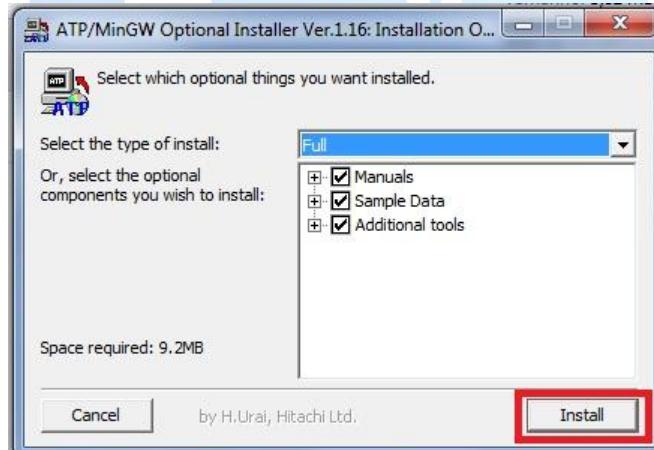


Figura 1.6 – Processo de Instalação.

Finalmente, click no botão **Close** no canto inferior direito da janela, como é mostrado na Figura 1.7.

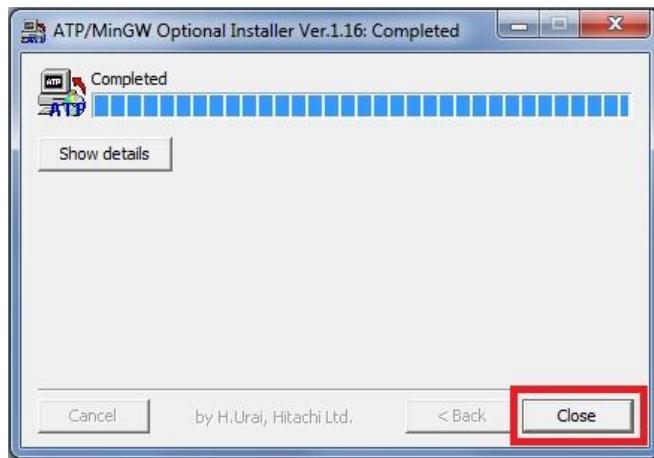


Figura 1.7 – Finalização do Processo de Instalação

Agora executa-se a instalação de uma versão atualizada do ATP. Click no arquivo **ATPLnchUpdate** como é mostrado na Figura 1.8 para iniciar a instalação.

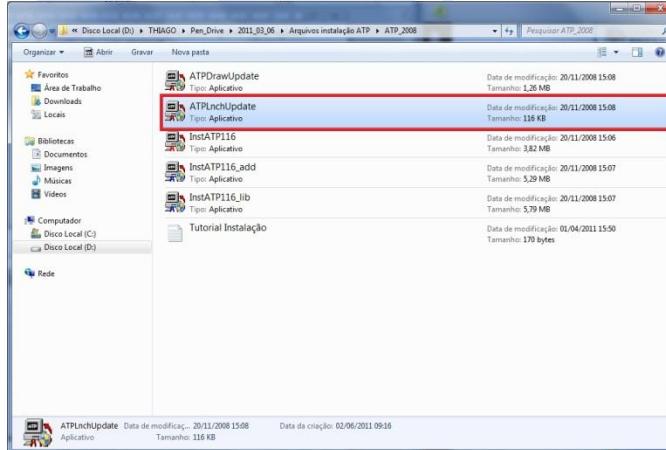


Figura 1.8 – Inicio do processo de instalação do complemento Launcher.

O processo de instalação é iniciado e a janela da Figura 1.9 é aberta. Para continuar a instalação, basta dar um click no botão **Sim** no centro da janela para confirmar a instalação das ferramentas e aguardar alguns segundos em quanto os arquivos são copiados para a pasta selecionada.

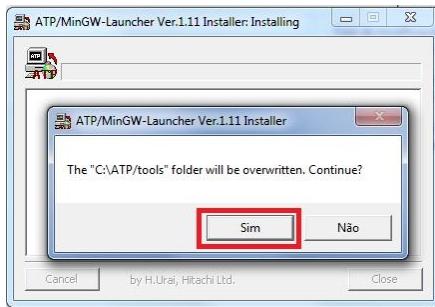


Figura 1.9 – Continuação do processo de instalação do complemento Launcher.

Para finalizar a instalação, click no botão **Close** no canto inferior direito da janela, como é mostrado na Figura 1.10.

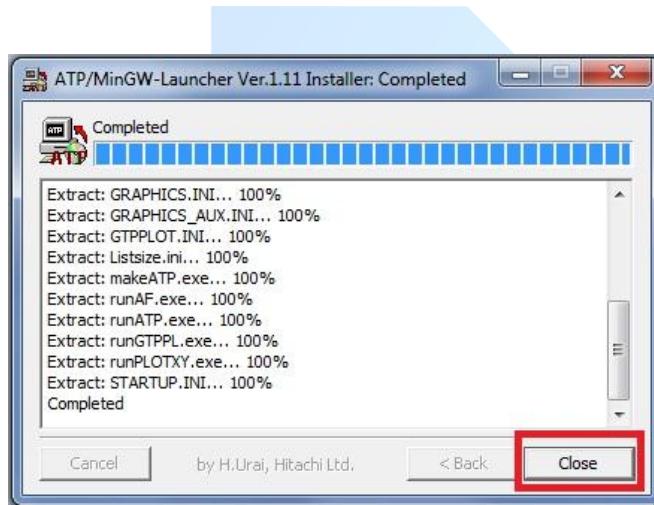


Figura 1.10 – Finalização do processo de instalação do complemento Launcher.

A partir deste, instala-se o update Instalador do ATPDraw. Click no arquivo **ATPDrawUpdate** como é mostrado na Figura 1.11 para iniciar a instalação.

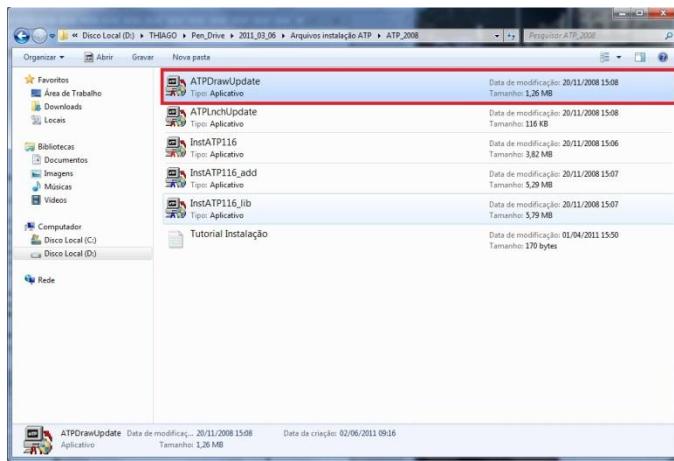


Figura 1.11 – Início do processo de instalação do complemento ATPDraw.

O processo de instalação é iniciado e a janela da Figura 1.12 é aberta. Para continuar a instalação, basta dar um click no botão **Sim** no centro da janela para confirmar a instalação das ferramentas e aguardar alguns segundos em quanto os arquivos são copiados para a pasta selecionada.

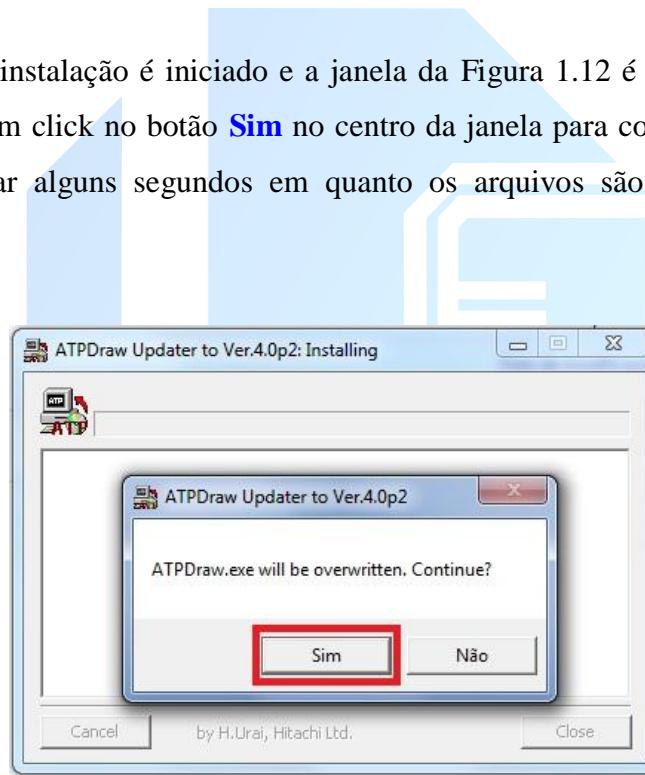


Figura 1.12 – Continuação do processo de instalação do complemento ATPDraw

Para finalizar a instalação, click no botão **Close** no canto inferior direito da janela, como é mostrado na Figura 1.13.

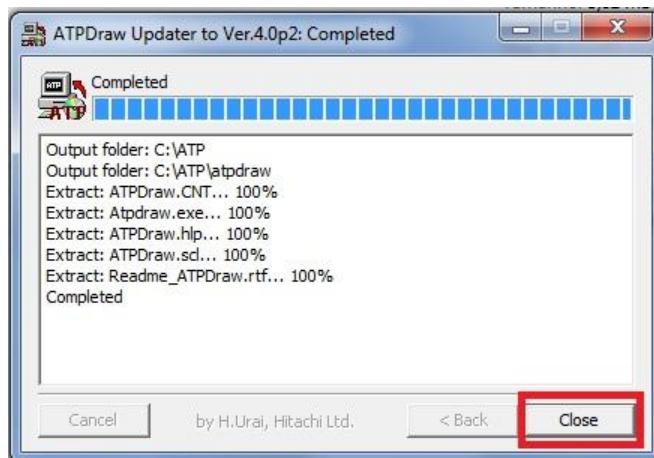


Figura 1.13 – Finalização do processo de instalação do complemento Launcher.

Por fim, e não menos importante, instala-se uma atualizada do biblioteca do ATPDraw. Click no arquivo **InstATP116.lib.exe** como é mostrado na Figura 1.14 para iniciar a instalação.

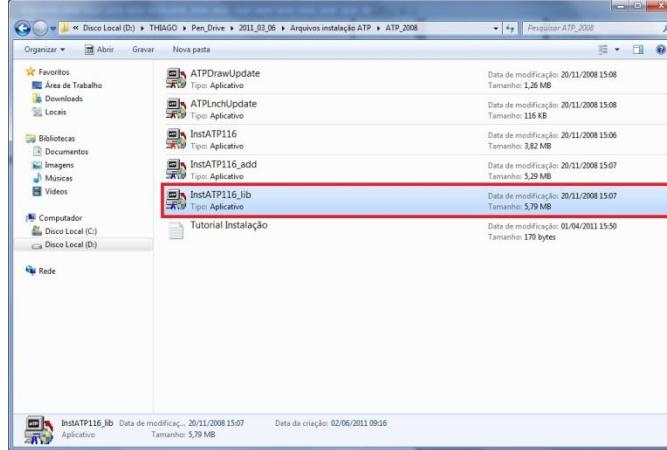


Figura 1.14 – Inicio do processo de instalação do complemento da biblioteca do ATPDraw.

O processo de instalação é iniciado e a janela da Figura 1.15 é aberta. Para continuar a instalação, basta dar um click no botão **Install** na canto inferior direito da janela e aguardar alguns segundos em quanto os arquivos são copiados para a pasta selecionada.

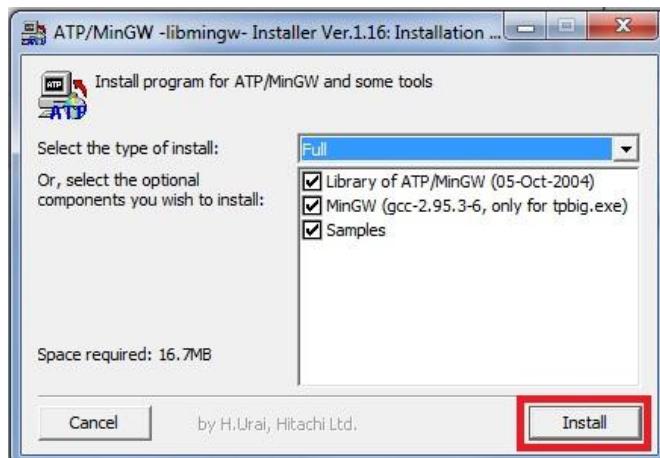


Figura 1.15 – Continuação do processo de instalação do complemento da biblioteca do ATPDraw.

Finalmente, click no botão **Close**, como é mostrado na Figura 1.16.

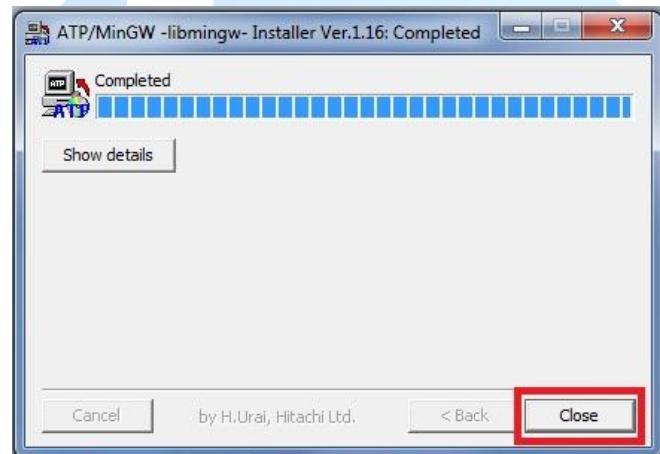


Figura 1.16 – Finalização do processo de instalação do complemento da biblioteca do ATPDraw.

1.3- Abrindo o programa pela primeira vez

Clique em Iniciar – Todos os Programas, assim como mostrado na Figura 1.17.



Figura 1.17

Vá à pasta ATP, assim como mostrado na Figura 1.18.

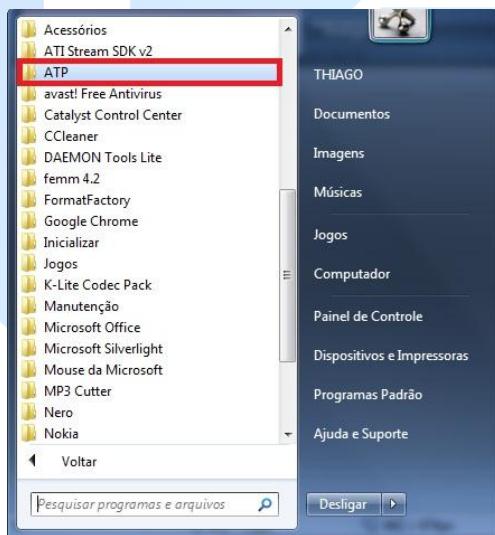


Figura 1.18

Abra o programa designado por ATPDraw, assim como mostrado na Figura 1.19.

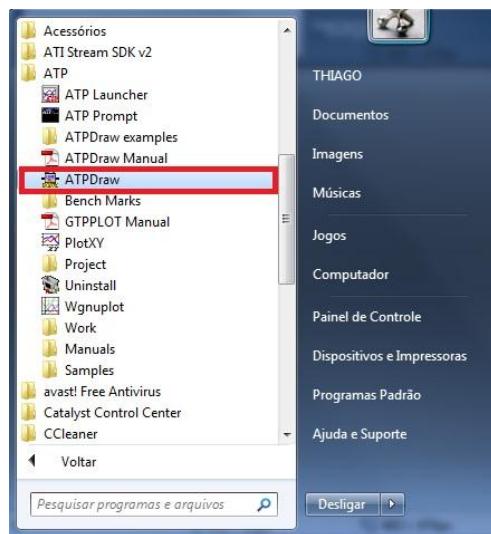


Figura 1.19

A Figura 1.20 ilustra a primeira tela do programa. Pode-se constar que somente duas opções são possíveis em um primeiro momento. A primeira seria a opção que abrir um documento em branco para criação do circuito desejado, e a segunda a abertura de um arquivo no qual um circuito já fora salvo de antemão .

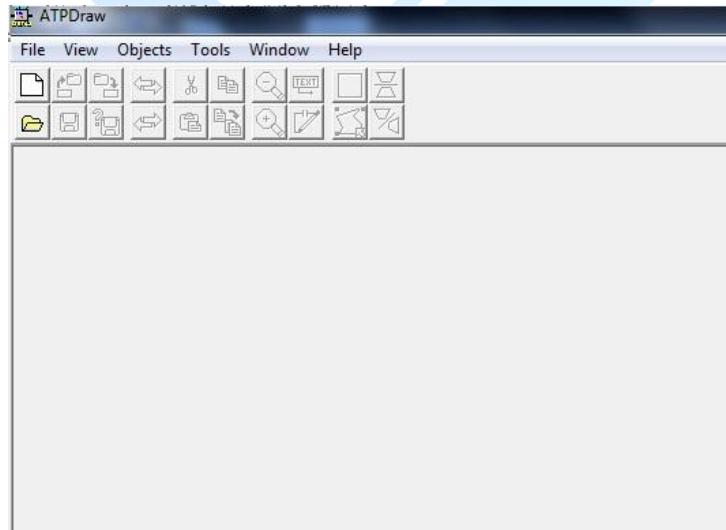


Figura 1.20



1.4 - Conhecendo o programa

1.4.1 – Conhecimento da Biblioteca do ATPDraw

Após a instalação de todos os componentes pertencentes ao pacote de agregação do ATPDraw e aberto o programa pela primeira vez, o primeiro passo é saber o que já está disponível na biblioteca do programa, ou seja, os itens que já estão modulados. Para isso clica-se

no ícone para abertura de pastas de arquivos e segue-se o caminho: **C:\ATP\Project\Example**. Entre o conteúdo desta pasta se encontra simulações diversas e um arquivo chamado **All.adp**. Abra esse arquivo conforme Figura 1.21.

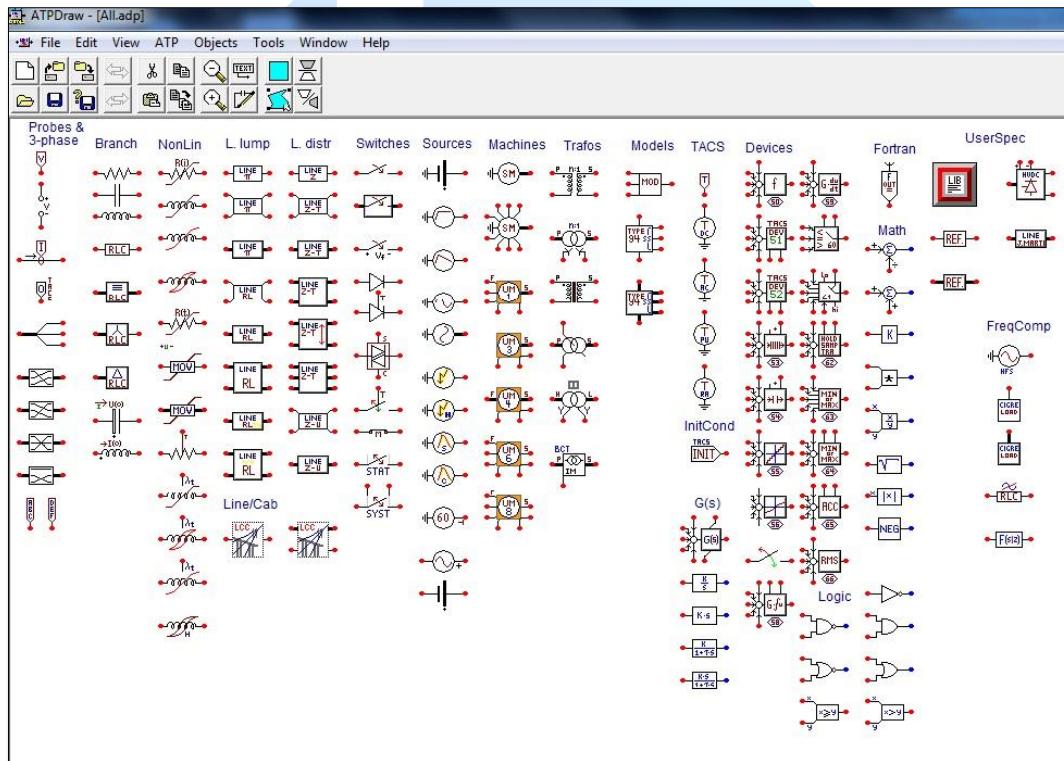


Figura 1.21 – Amostra da biblioteca do ATPDraw

Para exemplificação e conhecimento, abra na pasta de arquivos o Anexo 1 de forma que nesta contém um arquivo detalhado de cada componente. Deve-se a partir desta, ter discernimento da forma de operação de cada componente para agregar ao circuito proposto.



1.4.2 – Localização dos Componentes

A localização dos componentes se dá, uma vez dentro do programa, com um clique do botão DIREITO do mouse, assim como mostra na Figura 1.22.

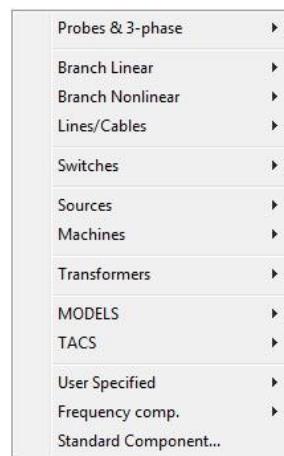


Figura 1.22 – Abertura de Componentes da Biblioteca do ATPDraw

Uma vez aberta essa janela, pode distinguir os respectivos grupos de abrangência nos quais cada um dos pré-modulados componentes elétricos se encontram. Então, pode separar estes entre:

- Probes & 3-phase – Medidores e Splitters (Ex: Medidores de tensão e Corrente, TACS, etc)
- Branch Linear – Ramos Lineares (Ex: Resistencia, Indutância, Capacitância, etc)
- Branch Nonlinear – Ramos Não Lineares (Ex: Resistencia Não Linear, Indutância Não Linear, etc)
- Lines/Cables – Modelos de Linhas e Cabos (Linhas de Parâmetros Distribuidos e Agrupados)
- Switches – Chaves (Ex: Chave temporizadas, Diodo, Válvula, Chave TACS, etc)
- Sources - Fontes de Tensão e Corrente (Ex: Fonte de Tensão Contínua e Alternada, Rampas, etc)
- Machines – Motores Elétricos (Ex: Motor de Indução, Motor de Corrente Contínua, etc)



- Transformers – Transformadores (Ex: Transformadores Lineares, Não Lineares, De Dois ou Três Enrolamentos, etc)
- MODELS
- TACS (Ex: Fontes TACS, Acomplamento de Circuitos, Funções de Transferência, Portas Lógicas, etc.)
 - User Specified
 - Frequency Comp. – Componentes no Domínio da Frequência (Ex: Fonte Harmonica de Tensão ou Corrente)
 - Standard Components

1.4.3 – Criação de um Circuito no ATPDraw

Para exemplificação da montagem do circuito elétrico no programa ATPDraw, escolheu-se o procedimento de montagem de um dos circuitos elétricos mais básicos. Um fonte de tensão contínua de 100V em uma resistência de 10R, bem como uma medidor de corrente e outro de tensão. Portanto, para iniciar a montagem do circuito temos primeiro que localizar os componentes.

Para localizar a fonte de tensão contínua, clica-se com o botão direito na tela em branco do ATPDraw, vá até o grupo SOURCES, e clique com o botão esquerdo no item DC Type 11, como mostrado na Figura 1.23. O motivo pelo qual se escolhe a fonte do Tipo 11 e não a DC UNDERGROUNDED é justamente pelo fato que um dos terminais da fonte do tipo 11 já está aterrado.

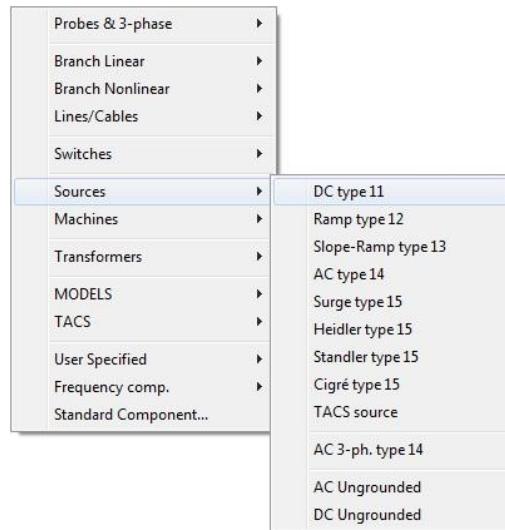


Figura 1.23 – Localização da Fonte DC tipo 11

Nota-se que no primeiro momento a fonte se encontra na direção horizontal e na cor vermelha. Pois bem, o primeiro passo será colocar a fonte em posição vertical. Para isso seleciona-se a fonte e clica-se com o botão direito, esta, por sua vez, rotacionará 90 graus em sentido anti horário e ficará em posição vertical, como mostrado na Figura 1.24.

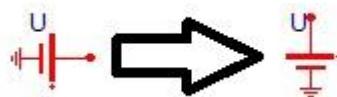


Figura 1.24

Após efetuado a conversão, posicione a fonte próximo ao canto superior esquerda da sua tela do ATPDraw. Para efetuar a parametrização da mesma efetue um duplo clique o ícone. Aparecerá uma tela, assim como mostrado na Figura 1.25, para inserção dos seguintes dados:

- Amp – Amplitude da fonte de Tensão
 - Neste local mude o valor para 100
- Tsta – tempo para inicio do funcionamento da fonte
- Tsto – Tempo para fim do funcionamento da fonte

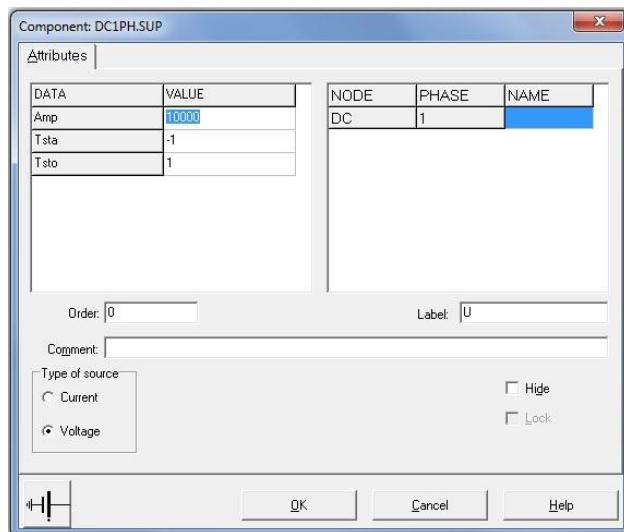


Figura 1.25 – Parametrização da Fonte DC tipo 11.

A conclusão da parametrização e o clique no botão OK tomará a fonte na cor preta o que implica que esta já foi parametrizada, assim como mostrado na Figura 1.26.

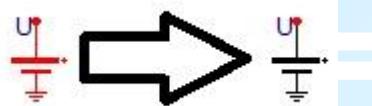


Figura 1.26

O próximo passo é a inserção no circuito de uma resistência. Para isso clica-se novamente com o botão direito na parte em branco do ATPDraw, vá no grupo dos BRANCH LINEAR, e de um clique com o botão esquerdo em RESISTOR, assim como mostrado na Figura 1.27. A partir desta, assim como efetuado no exemplo anterior, posiciona-o na posição vertical e à direita de onde foi posicionada a fonte. Dê um duplo clique com o botão esquerdo para parametrizar o componente, e no parâmetro RES insira o valor 10, assim como mostrado na Figura 1.28.

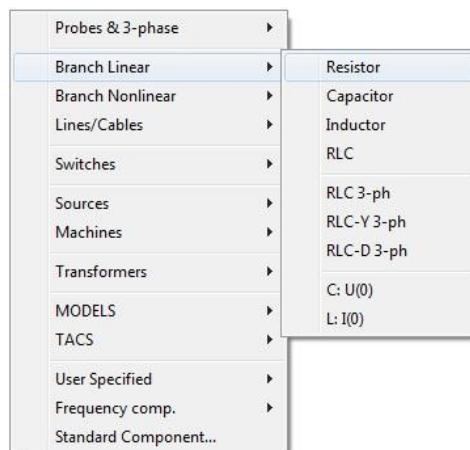


Figura 1.27

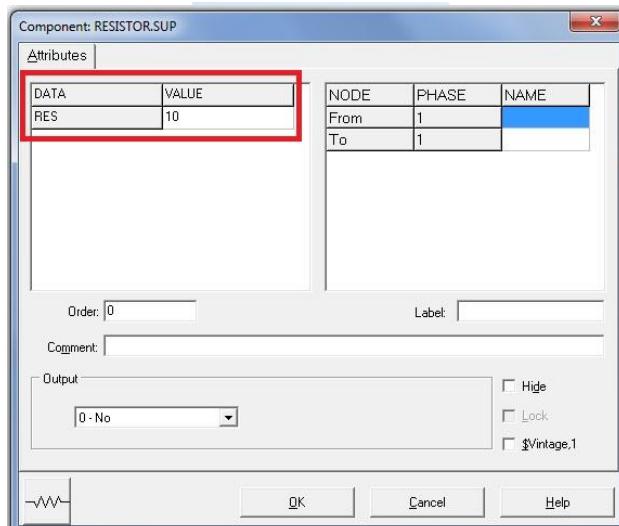


Figura 1.28

Partiremos para a fase final da construção do circuito: a inserção dos medidores de tensão e corrente. Para a inserção de um medidor de tensão, seguindo sempre a mesma linha, basta clicar com o botão direito na parte em branco do ATPDraw, ir ao grupo PROBES & 3-PHASE, e selecionar o componente PROBE VOLT, assim como mostrado na Figura 1.29.

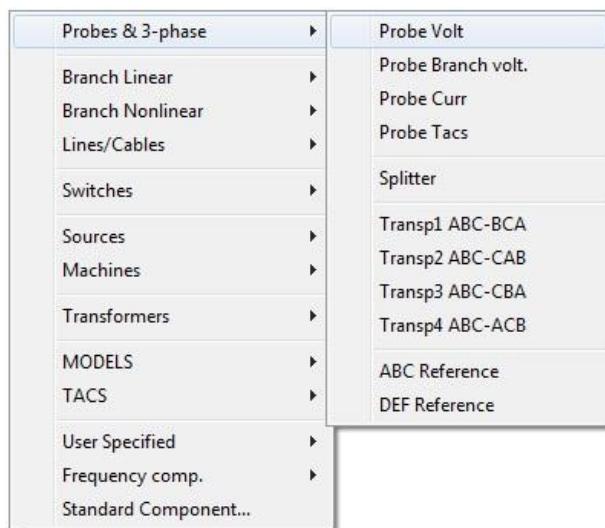


Figura 1.29.

Procede-se da mesma forma para parametrização do componente. A partir de um duplo clique no item aparecerá uma janela conforme Figura 1.30. Nesta seleciona-se se a medidor é monofásico ou trifásico. Para o caso de se trifásico, habilita-se opções para visualização de uma, duas ou todas as fases. Após efetuado a parametrização, posiciona-se este diretamente em cima do ponto da fonte DC tipo 11.

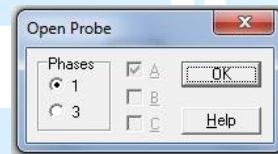


Figura 1.30

Após efetuado os parâmetros do medidor de tensão, o próximo passo é o medidor de corrente. Como o padrão segue, a Figura 1.31 ilustra a posição onde se encontra o medidor de corrente dentro do grupo PROBE & 3-PHASE. O nome do medidor é PROBRE CURR, e basta um clique com o botão esquerdo que este estará disponibilizado para parametrização.

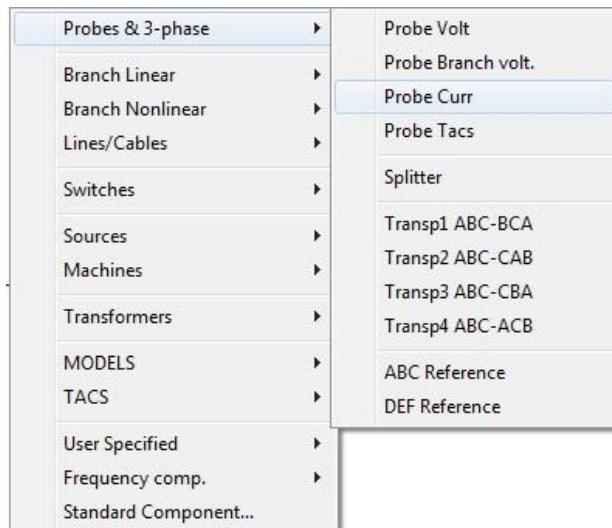


Figura 1.31

Procede-se da mesma forma para parametrização do componente. A partir de um duplo clique no item aparecerá uma janela conforme Figura 1.32. Nesta seleciona-se se a medidor é monofásico ou trifásico. Para o caso de se trifásico, habilita-se opções para visualização de uma, duas ou todas as fases. Após efetuado a parametrização, posiciona-se este entre a fonte DC tipo 11 e a resistência.

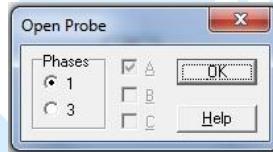


Figura 1.32

É importante ressaltar que se não houverem solicitações para saída de dados no PLOTXY, o ATPDraw não irá RODAR, ou seja, se não for solicitado alguma medição no circuito, seja ela de tensão, corrente ou TACS, o circuito não apresentará resultado algum.

A duas ultimas coisas a serem feitas é a ligação entre os componentes e a dar referência a outra extremidade do resistor. Para isso de um clique duplo na extremidade “inferior” do resistor e uma janela, assim como na Figura 1.32 irá aparecer. Nesta se selecionará a opção GROUND de forma a aparece no circuito a referia do TERRA.

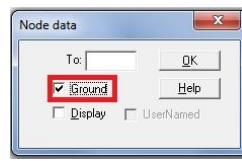


Figura 1.33

O circuito final ficará assim como na Figura 1.34.

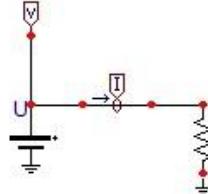


Figura 1.34

Uma observação a ser feita neste ponto é o fato que o programa ATPDraw disponibiliza em uma caixa na parte superior todos os componentes já utilizados a partir da abertura do circuito, de forma a se na ocasião existir a necessidade de se adicionar um item igual, este já se encontra em uma espécie de atalho, como mostrado na Figura 1.35.

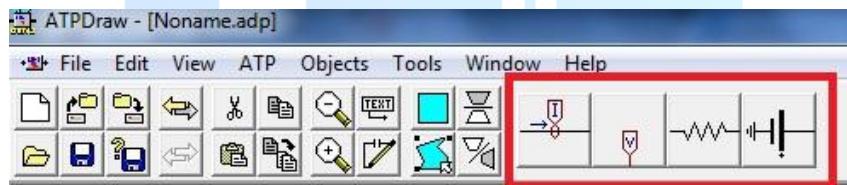


Figura 1.35

1.4.4 – Configuração da simulação

Com o circuito elétrico pronto para ser rodado, parte-se para uma nova etapa: A etapa da configuração da simulação. Para isso clicaremos no menu ATP e iremos na opção SETTINGS. Se preferir o uso de teclas de atalho, a opção F3 destinada a esta aba, assim como mostrado nas Figura 1.36

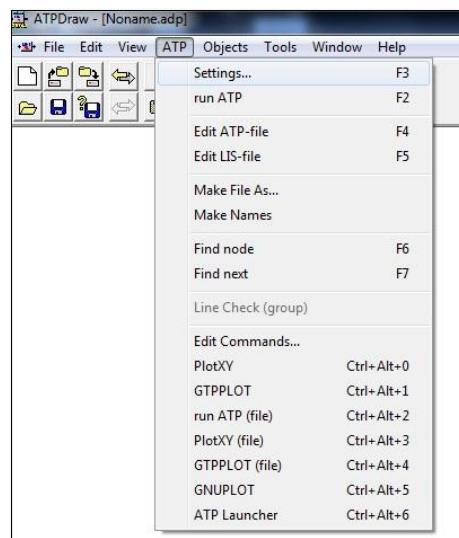


Figura 1.36 – Menu ATP – SETTINGS

Nesta abrirá uma janela com várias. Esta janela dá abertura a parâmetros de simulação para o caso que deseja ser rodado. Dentre as inúmeras opções de adequação da simulação, neste primeiro passo, no focaremos o nosso estudo na aba SIMULATION, assim como mostrado na Figura 1.37.

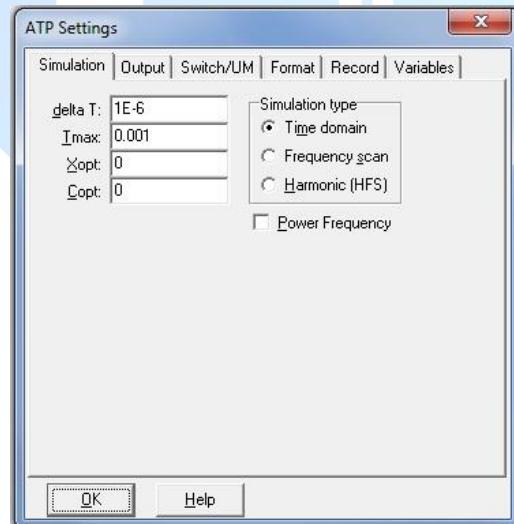


Figura 1.37 – Aba Simulation em Atp Settings.

Nesta aba algumas opções estão disponibilizadas, portanto faz-se agora uma descrição de cada um dos itens que podem ser alterados/marcados:



- Delta T – É o passo de integração no qual a simulação, pelo seu método número, irá integrar o tempo de simulação;
- Tmax – É o tempo máximo da simulação em segundos (Independentemente do tempo de simulação de cada uma das fontes);

Se habilitada a opção POWER FREQUENCY, um novo espaço irá se abrir, com o nome de FREQ. (Vale ressaltar que esta opção só se faz necessário se o tipo de estudo que estiver sendo realizado o exige, ou se o usuário possui esta certa conveniência), assim como mostrado na Figura 1.38.

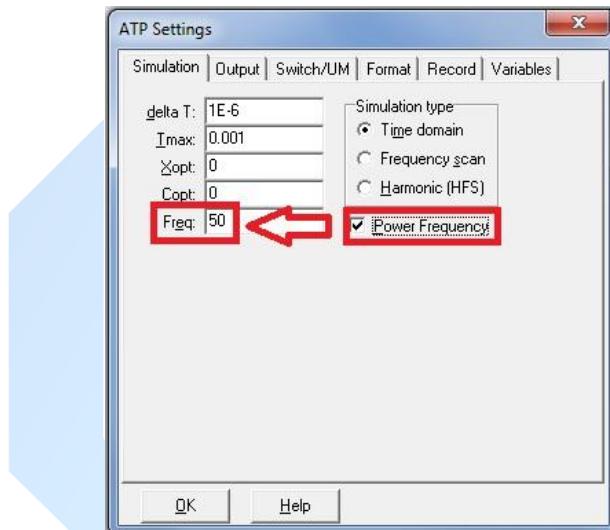


Figura 1.38 – Solicitação da opção Power Frequency

- Xopt - Se $X_{opt} = 0$, então as indutâncias dos componentes devem ser informadas na unidade [mH], caso contrário deve ser informado a reatância indutiva do componente em [Ohm];
- Se $C_{opt} = 0$, então as capacitâncias informadas devem estar em [μF], caso contrário a reatância capacitativa do componente em [$\mu \Omega$ - Micro Mho];
- Freq – Frequencia do Sistema;

Na área de destaque, dado por nome SIMULATION TYPE, como mostrado na Figura 1.39, pode optar por três tipos de simulação:

- Time Domain – Domínio do Tempo

- Frequency Scan - Dominio da Frequencia
- Harmonic (HFS) – Componentes harmônicas da frequênci fundamental (HPS significa – High Frequency Source – Fonte Harmônica de Alta Frequency)

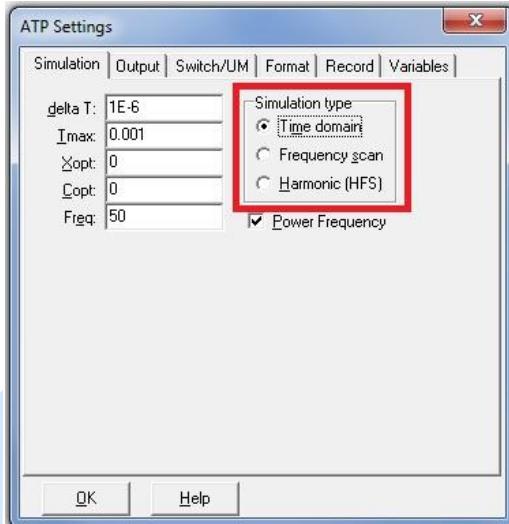


Figura 1.39 – Tipo da Simulação

Se a Opção FREQUENCY SCAN é habilitada então mais algumas janelas são habilitadas, conforme Figura 1.40.

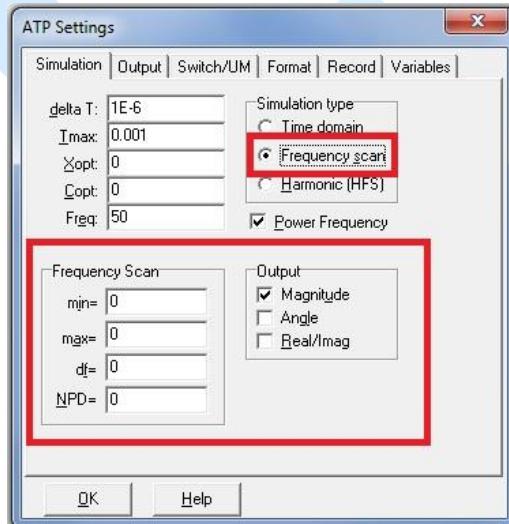


Figura 1.40 – Habitação da opção Frequency Scan.

A partir desta habilitação, os campos devem ser preenchidos da seguinte forma na área de FREQUENCY SCAN:



- Min - Frequência inicial para a análise da frequency scan;
- Max - Frequência final para a frequency scan;
- Df - Incremento da frequência.
- NPD - Número de freqüências por década em logarithmic scan.

O campo OUTPUT têm por descrição dos itens como sendo:

- Magnitude – Plota somente a Magnitude dos fasores analisados;
- Angle – Plota o ângulo da Magnitude dos fasores utilizados;
- Rel/mag – Plota os fasores em escala no tipo retangular;

Para a habilitação do item HARMONIC (HFS), somente o campo OUTPUT é aberto, como mostrado na Figura 1.41. Os itens a ele contemplados seguem a mesma linha de raciocínio quando o campo é habilitado há opção FREQUENCY SCAN.

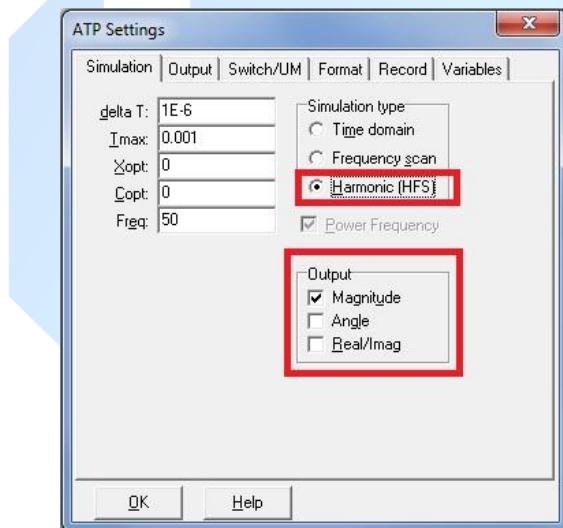


Figura 1.41 – Habilitação da Opção Harmonic (HFS)

1.4.5 – Saída de dados

Uma vez feito o circuito e preparado as configurações para simulação, faz-se NECESSÁRIO SALVAR o circuito antes de ser rodado. Este salvamento se faz necessário pelo motivo o qual o ATPDraw necessita da criação de três arquivos para salvar os dados: Um arquivo do tipo “.ATP”, arquivo tipo “.PL4” e outro do tipo “.LIS”.



- O arquivo do tipo “.ATP” é onde são salvos os cálculos que foram desenvolvidos para execução do circuito elétrico. Este arquivo é o que necessitará de um maior espaço no HD;
- O arquivo do tipo “.PL4” é onde será salvo os dados referentes a plotagem dos pontos em função do tempo, ou em função de uma outra variável;
- O arquivo do tipo “.LIS”, que pode ser aberto pelo programa Bloco de Notas ou mesmo o WordPad, é um arquivo no qual possui a descrição dos elementos utilizados para execução do circuito, o numero e nomes do pontos do circuito, e é também neste que se constata a ocorrência que algum erro durante a simulação;

Portanto, ao salvar o seu arquivo, o ATPDraw criará um extensão do tipo “.ADP” afim de salvar graficamente o que fora “desenhado” na folha em branco, ou seja, o circuito propriamente dito. Para salvar o arquivo procede-se da seguinte forma: Vá ao menu FILE, no item SAVE AS, e digite o nome do arquivo, como mostrado na Figura 1.42. É importante ressaltar que o nome do arquivo NÂO DEVE CONTER ESPAÇOS, portanto, o uso do UNDERLINE (_) pode ser utilizado para produzir um espaçamento entre as palavras. Outra dica que é muito útil é salvar seus arquivos na pasta C:\ATP\WORK, pois é nesta que todas as vezes que houver uma solicitação de abertura de arquivo será onde o ATPDraw irá procurar o arquivo. Logicamente, isto não impede o usuário de salvar o arquivo em qualquer outra pasta dentro de seu HD.

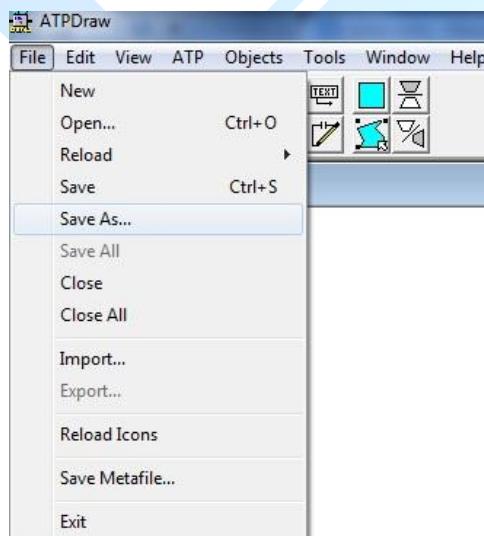


Figura 1.42



Tendo executado todos os passos em questão, iremos rodar o circuito em questão, a fim de se produzir os gráficos solicitados. Para a execução do circuito, Vá até ao menu ATP e selecione ATP RUN, como mostrado na Figura 1.43, caso prefira usar uma tela de atalho, a função F2 serve para executar esse comando.

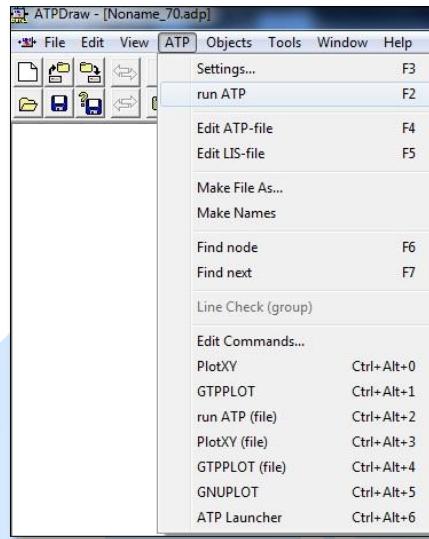


Figura 1.43

Após executado este passo, primeiro faz-se a busca de algum erro detectado na simulação do ATPDraw. Este erro pode ser desde um aterramento que está faltando até uma linha de comando da MODELS que não foi reconhecida. Para executar essa tarefa, devemos recorrer ao arquivo “.LIS” que foi gerado pelo programa ATPDraw. A fim de proceder essa tarefa, vá novamente ao meu ATP, no item EDIT LIS-FILE, como mostrado na Figura 1.44, ou se preferir use a tecla de atalho F5.

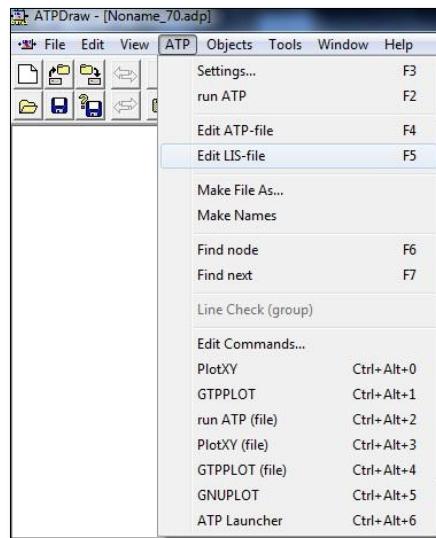


Figura 1.44

Nesta será apresentado um arquivo que se assemelha muito a um arquivo “.TXT”, no qual estará a descrição completa do circuito, como é ilustrado na Figura 45. Para saber se ouve algum erro durante a simulação, desça com a barra de rolagem do arquivo e procure a mensagem de ERRO, como mostrado na Figura 1.46. Caso houver erro, existirá alguma instrução que deverão ser seguida a fim de solucionar o problema. Vale ressaltar que por mais que existam mais que um erro durante a simulação, o arquivo “.LIS” irá apresentar somente o primeiro que ele encontrar. Após a nova execução do circuito, pelo atalho da tecla F2 ou pelo menu ATP RUN, este irá apresentar o novo erro que deverá ser corrigido.



Figura 1.45- Arquivo .LIS gerado pelo ATPDraw

Figura 1.46- Erro detectado no arquivo .LIS gerado pelo ATPDraw



Partindo da premissa que não houve nenhum erro na execução do arquivo e/ou os erros foram solucionados, partiremos agora para plotagem do arquivo “.PL4” através da ferramenta PLOTXY, que é a ferramenta de plotagem que o ATPDraw utiliza para gerar os gráficos em função do tempo. Para executar a plotagem do arquivo, vá ao menu ATP e clique no item PLOTXY, ou se preferir usar teclas de atalho, dê o comando Ctrl+Alt+0 e este abrirá. A Figura 47 ilustra o PLOTXY para o caso simulado.

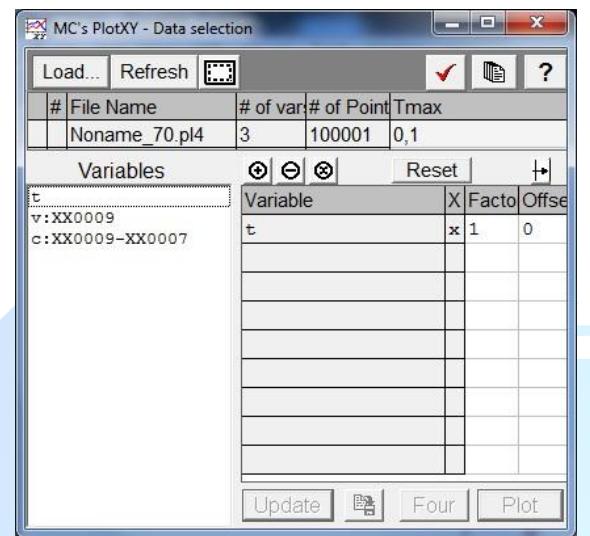


Figura 1.47 – Janela do PlotXY

Na primeira vista ao PlotXY visualizamos itens como:

- FILE NAME - Nome do Arquivo;
- # of var - Número de Variáveis;
- # of Points - Numero de pontos;
- Tmax - Máximo tempo de simulação.

Verificamos também três operações matemáticas que poderão ser executadas com as variáveis, são estas: (obs.: Pra utilizar qualquer uma destas operações, primeiro aperte na operação desejada, e com o botão esquerdo, selecione as duas grandezas)

- Soma \oplus ;
- Subtração \ominus ;
- Multiplicação \otimes ;



Podemos ver também alguns botões como:

- Plot - para plotagem das curvas;
- Four - Para execução da série de Fourier;
- Update - Para recarregar o gráfico;
- Load - Para carregar um arquivo do tipo PL4;
- Refresh - Para recarregar o mesmo arquivo do tipo PL4;
- Reset - Para limpar as variáveis selecionadas;

E alguns ícones como:

- Save Variables - Exporta os pontos contidos no gráfico em algumas extensões que podem ser lidas por alguns programas (Ex. .MAT e .ADF)
- Fixed-Scale Refresh - Fixa a escala no zoom que foi dado e adequa as novas curvas para que estejam em consonância com o zoom da curva anterior;
- Program Option - Opções de Plotagem e Fourier;
- Allow Multiple Files - habilita a entrada de mais de um arquivo PL4 no qual várias análises podem ser efetuadas usando arquivos PL4 diferentes (No máximo três arquivos);
- About - Ferramenta para ajuda ao PLOTXY;

O primeiro passo será a plotagem da tensão, em função do tempo. Para isso, com o botão esquerdo, selecione v:xx0009 (que é o nome do ponto que foi gerado pelo ATP no circuito e pode ser convenientemente alterado pelo usuário) e aperte no botão PLOT, como mostrado na Figura 1.48. A imagem resultante é ilustrada na Figura 1.49.

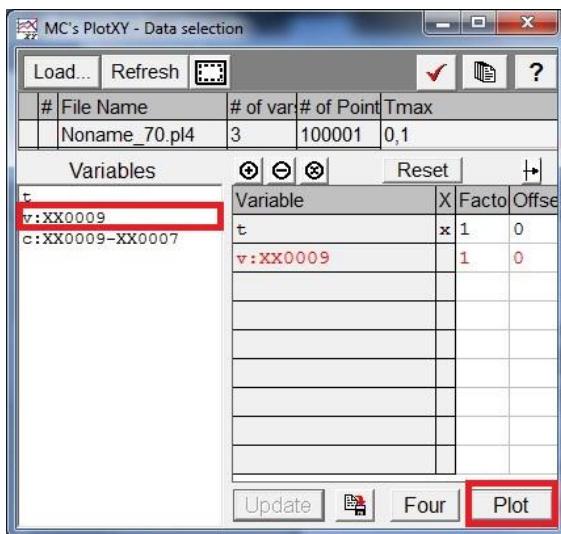


Figura 1.48

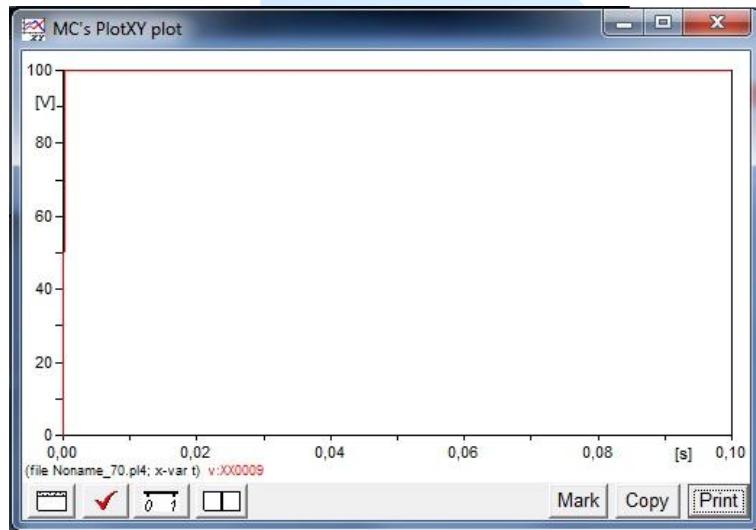


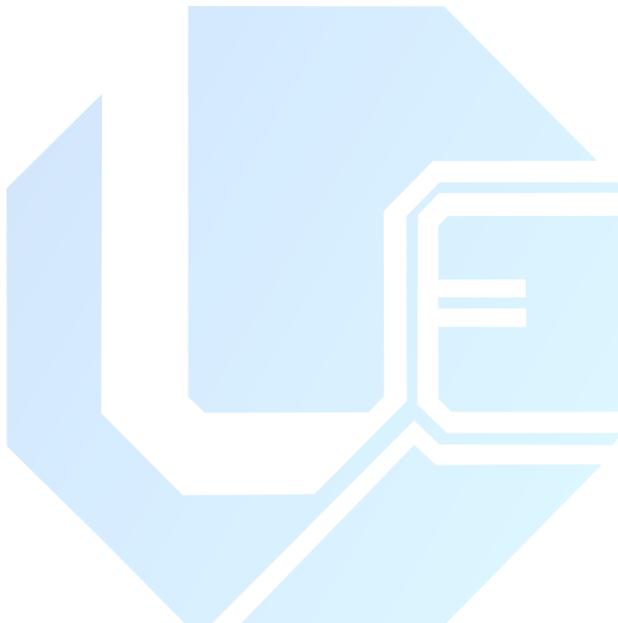
Figura 1.49

É perceptível, que na abertura do plot, além da curva produzida pela fonte de tensão, é possível visualizar mais alguns ícones como:

- Show Title - Mostra um Título - que pode ser alterado – para a curva em questão;
- Costumise Plot - Opções de visualização da escala e outros aspectos do gráfico;



- Manual Scale - Mudança manual da escala do eixo Y;
- Show Cursor - Cursos que auxilia a ver o valor instantâneo da curva;
- Mark - Diferencia as linhas através da inserção de pequenos objetos, como quadrados e círculos, sobreposta ao caminho das curvas;
 - Copy - Copia os pontos da curva plotada
 - Print - Enviar dados para impressão da curva;





2 - MODELAGEM E SIMULAÇÕES DE CIRCUITOS ELEMENTARES – RL, RC, RLC

2.1 – Introdução

O estudo sobre Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência se baseia em conceitos básicos de circuitos com parâmetros concentrados e em noções de propagação de ondas eletromagnéticas em circuitos com parâmetros distribuídos. No cálculo de transitórios eletromagnéticos e na simulação digital de circuitos elétricos lineares, faz-se necessário converter as equações diferenciais que relacionam tensão e corrente nos elementos do circuito por relações algébricas. Neste material fornecemos um resumo sobre a modelagem dos componentes elementares (resistor, indutor e capacitor) em circuitos equivalentes discretos. Nestes modelos, as fontes representam as informações da história do sistema.

Para iniciarmos o estudo de transitórios eletromagnéticos nós realizamos a simulação de circuitos elétricos simples, cuja solução analítica é conhecida. Com os conceitos básicos da teoria de circuitos elétricos, será modelado e analisado no aplicativo ATPDraw três circuitos conhecidos: RC, RL e RLC . Os objetivos deste experimento são relatar a eficiência da modelagem dos componentes, demonstrarem as qualidades da ferramenta ATP na análise de circuitos elétricos e integrar os conceitos da teoria de circuitos elétricos em uma aplicação da Engenharia Elétrica.

2.2 - Elementos Básicos

Para realizar uma melhor análise de circuitos elétricos, é necessário um conhecimento nos três elementos básicos encontrados: resistor, capacitor e indutor.

• Resistores

Considere um resistor linear, mostrado na figura 2.1, cuja equação característica é dada por:

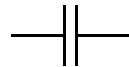


$$v = r \cdot i$$

Figura 2.1 – Resistor linear

- **Capacitores**

Considere um capacitor linear, mostrado na figura 2.2, cuja equação característica é dada por:



$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

Figura 2.2 – Capacitor linear

- **Indutores**

Considere um indutor linear, mostrado na figura 2.3, cuja equação característica é dada por:

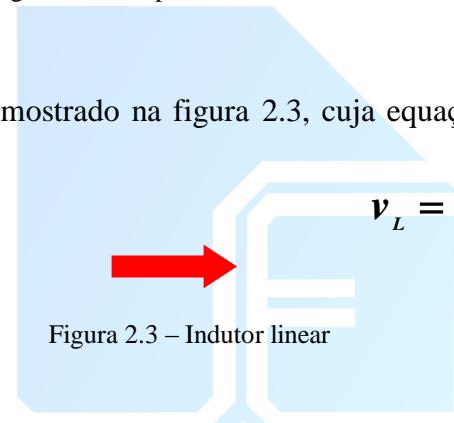


Figura 2.3 – Indutor linear

2.3 - Utilizando ATPDraw

Ao abrir o aplicativo ATPDraw e clicar com o botão direito do mouse, uma aba com os componentes existentes será aberta conforme ilustrado pela figura 2.4.

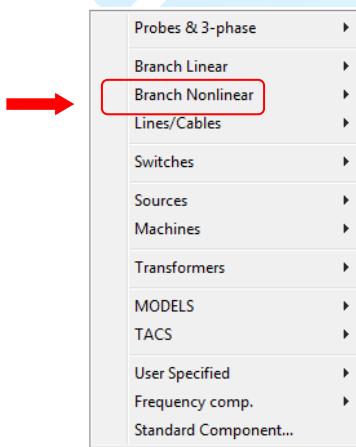


Figura 2.4 – Componentes Existente no ATPDraw



Ao selecionar **Branch Linear**, elementos lineares, os seguintes componentes poderão ser escolhidos de acordo com a figura 2.5.

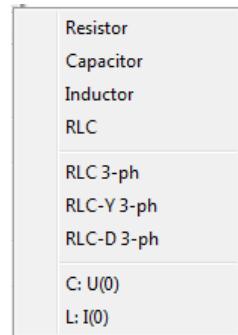


Figura 2.5 – Componentes lineares

A seguir uma descrição de cada componentes:

- Resistor:

O valor da resistência é dado em ohms (Ω) conforme figura 2.6.

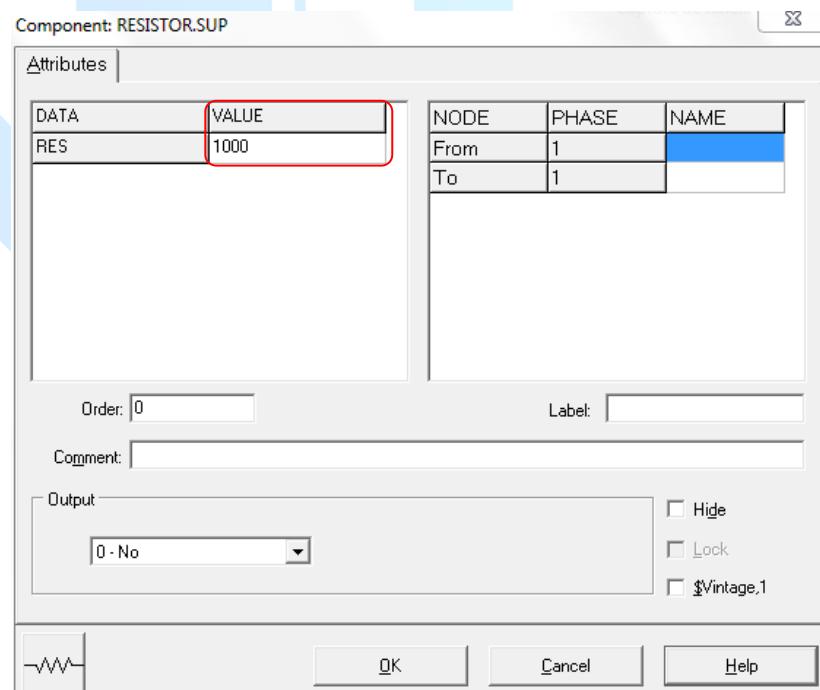
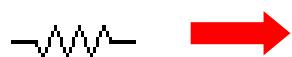


Figura 2.6 – Resistência e tela de parametrização



- Capacitor:

A unidade da capacitância pode ser em μF ou μmhos de acordo com o valor de Copt, em destaque na figura 2.7, nas configurações iniciais do ATPDraw.

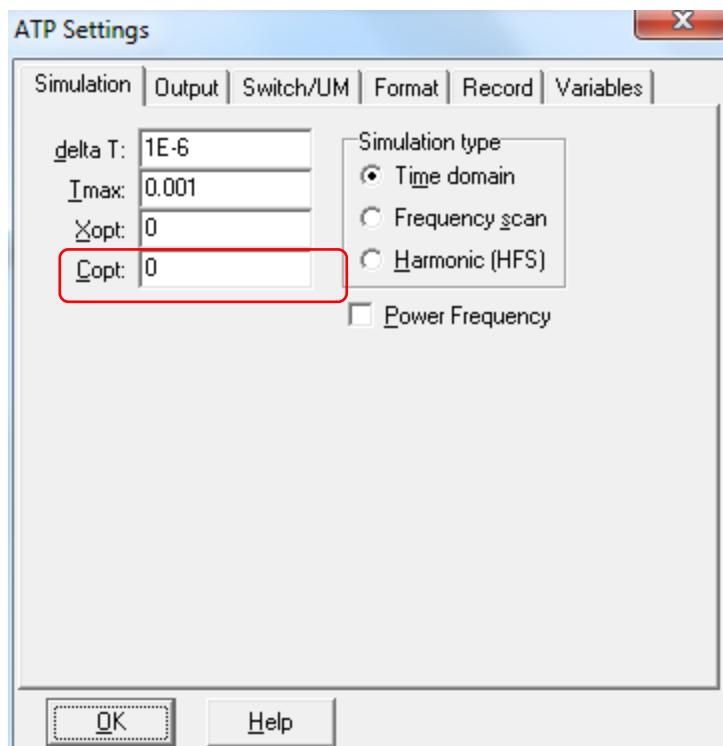


Figura 7 – Tela de configurações iniciais do ATPDraw

Se $Copt = 0$: A unidade da capacitância será μF

Se $Copt = Power frequency$: A unidade da capacitância será μmhos

Conforme ilustrado pela figura 2.8, o capacitor possui duas variáveis C e Ks, C é o valor da capacitância em μF ou μmhos e Ks o fator para a resistência em série com o capacitor. O valor da resistência em série, representado por Rs , é diretamente proporcional com o fator Ks cuja formulação é representada abaixo.

$$\text{Rs} = \text{Ks} * \text{DELTAT} / (2 * \text{C}) \text{ para COPT}=0$$

$$\text{Rs} = \text{Ks} * (\text{DELTAT} * \pi * \text{POWFREQ}) / \text{C} \text{ para COPT=POWFREQ}$$



Onde, DELTAT : passo de integração.

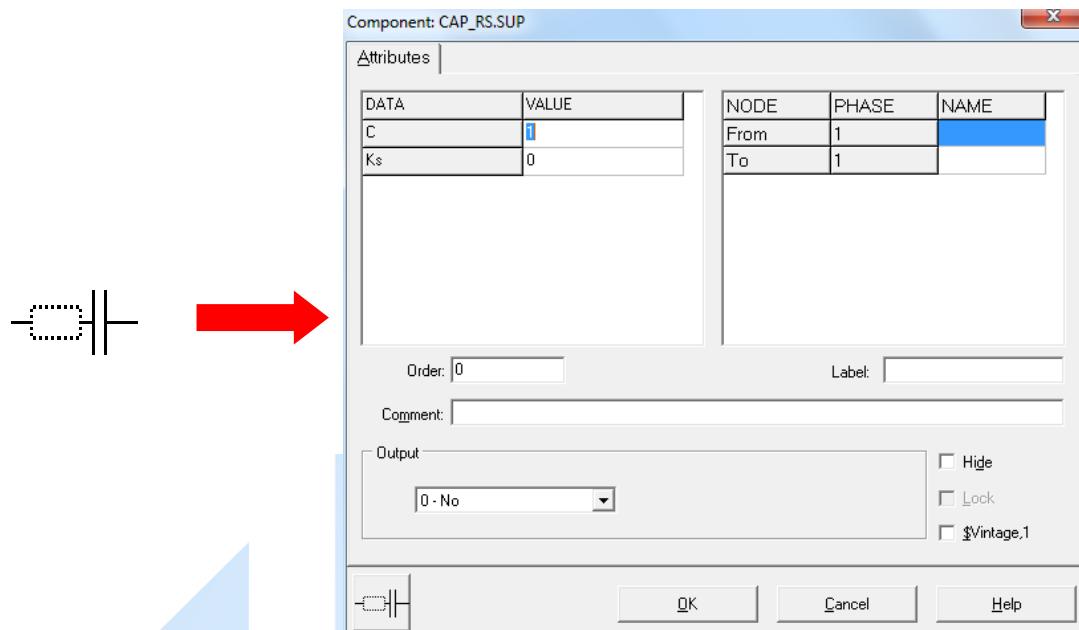


Figura 2.8 – Capacitância e tela de parametrização

- Indutor:

A unidade da indutância pode ser em mH ou ohms de acordo com o valor de Copt, em destaque na figura 2.7, nas configurações iniciais do ATPDraw.

Se **Copt = 0** : A unidade da indutância será mH

Se **Copt = Power frequency** : A unidade da indutância será ohms

Conforme ilustrado pela figura 2.9, o indutor possui duas variáveis L e Kp, L é o valor da indutância em mH ou ohms e Kp o fator para a resistência em paralelo com o indutor. O valor da resistência em série, representado por Rp, é diretamente proporcional com o fator Kp cuja formulação é representada abaixo.

$$Rp = Kp * 2 * L / DELTAT \text{ para } XOPT=0$$

$$Rp = Kp * X / (DELTAT * PI * POWFREQ) \text{ para } XOPT=POWFREQ$$

Onde, DELTAT : passo de integração.

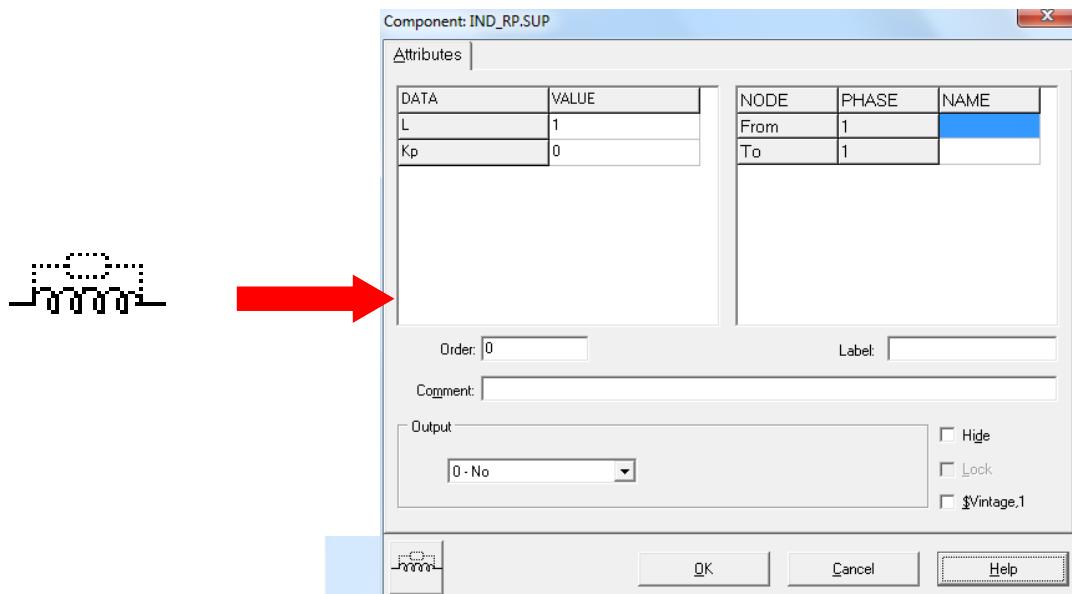


Figura 2.9 – Indutância e tela de parametrização

- Carga RLC:

A Carga **RLC** representa uma carga com uma resistência em paralelo com um capacitor e um indutor, conforme demonstrado pela figura 2.10.

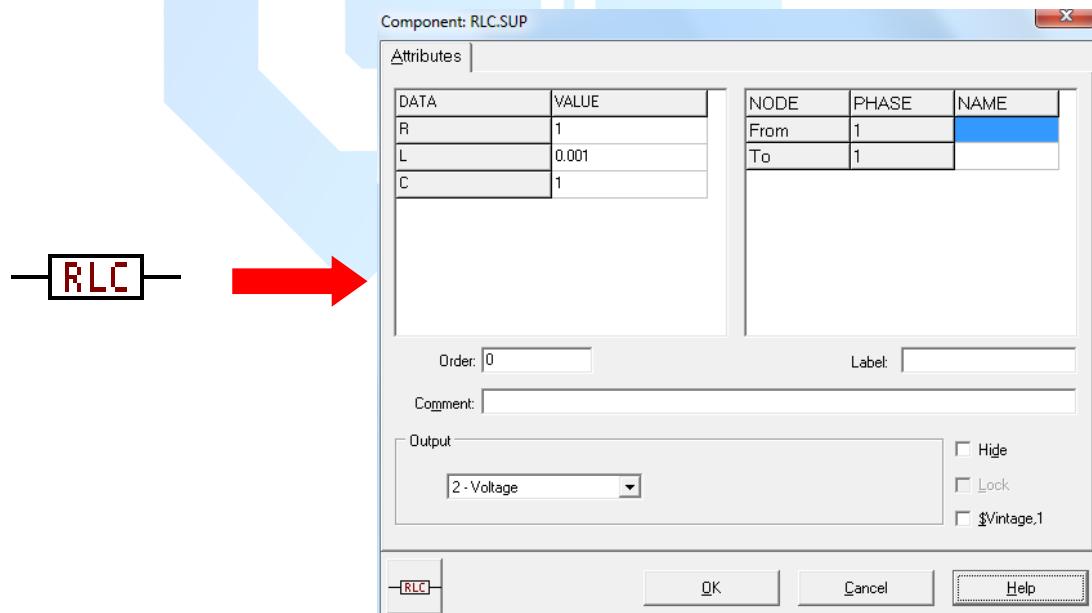


Figura 2.10 – Carga RLC e tela de parametrização



Onde, R= Resistência em [ohm]

L= Indutância em [mH] se Xopt.=0

Indutância em [Ohm] se Xopt.=power frequency

C= Capacitância em [μ F] se Copt.=0

Capacitância em [μ Mho] se Copt.=power frequency

- Carga RLC 3-ph:

A Carga **RLC 3-ph** representa uma carga com uma resistência em paralelo com um capacitor e um indutor por fase, conforme demonstrado pela figura 2.11.

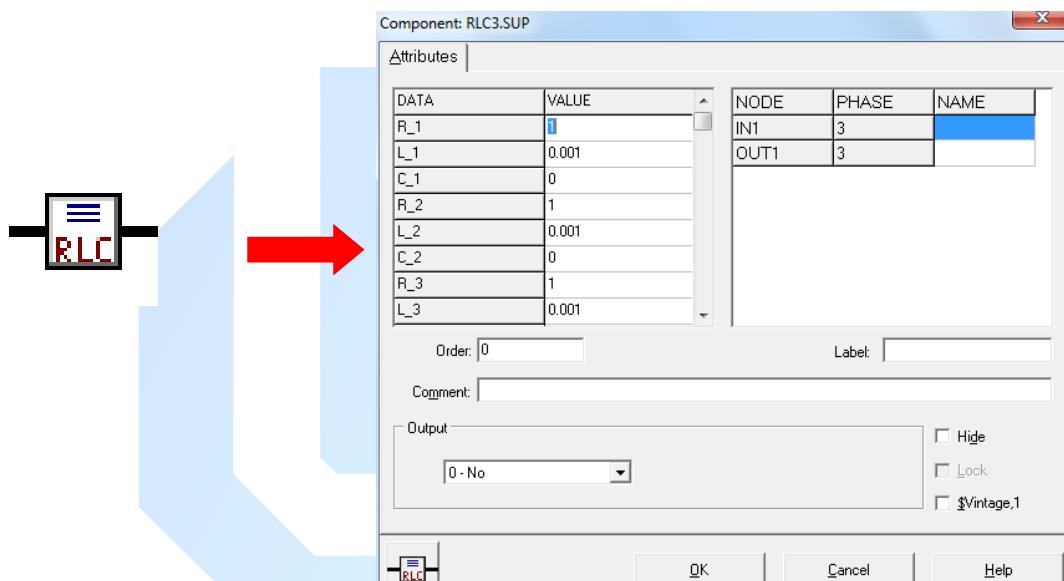


Figura 2.10 – Carga RLC 3-ph e tela de parametrização

- Carga RLC Y-3-ph:

A Carga **RLC Y-3-ph** representa uma carga com uma resistência em paralelo com um capacitor e um indutor por fase, conectado em estrela conforme demonstrado pela figura 2.12.

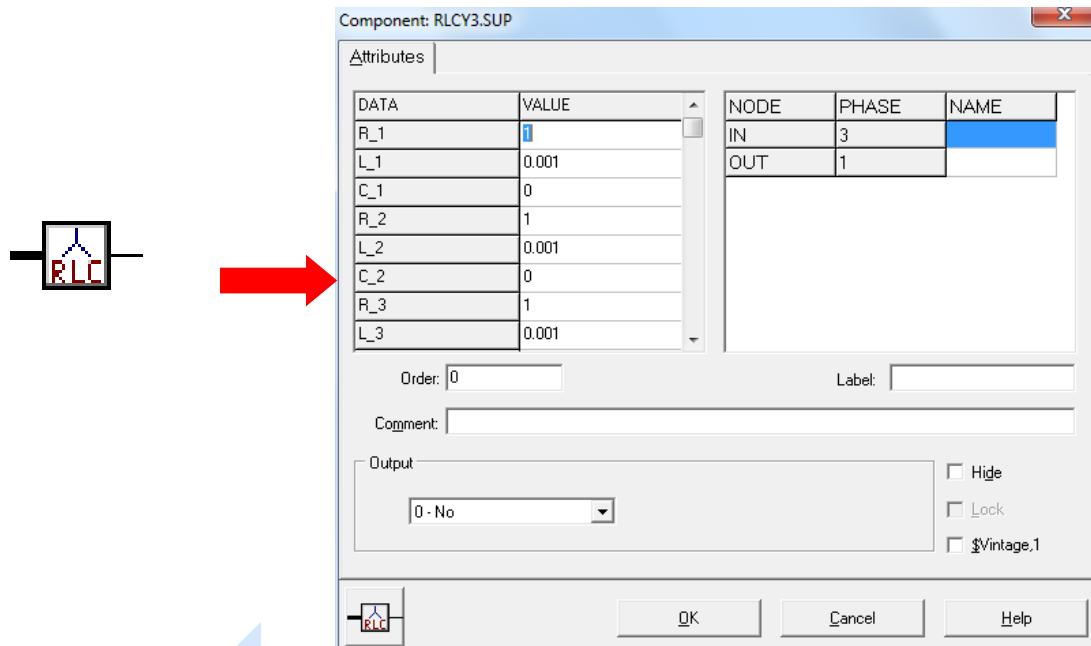


Figura 2.12 – Carga RLC Y-3-ph e tela de parametrização

- Carga RLC D-3-ph:

A Carga **RLC D-3-ph** representa uma carga com uma resistência em paralelo com um capacitor e um indutor por fase, conectado em delta conforme demonstrado pela figura 2.13.

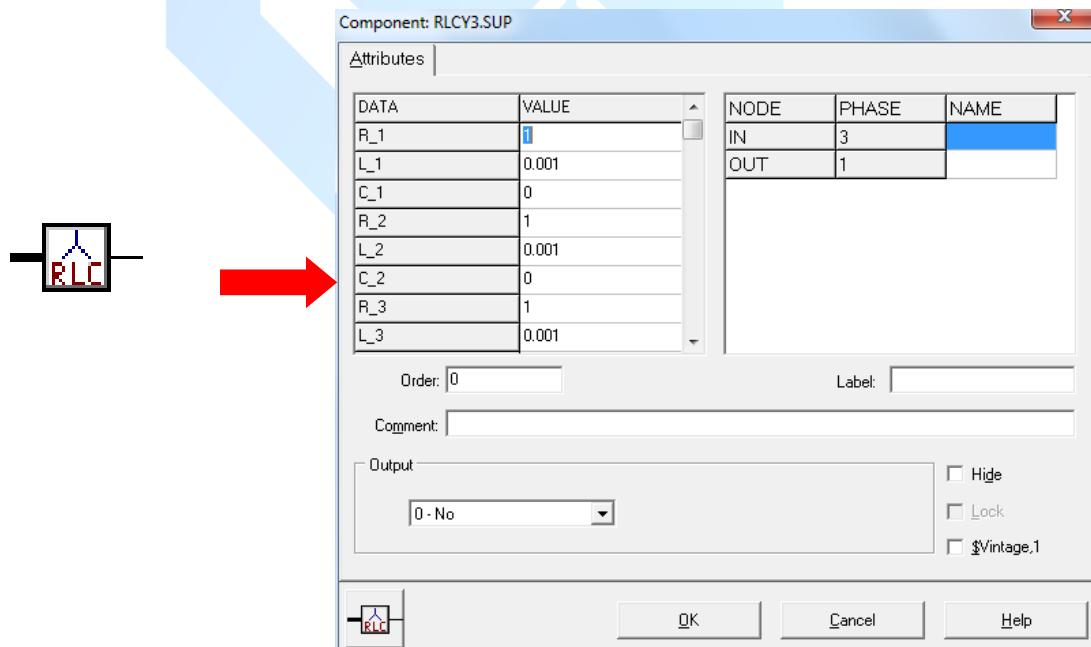


Figura 2.13 – Carga RLC D-3-ph e tela de parametrização



- C: U(0):

Ao contrário do capacitor, este componente o usuário pode inserir um valor de tensão inicial para simular capacitores energizados inicialmente. A figura 2.14 ilustra o C:U(0).

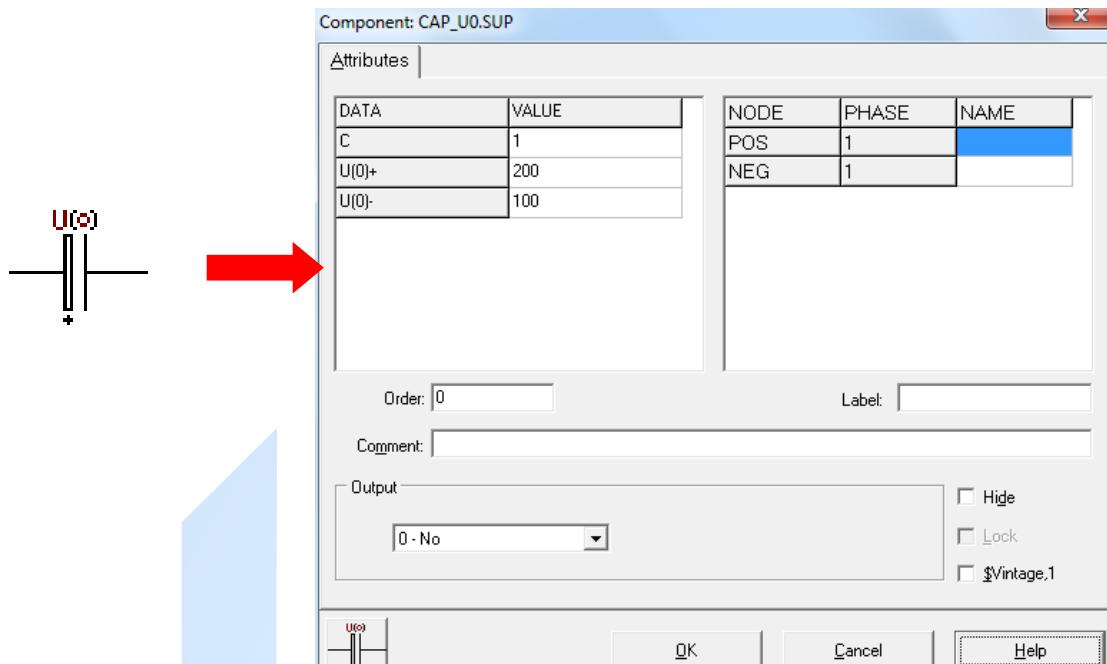


Figura 2.14 – Capacitor C:U(0) e tela de parametrização

- L: I(0):

Ao contrário do indutor, este componente o usuário pode inserir um valor de corrente inicial para simular indutores energizados inicialmente. A figura 2.15 ilustra o L:I(0).

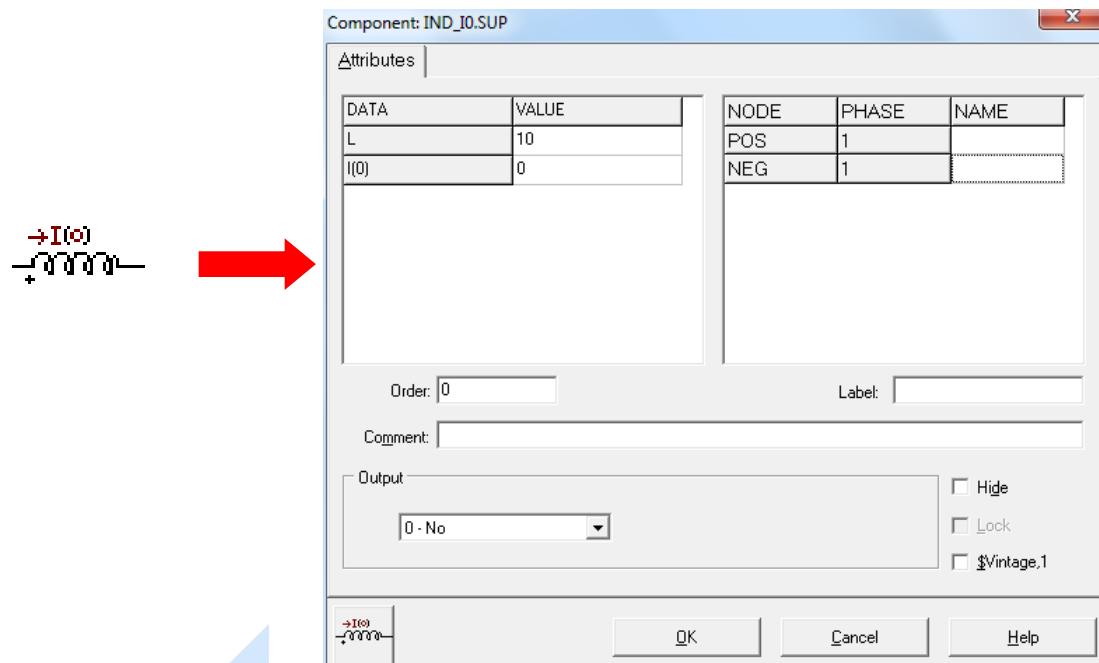


Figura 2.15 – Indutor L:I(0) e tela de parametrização

2.4 - Simulação de Circuitos Elétricos Lineares

- **Círculo RC**

Os circuitos RC e RL são também conhecidos como circuitos de primeira ordem, pois suas tensões e correntes são definidas por equações diferenciais de primeira ordem. Para podermos compreender esta classificação, analisemos o circuito RC da figura 2.16.

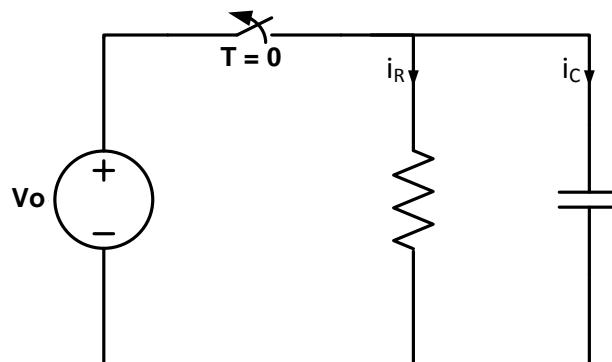


Figura 2.16 – Circuito RC sem fonte



Para o circuito da figura 2.16, supõe que o capacitor está inicialmente carregado. Como a tensão no capacitor não pode variar abruptamente, então

$$v_C(0^+) = v_C(0^+) = v_C(0) = v_0$$

No instante $t = 0$ o interruptor é aberto e o capacitor começa a descarregar. Aplicando a lei dos nós ao nó superior do circuito, tem-se

$$i_R(t) + i_C(t) = 0$$

Como $i_C(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$ e $i_R(t) = v(t)/R$, segue que

$$\frac{v(t)}{R} + C \frac{dv(t)}{dt} = 0$$

$$C \frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{R}$$

$$\frac{dv(t)}{v(t)} = -\frac{1}{RC} dt$$

$$v_C(t) = v_0 e^{-t/RC}$$

A partir do instante em que o interruptor é aberto, a tensão no circuito decresce de forma exponencial conforme as figuras 2.17 e 2.18.

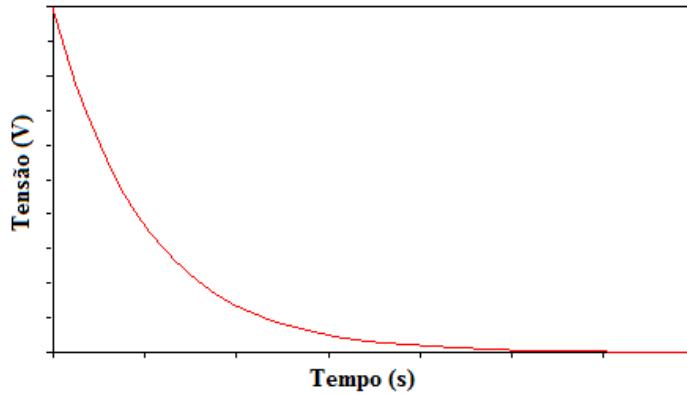


Figura 2.17 – Tensão transitória no capacitor

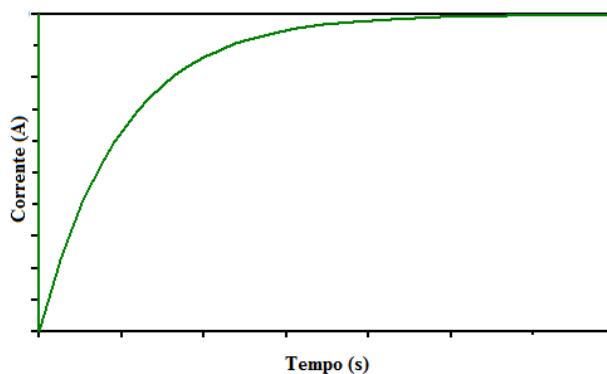
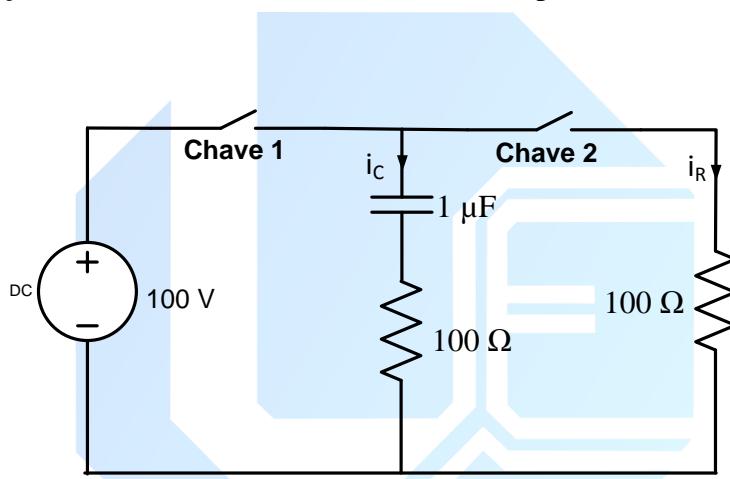


Figura 2.18 – Corrente transitória no capacitor

Exemplo de aplicação: Para um circuito de 1^a ordem do tipo RC ilustrado pela figura abaixo, pede-se:



- Analizar a corrente e tensão no capacitor com a abertura da primeira chave no tempo de 1 ms.
- Analizar a corrente e tensão no capacitor após a abertura da primeira chave em 1 ms com a resistência em paralelo de 100 Ω desconectado.

• Circuito RL

Como foi dito, o circuito RL é conhecido como circuito de primeira ordem porque suas tensões e correntes são descritas por equações diferenciais de primeira ordem. Supõe-se que o indutor da figura 2.19 está sendo percorrido por uma corrente elétrica inicial. Como a corrente no indutor não pode variar abruptamente, então

$$i_L(0^+) = i_L(0^+) = i_L(0) = i_0$$

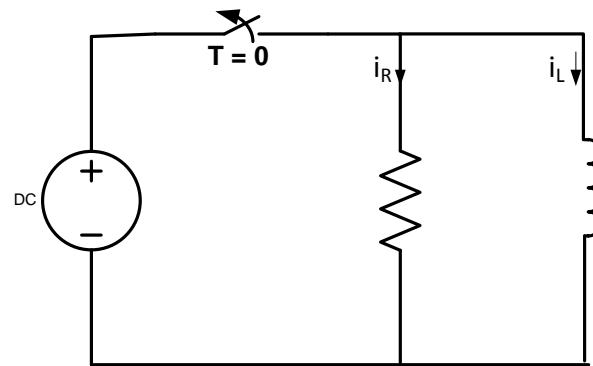


Figura 2.19 – Circuito RC sem fonte

No instante $t = 0$ o interruptor é aberto e o indutor entra em operação.

$$v_R(t) + v_L(t) = 0$$

Como $v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ e $v_R(t) = Ri(t)$, segue que

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = 0$$

$$\frac{di(t)}{i(t)} = -\frac{R}{L} dt$$

$$i_L(t) = ln \cdot e^{-Rt/L}$$

Da mesma forma que ocorre para o capacitor, há um decaimento exponencial da corrente no indutor como são mostrados nas figuras 2.20 e 2.21.

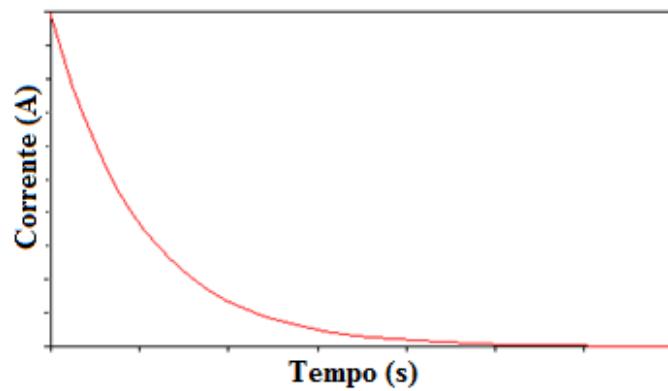


Figura 2.20 – Corrente transitória no indutor

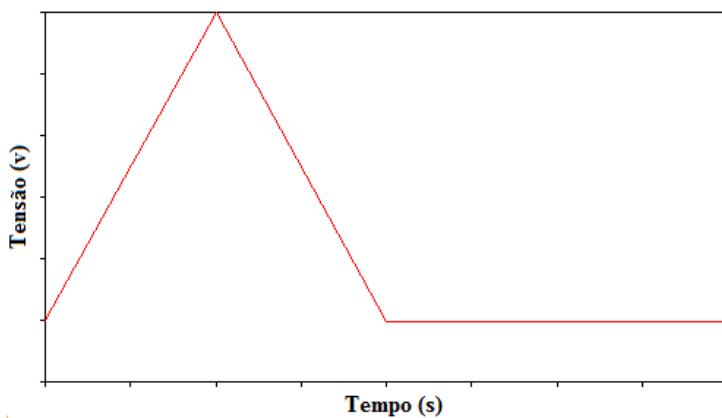
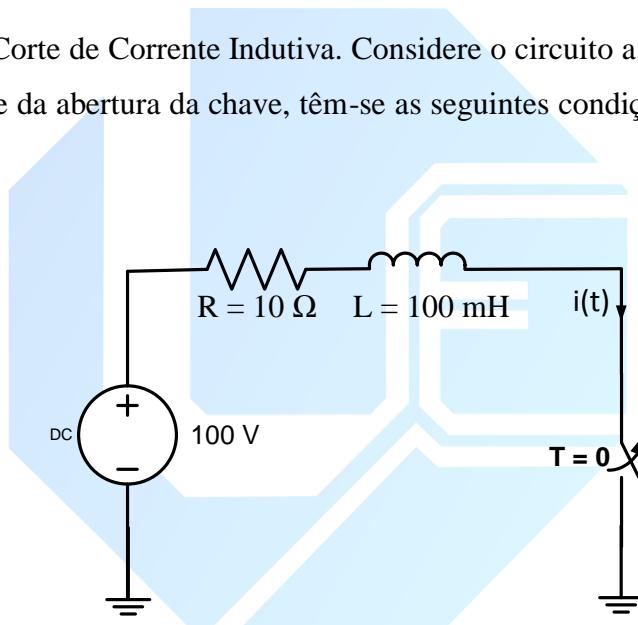


Figura 2.21 – tensão transitória no indutor

Exemplo de aplicação: Corte de Corrente Indutiva. Considere o circuito a seguir, no qual a chave abre em $t=0$. No instante da abertura da chave, têm-se as seguintes condições iniciais: $i(0) = 10$ e $v(0) = 0$



- Analizar a corrente e tensão no indutor com a abertura da primeira chave no tempo de 0 .
- Coloca-se uma resistência em paralelo com o indutor, para que a mesma possa dissipar a energia armazenada, cujo valor é:

$$R_p = 7,5 \cdot \frac{2L}{\Delta t}$$

Analizar a corrente e tensão no indutor com a abertura da primeira chave no tempo de 0 e a resistência R_p em paralelo com a indutância.



- c) Coloca-se uma resistência em paralelo com o indutor, para que a mesma possa dissipar a energia armazenada, porém utilize a seguinte equação:

$$R = \frac{2L}{\Delta t}$$

Analizar a corrente e tensão no indutor com a abertura da primeira chave no tempo de 0 e a resistência R em paralelo com a indutância.

• Circuito RLC

Na natureza são inúmeros os fenômenos que envolvem oscilações. Um exemplo comum é o pêndulo de um relógio, que se move periodicamente (ou seja, repetindo o seu movimento ao fim de um intervalo de tempo bem definido) em torno de uma posição de equilíbrio. Nos relógios mecânicos de menores dimensões o pêndulo foi substituído por uma massa ligada a uma mola, que tem um comportamento em tudo semelhante ao do pêndulo. E nos relógios eletrônicos substituído por um sistema também oscilante, mas neste caso as oscilações são de natureza elétrica.

O circuito RLC, ilustrado pela figura 2.22, é o circuito elétrico oscilante por excelência. A sua simplicidade permite controlar facilmente os parâmetros que caracterizam o seu funcionamento, o que o torna ainda um excelente candidato para a simulação de outros sistemas oscilantes (por exemplo, mecânicos, em que o controle de cada parâmetro do sistema pode ser mais difícil). É extensivamente utilizado como elemento de filtragem em diferentes circuitos eletrônicos. Para iniciar o desenvolvimento, consideram-se os dois circuitos RLC básicos mostrados na figura 2.22. Assume-se que alguma energia está inicialmente armazenada tanto no capacitor como no indutor.

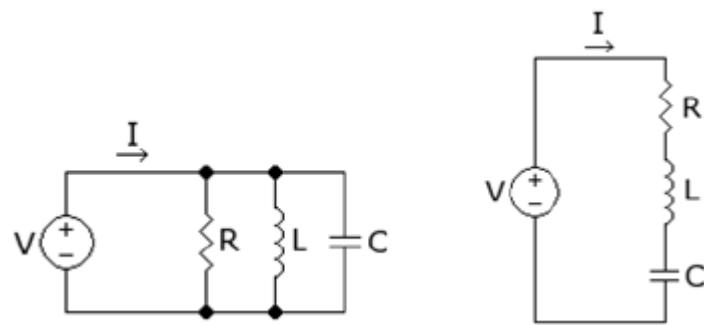


Figura 2.22 – Circuitos RLC em série e em paralelo

A expressão geral para uma equação diferencial de segunda ordem é:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\alpha \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = kf(t)$$

Onde:

x = resposta a ser determinada;

t = tempo (s);

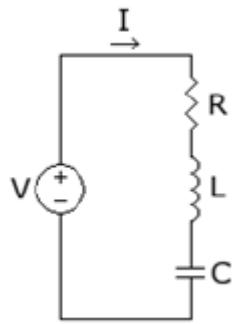
α = constante de amortecimento (rad/s);

ω_0 = frequência natural ou freqüência de ressonância (rad/s);

k = constante;

$f(t)$ = função correspondente a entrada

Para um circuito em série, ilustrado pela figura 2.23, temos:



$$v_R + v_L + v_C = V$$

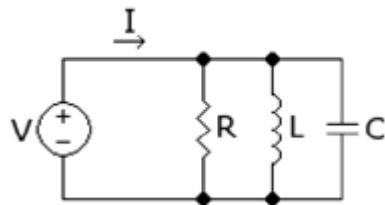
e

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = \frac{dV}{dt}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \text{ e } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Figura 2.23 – Circuitos RLC em série

E para um circuito em paralelo, ilustrado pela figura 2.24, temos:



$$i_R + i_L + i_C = I$$

e

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv}{dt} + \frac{1}{LC} v = \frac{1}{Cd} i$$

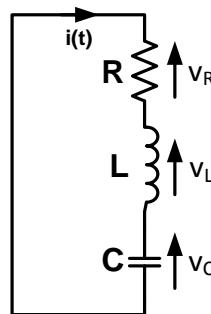
$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad e \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Figura 2.24 – Circuitos RLC em paralelo

Dependendo da relação entre os parâmetros α e ω_0 , nas equações expressas nas figuras 2.23 e 2.24, temos três casos possíveis, isto é:

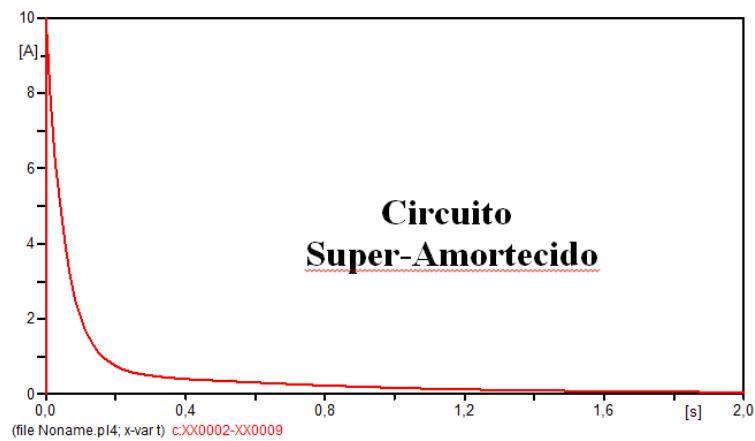
- 1º caso: $\alpha > \omega_0 \Rightarrow$ **Circuito Super – Amortecido**
- 2º caso: $\alpha = \omega_0 \Rightarrow$ **Circuito com Amortecimento Crítico**
- 3º caso: $\alpha < \omega_0 \Rightarrow$ **Circuito Sub-Amortecido**
- 4º caso: $\alpha = 0 \Rightarrow$ **Circuito Oscilatório**

Exemplo de aplicação: No circuito ao lado, determinar a corrente $i(t)$, via simulação no ATPDraw, para $t \geq 0$. Tempo de simulação de 10 segundo e passo de integração de 0,0001.

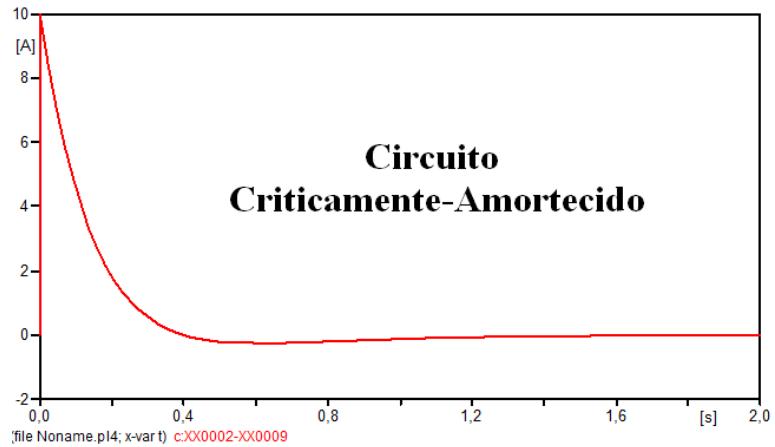


Círculo RLC série autônomo

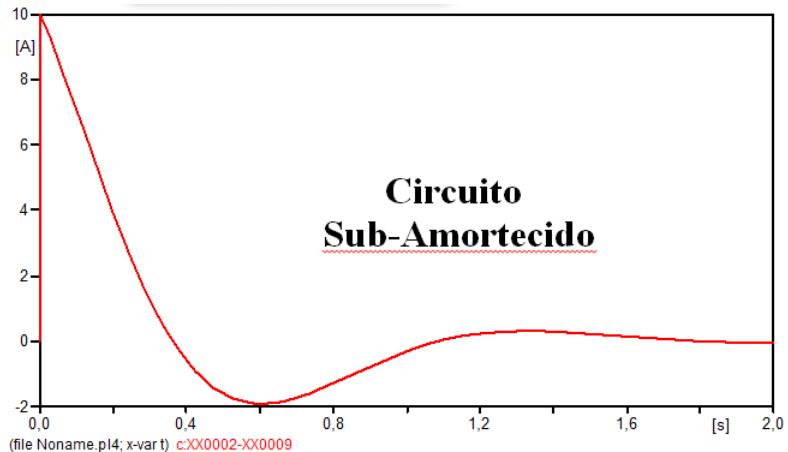
- a) $R = 40 \Omega$, $L = 2 \text{ H}$, $C = 0,02 \text{ F}$, $i_L(0) = i(0) = I_0 = 10 \text{ A}$



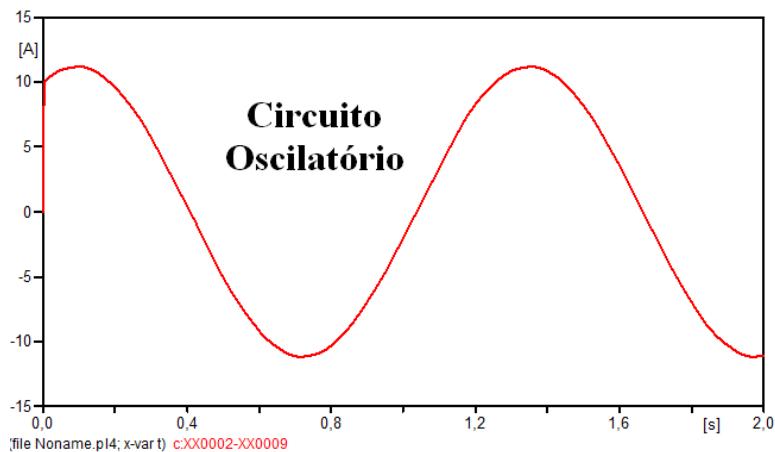
b) $R = 20 \Omega$, $L = 2 \text{ H}$, $C = 0,02 \text{ F}$, $i_L(0) = i(0) = I_0 = 10 \text{ A}$



c) $R = 10 \Omega$, $L = 2 \text{ H}$, $C = 0,02 \text{ F}$, $i_L(0) = i(0) = I_0 = 10 \text{ A}$



d) $R = 0 \Omega$, $L = 2 \text{ H}$, $C = 0,02 \text{ F}$, $i_L(0) = i(0) = I_0 = 10 \text{ A}$



CONCLUSÕES

Esta unidade teve por objetivo compreender os elementos básicos de um circuito elétrico, resistor, indutor e capacitor, componentes estes encontrados em modelagens de sistemas elétricos de potência. Inicialmente foi detalhada a formulação matemática de circuitos do tipo RC, RL e RLC para melhor entendimento das respostas obtidas através de simulações computacionais. Através do aplicativo ATPDraw foi possível realizar simulações, mostrando a importância de resultados analíticos com os computacionais, ratificando a aplicabilidade e importância desta ferramenta para análises de transitórios em sistemas de potência .

3 - MODELAGEM MATEMÁTICA DE CARGAS MONOFÁSICAS E TRIFÁSICAS

3.1 - Introdução

Para a análise do comportamento das tensões em diversas partes de uma linha de transmissão, rede de distribuição e/ou sistemas industriais, a inserção e/ou retirada de cargas em partes específicas do sistema elétrico é de grande importância para adequação do sistema simulado ao caso real a ser estudado.

Através do programa ATPDraw serão modeladas e simuladas cargas monofásicas e trifásicas de todas as naturezas físicas (R, L, C).

3.2 - Modelagem de Cargas Monofásicas

Modelar uma carga monofásica a partir de um certo valor de potência, tensão e fator de potência, consiste em montar um circuito elétrico com resistências, indutâncias e ou capacitâncias, que equivale aos funcionamento elétrico da carga em questão. Tanto nos aspectos de corrente drenada como queda de tensão é necessário ser representado no modelo.

Tomando com exemplo um circuito monofásico puramente resistivo de potência $P = 50 \text{ kW}$ e tensão $U = 127 \text{ V}$. Qual a corrente a percorrer o circuito?



Figura 3.1 - Circuito puramente resistivo

$$\begin{aligned} \text{Dados: } & \begin{cases} P = 50 \text{ kW} \\ U = 127 \text{ V} \end{cases} \end{aligned}$$



Cálculo da Resistência:

$$R = \frac{V^2}{P}$$

$$R = \frac{127^2}{50000}$$

$$R = 0,32258 \Omega$$

Corrente:

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{50000}{127}$$

$$I = 395,7 A$$

Tensão no tempo:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot 127 \operatorname{sen}(wt)$$

Corrente no tempo:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot 395,7 \operatorname{sen}(wt)$$

Valores obtidos pela simulação no ATP:

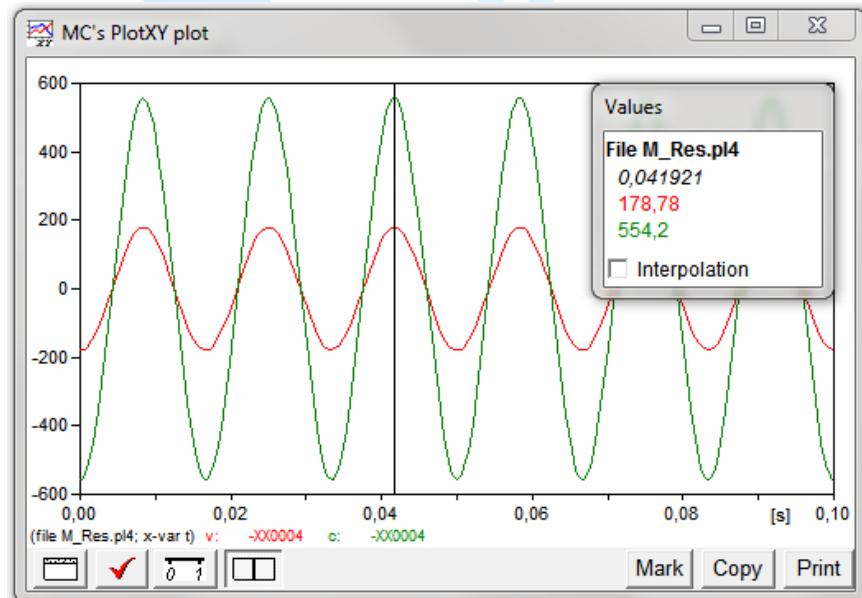


Figura 3.2 - Tensão e Corrente em uma carga resistiva

3.3 - Modelagem de Cargas Trifásicas

As cargas trifásicas podem ser modeladas conforme ligações delta ou Y, e ainda com elementos (R,L,C) em série ou paralelo, dependendo da sua aplicação e necessidade do estudo a ser efetuado.

3.3.1 - Carga com ligação Delta em paralelo

O desenho abaixo representa uma carga trifásica conectada em Delta com seus elementos em paralelo em cada fase.

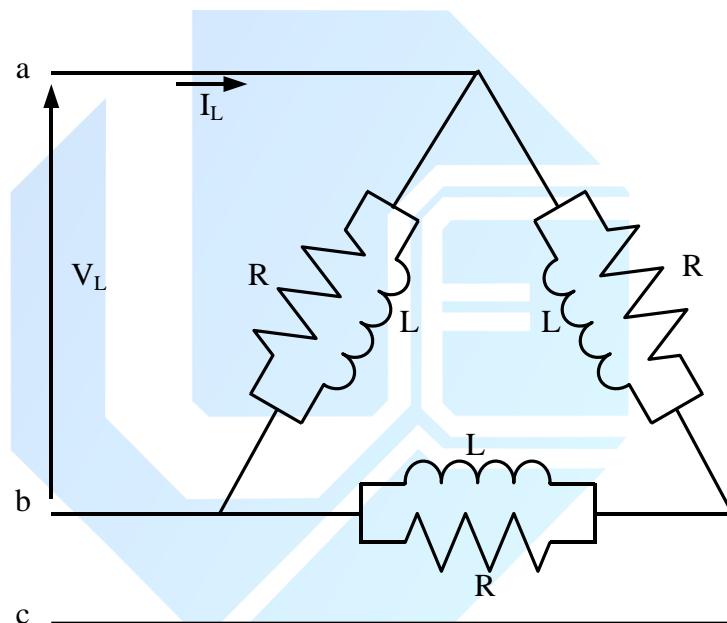


Figura 3.3 - Carga conectada em Delta em paralelo

Pode-se retirar do triangulo de potências algumas informações básicas:

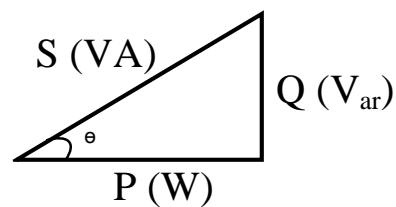


Figura 3.4 - Triangulo de potências

Cálculo da Potência Ativa:

$$P = S \cos \theta$$

Cálculo da Potência Reativa:

$$Q = S \sin \theta$$

Cálculo da Resistência por fase:

$$R = \frac{V_L^2}{P}$$

Cálculo da Reatância Indutiva:

$$X_L = \frac{V_L^2}{Q}$$

Cálculo da Indutância:

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

Cálculo da corrente de linha:

$$I = \frac{S}{V_L \sqrt{3}}$$

3.3.2 - Carga com ligação Estrela em série

O desenho abaixo representa uma carga trifásica conectada em Estrela com seus elementos em série em cada fase.

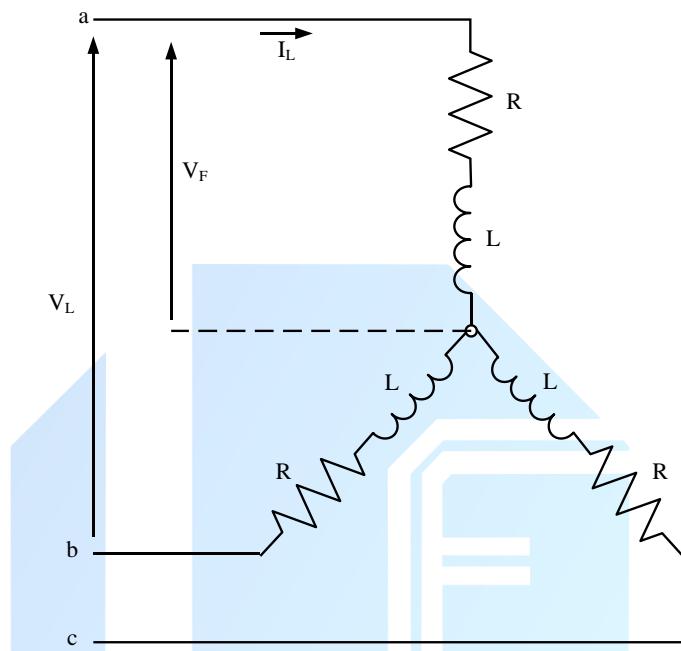


Figura 3.5 - Carga conectada em Estrela série

Cálculo da corrente de Linha que é igual a corrente por fase na ligação estrela:

$$I = \frac{S}{V_L \sqrt{3}} \angle \pm \theta \begin{cases} +\text{Capacitiva} \\ -\text{Indutiva} \end{cases}$$

Cálculo da Impedância:

$$Z = \frac{V_F}{I_F} = \frac{V_L}{\sqrt{3} I_L} \angle \pm \theta$$

A parte real (Resistência) e a parte Imaginária (Reatância), podem ser encontrada escrevendo a Impedância na forma retangular:



$$Z = R \pm jX$$

Cálculo da Indutância:

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

3.4 - Explorando o ATPDraw

Localização do circuito RLC Trifásico conectado em Y no ATP

No menu BRANCH LINEAR e RLC-Y 3-ph

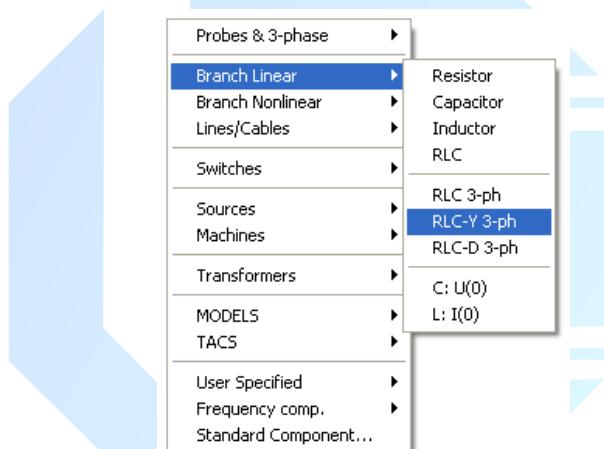


Figura 3.6 - Localização do circuito RLC trifásico ligado em Y no ATPDraw

Aparecerá o ícone de um circuito RLC trifásico ligado em Y.



Figura 3.7 - Ícone do circuito RLC trifásico ligado em Y

Para modelagem de uma carga, reator e banco de capacitor necessitamos entrar com os parâmetros para o ATPDraw fazer a modelagem, mostraremos como são encontrados esses parâmetros mediante os dados fornecidos.



Como sistema elétrico é equilibrado teremos os parâmetro (resistência, indutância e capacidade) iguais na fase um, fase dois e fase três respectivamente.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C$$

A figura abaixo mostra onde os parâmetros deve ser transportados para o ATP.

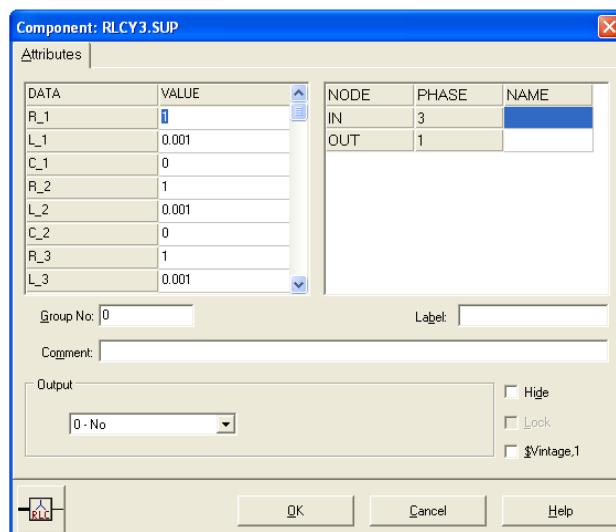


Figura 3.8 - Tela de visualização das características do circuito RLC trifásico ligado em Y

No Help, podemos encontrar as informações de cada parâmetro e suas respectivas unidades que o ATPDraw utiliza.

Exemplo desta carga:

Nome: RLCY3. Circuito RLC trifásico ligado em Y. Valores independentes nas fases.

Cartão: Filial

Dados:

R1 = Resistência de R_1 na fase 1

L1 = Indutância de L_1 na fase 1

C1 = capacidade de C_1 na fase 1



R2 = Resistência de R_2 na fase 2

L2 = Indutância de L_2 na fase 2

C2 = capacitância de C_2 na fase 2

R3 = Resistência de R_3 na fase 3

L3 = Indutância de L_3 na fase 3

Nó: IN = nó de inicio do RLC

OUT = nó do fim do RLC

Obs:

Resistência [ohm]

Indutância [mH]

Capacitância [μ F]

3.5 - Modelagem de um Banco de Capacitor

Para modelagem do banco de capacitor, iremos considerar um capacitor ideal, Portanto, somente o efeito capacitivo estará presente.

Análise da potência para definir os parâmetros:

Como o banco de capacitor possui somente potência reativa capacitiva.

Temos que X_C vale:

$$X_C = \frac{V^2}{Q}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$C = \frac{1}{X_C \omega}$$



Análise das impedâncias para definir os parâmetros:

Como um banco de capacitor possui somente potência reativa capacitiva:

$$S = Q$$

$$Q = \sqrt{3} V I$$

Logo a corrente será:

$$I = \frac{Q}{V \sqrt{3}}$$

Calculando a impedância:

Para calcular uma impedância do banco de capacitor utiliza-se a relação entre a tensão fase VF e a corrente I que é definido como impedância Z.

$$Z = \frac{V_F}{I} = \frac{V}{I \sqrt{3}}$$

Como um banco de capacitor possui somente a componente capacitativa:

$$Z = X_C$$

Mas como:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$C = \frac{1}{X_C \omega}$$

Assim entraremos somente com os dado da capacitância.



3.6 - Modelagem de Reator

Para modelagem de um reator, iremos considerar o reator ideal, portanto, somente o efeito indutivo estará presente.

Análise da potência para definir os parâmetros:

Um reator possui somente potência reativa indutiva.

Temos que X_L vale:

$$X_L = \frac{V^2}{Q}$$

$$X_L = \omega L$$

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

Análise das impedâncias para definir os parâmetros:

Como um reator possui somente potência reativa indutiva.

$$Q = \sqrt{3}VI$$

A corrente será dada por:

$$I = \frac{Q}{V\sqrt{3}}$$

Calculando a impedância:

Para calcular uma impedância do reator utiliza a relação entre a tensão fase V_F e a corrente I que é definida como impedância Z .

$$Z = \frac{V_F}{I} = \frac{V}{I\sqrt{3}}$$



Como um reator possui somente carga indutiva

$$Z = X_L$$

Mas como:

$$X_L = \omega L$$

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

Assim entraremos somente com os dado da indutância.

3.7 - Estudo de Caso

Um hipermercado da cidade de Uberlândia está fazendo um estudo de viabilidade econômica relacionado a sua instalação elétrica. Deseja conhecer os oscilogramas da tensão e corrente no barramento de conexão das cargas.

As cargas seguem uma dinâmica de operação da seguinte maneira.

A carga total consumida pelo Hipermercado é de 150 KVA com Fator de Potência 0,92.

No período de ponta da concessionária local compreendido entre as 18:00 h e 21:00 h, ocorre um desligamento proposital de algumas cargas no Hipermercado, reduzindo o consumo total para 100 KVA e abaixando o Fator de Potência para 0,80.

Sabendo do excesso de reativos no período de ponta, deseja-se instalar um banco de capacitor para elevar o F.P para valores iniciais.

O engenheiro responsável pelo projeto pediu para que contivesse na simulação uma rejeição de carga as 20:00 h. Restando somente 75 KVA com F.P. de 0,88.

Sabe-se que as 21:00 h retornou-se a plena carga normalmente.

Utilizando o ATPDraw, modele e simule todas as condições descritas acima.

Considerações:

- Todas as cargas possuem conexão Estrela em série.

- Tensão 220V
- Nível de curto-circuito em 220V de 10 MVA

OBS: O desenvolvimento do exercício será executado em sala de aula.

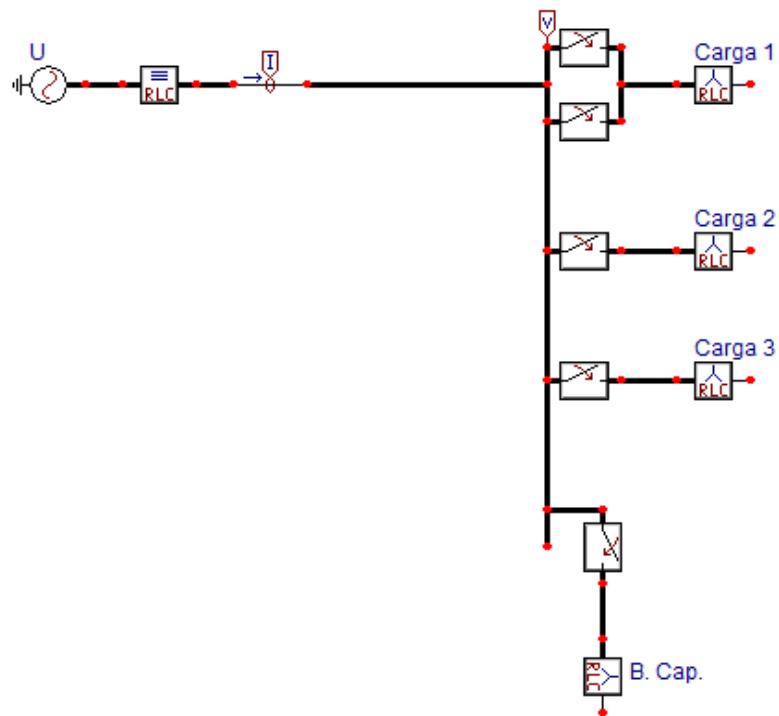


Figura 3.9 - Diagrama Montado no ATPDraw

4 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS NO ATP

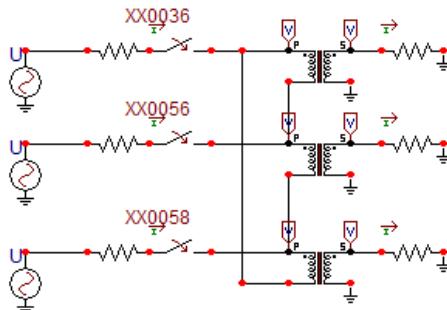


Figura 4.1 – Modelagem de transformadores monofásicos no ATPDraw.

4.1 – Introdução

A modelagem de transformador apresenta grande importância devido ao seu alto uso tanto em sistemas de transmissão de energia quanto em sistemas de distribuição, por isso a necessidade da utilização da simulação computacional.

Antes de começarmos a fazer a modelagem de um transformador para o ATPDraw, precisamos saber algumas informações básicas sobre transformador, para o melhor entendimento da modelagem matemática.

Essencialmente, um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. O fluxo comum estabelece um enlace com o outro enrolamento, o secundário, induzindo neste uma tensão cujo valor depende do número de espiras do secundário, assim como da magnitude do fluxo comum e da frequência.

A essência de funcionamento de um transformador requer apenas a existência de um fluxo comum, variável no tempo, enlaçando dois enrolamentos.

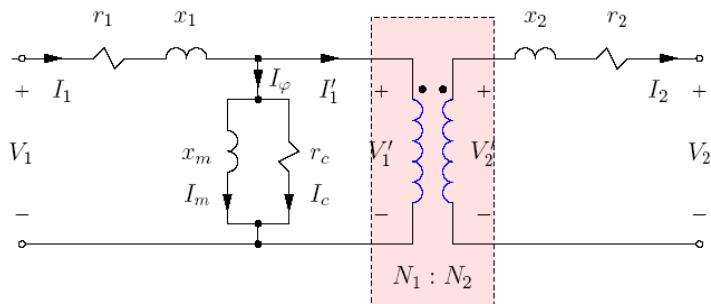


Figura 4.2 - Circuito equivalente de um transformador monofásico ideal.

Como o transformador é um dispositivo estático que pode trabalhar em condições (de temperatura e pressão) superiores às do ambiente devido à energia que é dissipada, suas propriedades devem estar numa gama de valores que garantam um perfeito funcionamento dos seus componentes. Através de realização de ensaios as condições de funcionamento, a eficiência e a capacitação de um transformador são verificadas. Os ensaios são procedimentos de avaliação de um transformador, executando nas instalações de fabricante ou em outro laboratório devidamente credenciado.

Nos ensaios de rotina feitos pelo fabricante ou laboratório credenciado são determinados:

- Perda em vazio
- Corrente de excitação
- Perda em carga
- Impedância de curto-circuito (Z_{cc})
- Tensão de curto-circuito (V_{cc})
- Resistência de curto-circuito (R_{cc})
- Reatância de curto-circuito (X_{cc})



4.1.1 – Definições

- **Perda em vazio** - Potência absorvida por um transformador, quando alimentado em tensão e frequência nominais por um de seus enrolamentos, com todos os outros enrolamentos em aberto.
- **Corrente de excitação** - Corrente que percorre o terminal de linha de um enrolamento, sob a tensão e frequência nominais, estando o(s) outro(s) enrolamento(s) em circuito aberto.
- **Perda em carga** - Potência ativa absorvida na frequência nominal, quando o terminal de linha de um dos enrolamentos for percorrido pela corrente nominal, estando o terminal do outro enrolamento curto-circuitado.
- **Perdas totais** - Soma das perdas em vazio e em carga.
- **Impedância de curto-circuito (Z_{cc})** - Impedância equivalente, expressa em ohms por fase, medida entre os terminais de um enrolamento, com outro enrolamento curto-circuitado, quando circula, sob frequência nominal, no primeiro enrolamento, uma corrente nominal. A impedância de curto-circuito é, geralmente, expressa em percentagem, tendo como valores de base a tensão e a potência nominal do transformador.
- **Tensão de curto-circuito (V_{cc})** - A tensão aplicada entre os terminais de um enrolamento, com outro enrolamento curto-circuitado, quando circula, sob frequência nominal, no primeiro enrolamento, uma corrente nominal. Nota: Quando expressas em percentagem, a impedância de curto-circuito e a tensão de curto-circuito são numericamente iguais.
- **Resistência de curto-circuito (R_{cc})** - Componente resistiva da impedância de curto-circuito.
- **Reatância de curto-circuito (X_{cc})** - Componente reativa da impedância de curto-circuito.

4.2 - Estimativa dos Parâmetros Básicos de um Transformador

A seguir encontram-se os dados gerais, os quais serão necessários para simulação no ATPDraw.



Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência monofásica aparente	[VA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	[V]
V_{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	[V]
f	Frequência da rede	[Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	[%]
$R\%$	Resistência percentual	[%]

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	-
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	[A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	[A]
I_0	Corrente a vazio	[A]
P_0	Potência a vazio	[W]
Z_p	Impedância do primário	[Ω]
Z_s	Impedância do secundário	[Ω]
R_p	Resistência do primário	[Ω]
R_s	Resistência do secundário	[Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	[W]
X_p	Reatância do primário	[Ω]
X_s	Reatância do secundário	[Ω]
L_p	Indutância do primário	[mH]
L_s	Indutância secundária	[mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	[Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	[Wb-espira]

Relação de transformação (α)

Como :

$$S_p = S_s$$

Logo :

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \alpha$$



Além disso, como :

$$V_p = Z_p \cdot I_p \quad \text{e} \quad V_s = Z_s \cdot I_s$$

Tem - se que :

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

$$(Z_p \cdot I_p) \cdot I_p = (Z_s \cdot I_s) \cdot I_s$$

$$Z_p \cdot I_p^2 = Z_s \cdot I_s^2$$

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \left(\frac{I_s}{I_p} \right)^2 = \alpha^2$$

Corrente nominal no primário e secundário (I_p e I_s)

A corrente nominal do primário e do secundário (Correntes de linha) se obtém a partir da potência aparente do transformador e da sua respectiva tensão nominal (tensão de linha).

Como:

$$S = V \cdot I \text{ [VA]}$$

Logo:

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} \text{ [A]}$$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} \text{ [A]}$$

Corrente a vazio (I_0)

A corrente a vazio de um transformador varia entre 0,2 a 2% da corrente nominal (Para grandes transformadores, acima de 300 MVA, a corrente a vazio é em torno de 0,2% da corrente nominal).

Portanto, considerando que a energização do transformador seja realizada pelo lado primário, tem-se que:



$$I_{0(pico)} = I_0(\%) \cdot I_{np(pico)}$$

$$I_{0(pico)} = \frac{2}{100} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} \text{ [A]}$$

Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos \varphi_0$$

Assumindo, $\cos \varphi_0 \approx 0,2$

$$P_0 = V_{rp} \cdot \left(\frac{2}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} \right) \cdot 0,2 \text{ [W]}$$

Impedância do primário e secundário (Z_p e Z_s)

A impedância de curto-circuito é geralmente expressa em percentagem, devida o fato de que no ensaio de curto-circuito aplicamos uma porcentagem da tensão nominal, assim a impedância de curto-circuito tem como valores de base a tensão e a potência nominal do enrolamento. Para determinarmos o valor das impedâncias primária e secundária, devemos trabalhar com a impedância de curto-circuito (Z_{cc}) em p.u. (por unidade), entretanto temos este valor sob a forma de porcentagem, sendo assim dividimos Z_{cc} por 100 e obtemos o respectivo valor em p.u.

$$p.u = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$$

$$\frac{Z_{cc}}{100} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$$

O processo de aplicação do sistema p.u. consta em dividir todos os elementos de uma janela de dados de M amostras, por seu maior elemento em valor absoluto. Quando esse processo ocorre numa janela de dados de impedância, esse elemento é denominado de impedância de base (Z_b).

Como:

$$S = V \cdot I \text{ e, além disso, } I = \frac{V}{Z}$$

Portanto:



$$Z_b = \frac{V^2}{S} [\Omega]$$

Logo, a impedância é dada pela tensão nominal do lado de alta tensão ou baixa tensão, a potência do transformador e a impedância de curto-circuito (dado em p.u):

$$Z_{real} = Z_{base} \times \frac{Z_{cc}}{100} [\Omega]$$

$$Z_T = \frac{V_n^2}{S} \times \frac{Z_{cc}}{100} [\Omega]$$

Através do ensaio de curto-círcuito, podemos determinar a impedância do lado de alta tensão, sendo que esse ensaio consiste em curto-circuitar o lado de baixa tensão (secundário) do transformador, aplicando-se uma pequena tensão no lado de alta (primário), tensão essa denominada de tensão de curto-círcuito. Com base nessa tensão e na corrente de curto-círcuito, é possível então determinar a impedância interna, do lado de alta tensão, do transformador. O ensaio de curto-círcuito marca essencialmente as perdas no cobre, ou seja, a potência correspondente às perdas nas resistências primária e secundária, referente ao lado primário (lado de alta tensão).

Logo, com base no circuito equivalente simplificado de um transformador, podemos determinar a impedância do primário da seguinte forma:

$$Z_T = Z_P + \alpha^2 Z_S$$

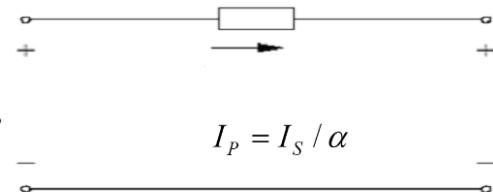


Figura 4.3 – Circuito equivalente simplificado de um transformador considerando somente as impedâncias.

Como:

$$\alpha^2 = \frac{Z_P}{Z_S}$$

$$Z_P = \alpha^2 Z_S$$



Logo:

Impedância do primário:

$$Z_T = Z_p + Z_p$$

$$Z_T = 2Z_p$$

$$Z_p = \frac{Z_T}{2} = \frac{V_{rp}^2}{S_{1\phi}} \times \frac{Zcc}{2 \cdot 100} [\Omega]$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} [\Omega]$$

Resistência do primário e secundário (R_p e R_s)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%.

Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_b = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot \frac{V_{rp}^2}{S_{1\phi}} [\Omega]$$

- Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_b = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} [\Omega]$$

ou

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} [\Omega]$$

Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de R_p e R_s , sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np}^2 + R_s \cdot I_{ns}^2 [W]$$



Reatância do primário e secundário (X_p e X_s)

A reatância (X_p e X_s) é calculada com base nos valores de resistência e impedância obtidos:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} [\Omega]$$

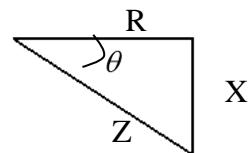


Figura 4.4 – Triângulo das potências.

Indutância do primário e secundário (L_p e L_s)

A indutância (L_p e L_s), é calculada com base nos valores das reatâncias:

pois:

$$X_p = wL_p$$

onde:

$$w = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377$$

logo:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \times 1000 [mH]$$

Obs: multiplica-se por 1000, para encontrar o valor da indutância em (mH)

Resistência de magnetização (R_{mag})

A resistência de magnetização R_{mag} (perdas no ferro) é obtida com a tensão nominal do lado no qual é realizada a energização do transformador e a potência a vazio. O ramo de magnetização representa as perdas no ferro.

$$R_{mag} = \frac{V^2}{P_0} [\Omega]$$



Fluxo de magnetização (λ_0)

O fluxo concatenado no ramo magnetizante em regime permanente pode ser definido pela seguinte expressão:

$$\lambda_0 = \frac{V}{4,44 \cdot f} \text{ [Wb - espira]}$$

Onde V é a tensão no enrolamento energizado.

4.3 - Modelagem de Transformadores Monofásicos no Atpdraw

O programa ATPDraw apresenta vários modelos de transformadores e, é possível em alguns casos (transformadores reais) a inclusão da curva de magnetização do transformador através da rotina SATURATION, sendo que no caso dos transformadores ideias apenas a relação de transformação necessária. Os modelos disponíveis são para frequências menores que 1 KHz.

Os transformadores monofásicos, no ATPDraw, podem ser obtidos conforme mostra a Figura 4.5:

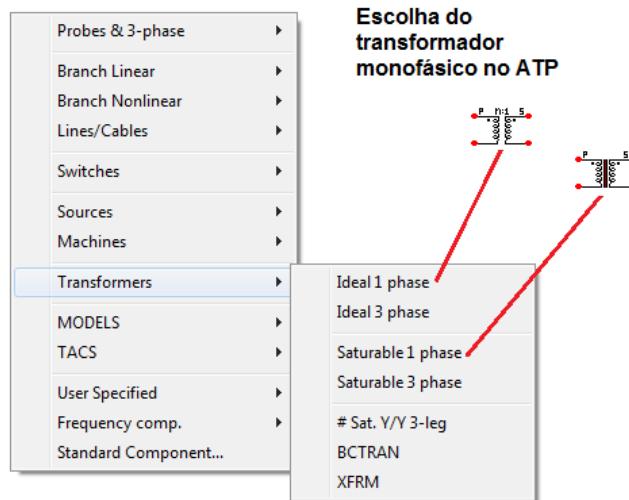


Figura 4.5 - Localização do transformador monofásico no ATPDraw.



4.3.1 - Transformadores Ideias

Os transformadores ideais, Figura 4.6, apresentam como parâmetro apenas a relação de transformação entre o lado primário e o lado secundário, isto é, não levam em conta as perdas nos enrolamentos de cobre e no núcleo.

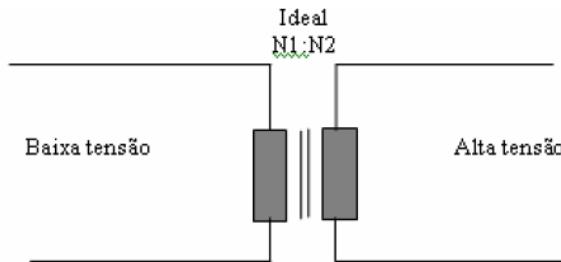


Figura 4.6 – Representação de um transformador monofásico ideal.

Na Figura 4.7 a seguir encontra-se apresentada a tabela do “Component: TRAFO_I.sup” para transformadores monofásicos ideais no ATPDraw.

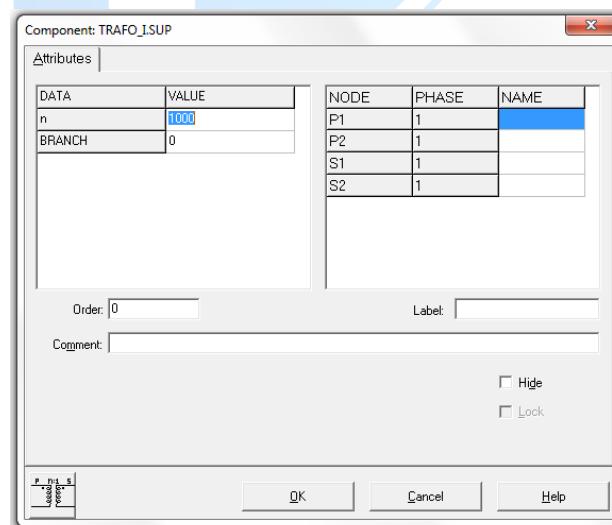


Figura 4.7 - Tela de visualização das características dos transformadores monofásicos ideais no ATPDraw.

No **Help**, podemos encontrar a informação do único parâmetro para especificar esse componente no ATPDraw:

Nome: TRAFO_I - transformador ideal monofásico.

Cartão: SOURCE/BRANCH

Dado: n Relação de transformação.



Tensão do primário dividida pela tensão do secundário.

Relação entre os enrolamentos secundário e primário.

BRANCH

0 – Opção SOURCE: fornece um melhor controle de inicialização.

1 – Opção BRANCH: permite melhor aterramento dos terminais e conexão das chaves.

Nó P1 = Lado Primário. Fase 1

P2 = Lado Primário. Fase 2

S1 = Lado Secundário. Fase 1

S2 = Lado Secundário. Fase 2

4.3.2 - Transformadores Saturáveis

Devido a maior complexidade, uma maior abordagem será realizada com relação à representação de transformadores reais.

Este tipo de transformador é mais completo e inclui um modelo para levar em conta as perdas nos enrolamentos de cobre e perdas no material ferromagnético do núcleo.

As perdas no cobre são calculadas levando em conta a resistência, as quais devem ser informadas, dos enrolamentos nos lados de baixa e alta tensão.

Já as perdas no núcleo são analisadas com base na curva de saturação do transformador, sendo que os valores desta curva devem ser informados.

Transformadores monofásicos com vários enrolamentos podem ser representados conforme o circuito equivalente mostrado na Figura 4.8. São representadas as impedâncias de dispersão de cada enrolamento, o ramo magnetizante com saturação e perdas no núcleo e a relação de transformação entre enrolamentos.

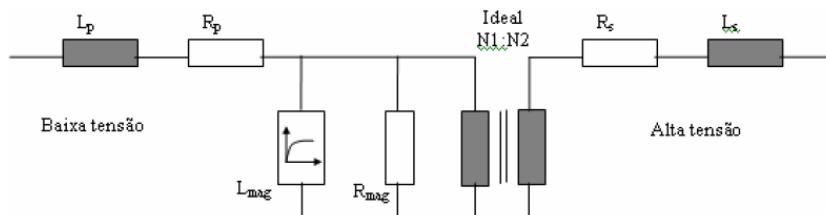


Figura 4.8 – Circuito equivalente para um transformador saturável.



O ramo magnetizante pode ser ignorado e conectado em qualquer terminal utilizando-se outro modelo do programa. Este outro modelo pode ser conectado inclusive no mesmo ponto do circuito original e pode ser um indutor não linear ou um indutor não linear com histerese.

A característica de magnetização de transformadores é de modelagem muito difícil e se constitui num dos problemas mais complexos na simulação de transitórios eletromagnéticos, principalmente quando os resultados são fortemente dependentes da geração de harmônicos e envolvendo transitórios de longa duração. Os exemplos mais apropriados para estes tipos de transitórios são os transitórios decorrentes de energização de transformadores, ocorrência e eliminação de defeitos e rejeição de carga.

É importante ressaltar que a própria determinação de curva de histerese de um transformador é bastante complexa, seja por medições ou por cálculos, não havendo nenhuma informação disponível sobre o comportamento transitório desta característica que possa ser utilizada de forma confiável em estudos de transitórios. Estes problemas são de certa forma reduzida na sua importância porque a relação entre o fluxo e a frequência é uma relação inversamente proporcional e, portanto, o efeito da saturação perde a sua importância à medida que a frequência aumenta.

Os transformadores monofásicos podem ser conectados de forma a constituir um transformador trifásico, inclusive respeitando-se as ligações de cada enrolamento.

O programa ATP dispõe ainda de outras possibilidades para modelagem de transformadores. A primeira delas consiste em calcular os parâmetros de sequência positiva e zero incluindo as reatâncias do transformador e do gerador (ou equivalente de sistema) e transformá-los para componentes de fase, os quais seriam modelados por elementos acoplados. Esta representação só é conveniente para as extremidades da rede elétrica. Uma segunda opção seria a representação de um transformador por uma matriz de impedâncias, utilizando-se o acoplamento magnético entre fases para representar a relação de transformação entre enrolamentos. A sub-rotina XFORMER fornece os elementos para esta finalidade, sendo este modelo também de utilização relativamente limitada.

De um modo geral, o modelo mais aconselhável é aquele que foi apresentado inicialmente, devido às facilidades que oferece para a sua utilização e por ser o mais completo.



Para a simulação de transformadores saturáveis no ATPDraw, precisamos entrar com algumas características do transformador através das informações fornecidas pelo fabricante. Antes precisamos transformar as informações do fabricante nos parâmetro do ATPDraw. Na Figura 4.9 a seguir encontra-se apresentada a tabela do “Component: TRAFO_S.sup” para transformadores monofásicos saturáveis no ATPDraw, caracterizando os principais parâmetros necessários para a simulação.

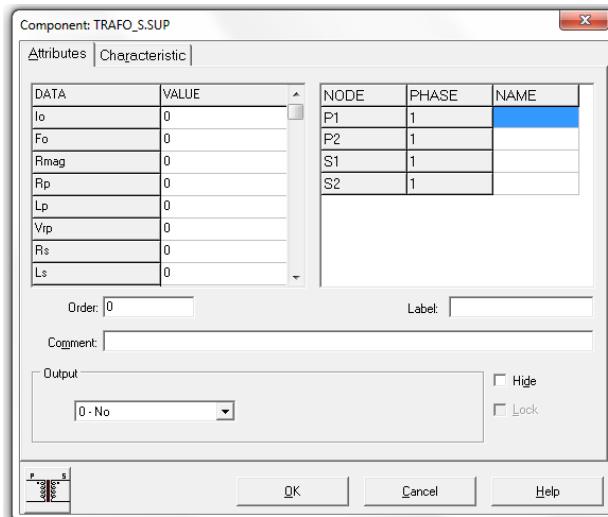


Figura 4.9 - Tela de visualização das características dos transformadores monofásicos saturáveis no ATPDraw.

No **Help**, podemos encontrar as informações de cada parâmetro e suas respectivas unidades, que o ATPDraw utiliza.

Nome: TRAFO_S - transformador saturável monofásico.

Cartão: BRANCH

Dados: Io Corrente [A] através do ramo magnetizante (MB- *Magnetizing Branch*) em regime permanente.

Fo Fluxo [Wb-espira] no MB em regime permanente.

O par Io, Fo define a indutância no MB em regime permanente.

Rmag Resistência de magnetização no ramo magnetizante em [ohm].

Rp Resistência no enrolamento primário em [ohm].

Lp Indutância no enrolamento primário em [mH] se Xopt.=0

Indutância no enrolamento primário em [ohm] se freq de Xopt= power.

Vrp Tensão em [kV] aplicada sobre o enrolamento primário.



Rs Resistência no enrolamento secundário em [ohm].

Ls Indutância no enrolamento secundário em [mH] se Xopt.=0

Indutância no enrolamento secundário em [ohm] se freq de Xopt= power.

Vrs Tensão em [kV] aplicada sobre o enrolamento secundário.

RMS Definição da característica não-linear:

0: A característica da corrente/fluxo deve ser incorporada.

1: A característica de Irms/Urms deve ser incorporada.

ATPDraw executa um cálculo de SATURATION.

Nó P1 = Lado Primário. Fase 1

P2 = Lado Primário. Fase 2

S1 = Lado Secundário. Fase 1

S2 = Lado Secundário. Fase 2

Estes dados são facilmente calculados conforme o conjunto de equações apresentadas anteriormente.

4.4 - Exemplo de Aplicação

Para exemplificar a utilização do ATP para a representação de transformadores trifásicos através de um banco de transformadores monofásicos, utiliza-se o seguinte transformador como exemplo: $S_n=300 \text{ kVA}$; $13,8/0,38 \text{ kV}$; $Z_{CC} = 4,5\%$; $R_{CC} = 1,12\%$; $I_o = 1,8\%$ Ligação DY - Banco de Transformadores Monofásico Unidade monofásica: - 100 kVA ; $13,8/0,22 \text{ kV}$.

Passo a passo:

1) Relação de transformação (α)

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \frac{13800}{220} = 62,73$$

2) Corrente nominal no primário e secundário (Ip e Is)

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{100}{13,8} = 7,25 \text{ [A]}$$



Configuração Δ : $I_{np(Linha)} = \sqrt{3} \cdot I_{np(Fase)} = \sqrt{3} \cdot 7,25 = 12,56$ [A]

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} = \frac{100}{0,22} = 454,54$$
 [A]

Configuração Y : $I_{np(Linha)} = I_{np(Fase)} = 454,54$ [A]

3) Corrente a vazio (I_0)

Como a corrente a vazio foi fornecida, então não usaremos o valor de 2% e sim o de 1,8%. Dessa forma:

$$I_0 = \frac{I_0\%}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{1,8}{100} \cdot \frac{100}{13,8} = 0,130$$
 [A]

$$I_{0(pico)} = \sqrt{2} \cdot 0,130 = 0,184$$
 [A]

É importante notar que o valor que deve ser inserido no ATP é o valor de pico da corrente de magnetização.

4) Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos \varphi_0$$

Assumindo, $\cos \varphi_0 \approx 0,2$

$$P_0 = 13,8 \cdot 0,130 \cdot 0,2 = 358,8$$
 [W]

$$P_{0(3\phi)} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot 358,8 = 1076,4$$
 [W]

Observe que para o cálculo da perda a vazio foi utilizado o valor RMS da corrente de magnetização e não o valor de pico.

5) Impedância do primário e secundário (Z_p e Z_s)

Impedância do primário:

$$Z_{base(p)} = \frac{V_{rp}^2}{S_{1\phi}} = \frac{13,8^2}{0,1} = 1904,4$$
 [Ω]



$$Z_{T(p)} = Z_{base(p)} \times \frac{Z_{cc}}{100} = 1904,4 \times \frac{4,5}{100} = 85,698 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = \frac{Z_{T(p)}}{2} = \frac{85,698}{2} = 42,849 \text{ } [\Omega]$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} = \frac{42,849}{62,73^2} = 0,01089 \text{ } [\Omega]$$

Ou:

$$Z_{base(s)} = \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} = \frac{0,22^2}{0,1} = 0,484 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T(s)} = Z_{base(s)} \times \frac{Z_{cc}}{100} = 0,484 \times \frac{4,5}{100} = 0,02178 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_s = \frac{Z_{T(s)}}{2} = \frac{0,02178}{2} = 0,01089 \text{ } [\Omega]$$

6) Resistência do primário e secundário (Rp e Rs)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%, a qual tem o valor de 1,12%. Na ausência desse valor pode estimar um valor igual a 1%. Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 1904,4 = 10,66 \text{ } [\Omega]$$

Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(s)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 0,484 = 0,00271 \text{ } [\Omega]$$

ou

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} = \frac{10,66}{62,73^2} = 0,00271 \text{ } [\Omega]$$



7) Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de R_p e R_s , sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 10,66 \cdot 7,25^2 + 0,00271 \cdot 454,54^2 = 1118,89 \text{ [W]}$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1118,89 = 3356,67 \text{ [W]}$$

8) Reatância do primário e secundário (X_p e X_s)

Reatância do primário:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = \sqrt{42,849^2 - 10,66^2} = 41,5 \text{ [\Omega]}$$

Reatância do secundário:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,01089^2 - 0,00271^2} = 0,01055 \text{ [\Omega]}$$

ou

$$X_s = \frac{X_p}{\alpha^2} = \frac{41,5}{62,73^2} = 0,01055 \text{ [\Omega]}$$

9) Indutância do primário e secundário (L_p e L_s)

Indutância do primário:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \times 1000 = \frac{41,5}{377} \times 1000 = 110,08 \text{ [mH]}$$

Indutância do secundário:

$$L_s = \frac{X_s}{377} \times 1000 = \frac{0,01055}{377} \times 1000 = 0,028 \text{ [mH]}$$

10) Resistência de magnetização (R_{mag})

$$R_{mag} = \frac{V_{rp}^2}{P_0} = \frac{13800^2}{1076,4} = 176923,07 \text{ [\Omega]}$$



11) Fluxo de magnetização (λ_0)

$$\lambda_0 = \frac{V_{rp}}{4,44 \cdot f} = \frac{13800}{4,44 \cdot 60} = 51,8 \text{ [Wb - espira]}$$

Em resumo teremos as seguintes informações:

Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	13,8 [kV]
V_{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,22 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	4,5 [%]
$R\%$	Resistência percentual	1,12 [%]
$I_0\%$	Corrente a vazio	1,8 [%]

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	62,73
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,184 [A]
P_0	Potência a vazio	358,8 [W]
Z_p	Impedância do primário	42,849 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,01089 [Ω]
R_p	Resistência do primário	10,66 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,00271 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	1118,89 [W]
X_p	Reatância do primário	41,5 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,01055 [Ω]
L_p	Indutância do primário	110,08 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,028 [mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	170204,31 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	51,8 [Wb-espira]

Os dados em destaque são os parâmetros de entrada para o componente TRAFO_S no ATPDraw.

A fim de simular estes valores no ATPDraw, foram realizadas duas simulações:

- Ensaio a vazio do transformador;
- Ensaio de curto-circuito do transformador.

Essas duas simulações foram realizadas, já que estão relacionadas aos dois ensaios mais realizados em transformadores para obtenção de parâmetros típicos.

A Figura 4.10 apresenta o modelo utilizado para realização de ambas as simulações.

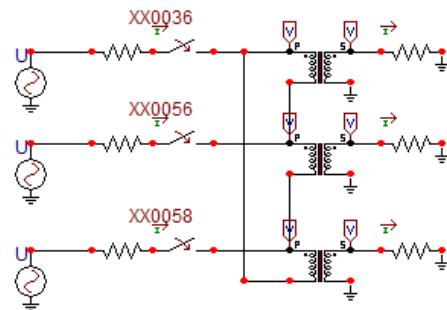


Figura 4.10 – Modelagem de Banco de transformadores monofásicos formando um transformador trifásico DY para simulação a vazio e de curto-circuito.

O controle para realizar o a simulação a vazio ou de curto-circuito foi através da resistência inserida após o transformador. Dessa forma, foi utilizado um valor de 1E12 [Ω] para simular um sistema aberto e um valor de 1E-12 [Ω] para simular um sistema em curto-circuito.

O emprego dessa resistência também foi utilizado, já que não é conveniente em simulações no ATP deixar algum ramo sem ligação, ou com ligações entre ramos de forma direta, podendo em alguns casos gerar erros.

Uma consideração importante deve ser ressaltada. Nota-se que após a fonte foi inserida uma resistência, cujo valor implementado foi igual a 630 [Ω]. Esta resistência foi inserida a fim de amortecer o valor na simulação do transformador com o secundário em curto-circuito. Em uma simulação real, o usuário deve inserir os dados corretos da impedância que está entre o transformador e a fonte.

Além dos parâmetros utilizados no componente TRAFO_S, foi utilizada a fonte AC tipo 14, com os dados conforme apresenta a Figura 4.11.

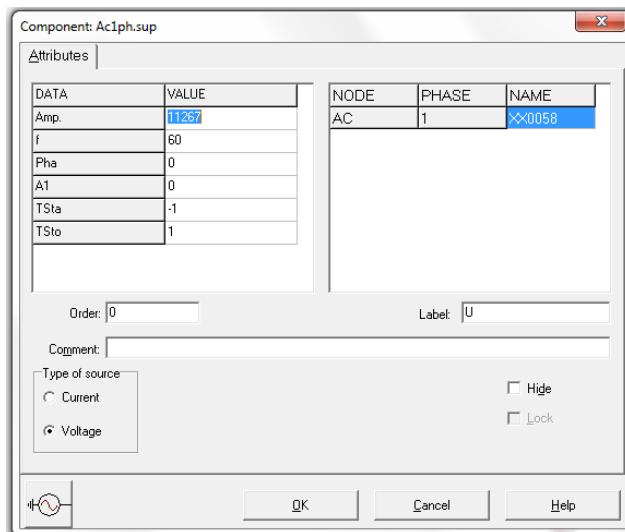


Figura 4.11 – Dados da fonte AC tipo 14 utilizada para simulação do transformador.

Observe que o valor da amplitude foi de 11267 [V], já que no ATP deve ser inserido o valor de pico da tensão para este componente. Além disso, a tensão da fonte é fase-neutro. Portanto, o usuário deve inserir o valor de tensão de forma a obter a tensão de linha nominal desejada. Como neste caso, o valor nominal do primário do transformador é de 13800 [V], a tensão de fase é de aproximadamente 7967 [V] RMS, ou seja, aproximadamente 11267 [V] de pico.

Além disso, observe que foi inserida uma chave após a fonte para caso deseja-se simular a corrente inrush. Como neste caso não é o objetivo, então o tempo de fechamento (T-cl) e o tempo de inicialização da fonte (TSta) foi igual a -1 [s] de forma a eliminar qualquer transitório.

O tempo total para todas as simulações foi de 100 [ms], conforme pode ser visualizado na Figura 4.12, a qual apresenta as configurações das simulações realizadas. Assim, o tempo de abertura da chave (T-op) e o tempo de finalização de simulação da fonte (TSto) foi de 1 [s] para garantir que toda a simulação seja desenvolvida.

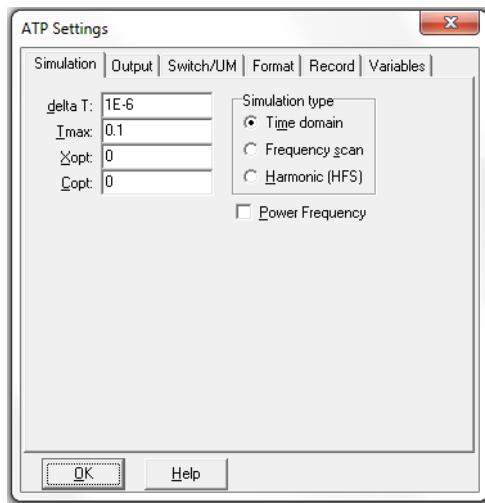


Figura 4.12 – Dados de configuração para simulação.

4.5 - Ensaio a Vazio do transformador:

O ensaio a vazio do transformador tem por objetivo determinar as suas perdas no núcleo magnético. Geralmente, este ensaio é realizado aplicando-se tensão nominal no lado de baixa tensão. A corrente que circulará pelo transformador será a corrente de magnetização, rica em harmônicos, responsável pelo estabelecimento dos campos magnéticos que circularão pelo transformador. No ATP, é possível realizar este ensaio do lado de alta tensão, coisa que na prática não é, devido ao alto valor da tensão primária.

Foi aplicada uma tensão de fase eficaz de 13800 [V] (19516,15 [V] de pico) no primário do transformador, resultando em uma tensão eficaz sobre a bobina de 220 [V] (311,13 [V] de pico). Os gráficos para estas tensões durante o ensaio a vazio estão representados abaixo, Figuras 4.13 e 4.14.

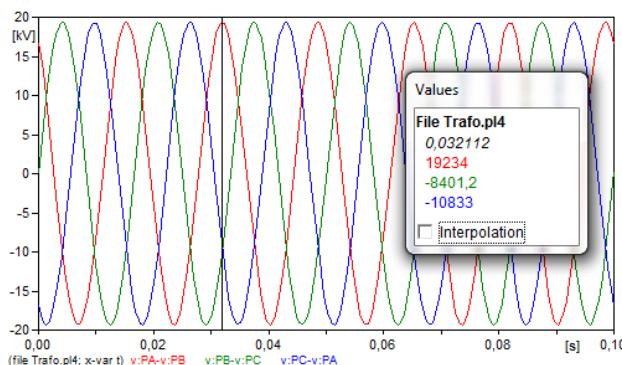


Figura 4.13 – Tensão no enrolamento primário – Ensaio a vazio.

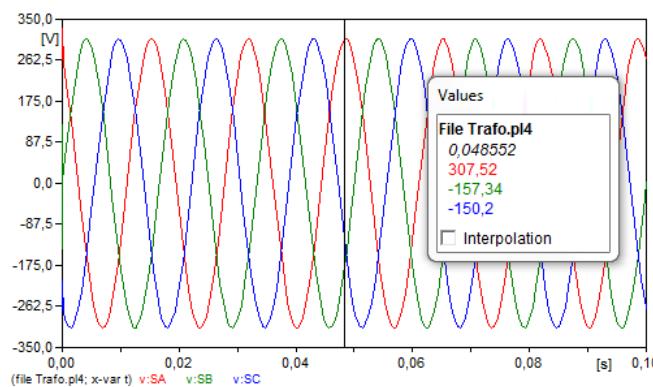


Figura 4.14 – Tensão no enrolamento secundário – Ensaio a vazio.

Com a aplicação da tensão no primário do transformador, verifica-se a circulação de uma corrente pelo mesmo, corrente esta de magnetização, responsável pela energização do mesmo. A corrente tem a forma de onda representada na Figura 4.15. O valor de pico para a corrente de linha foi de 0,329 [A], ou seja, uma corrente na fase igual a aproximadamente 0,190 [A], valor próximo ao calculado, o qual é de 0,184 [A].

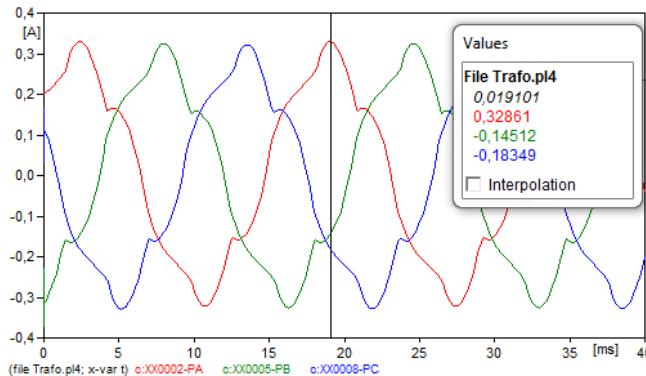


Figura 4.15 – Corrente de magnetização – Ensaio a vazio.

Com a análise de Fourier destas ondas de corrente pode-se verificar o conteúdo harmônico da corrente de magnetização, conforme é apresentado na Figura 4.16. Pode ser notada uma alta presença de 5^a harmônica (aproximadamente 12% da fundamental). Como o efeito de histerese não é considerado no modelo deste transformador, a presença de 3^a harmônica não é evidente, como esperado.

Observe ainda que o período para análise Fourier foi de um ciclo e não do tempo total de simulação, o qual foi de 100 [ms]. Isto é realizado para obter resultados mais adequados.

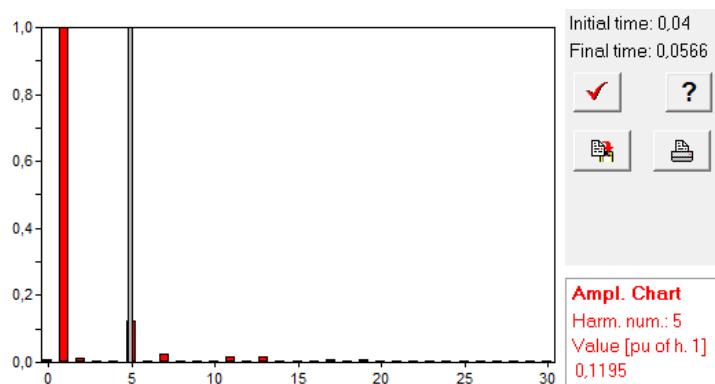


Figura 4.16 – Corrente de magnetização – Ensaio a vazio.

4.6 - Ensaio em curto-circuito do transformador

O ensaio em curto-circuito é feito aplicando-se tensão no lado de alta tensão do transformador com o secundário em curto-circuito até que a corrente nominal primária do transformador seja atingida.

A tensão aplicada no primário com o secundário em curto-circuito foi de 874,02 [V] de pico, ou seja, 618,03 [V] RMS, Figura 4.17, correspondendo a uma corrente de linha de pico no primário de 17,655 [A], ou seja, 12,48 [A] RMS (Primário em Delta: 7,20 [A] RMS de fase), Figura 4.18. Sabe-se que a corrente nominal de linha no primário do transformador calculada foi de 12,56 [A].

A corrente de curto-circuito encontrada no enrolamento secundário do transformador está apresentada na Figura 4.19. Nota-se que o valor da corrente de linha de pico, a qual é igual a corrente de fase (ligação no secundário está em estrela) é igual a 638,11 [A], ou seja, 451,21 [A] RMS. Sabe-se que a corrente nominal de linha no secundário do transformador calculada foi de 454,54 [A], ou seja, bem próximo do valor simulado.

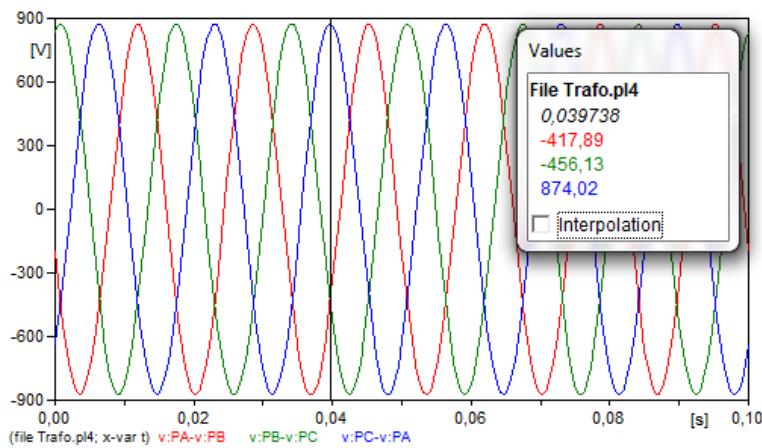


Figura 4.17 – Tensão aplicada no primário – Ensaio de curto-circuito.

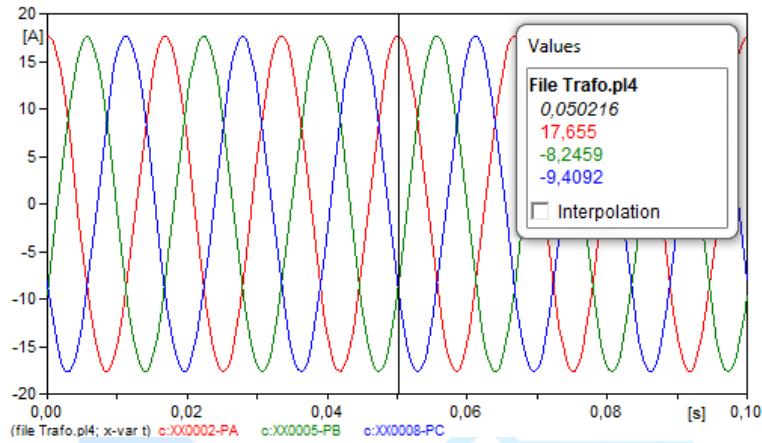


Figura 4.18 – Corrente de linha no primário – Ensaio de curto-circuito.

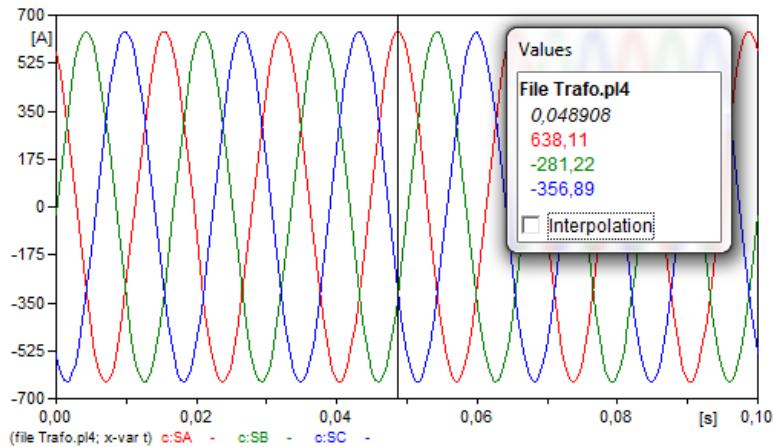


Figura 4.19 – Corrente de linha no secundário – Ensaio de curto-circuito.



Cálculo da impedância percentual e perdas em curto-círcuito:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_n} \times 100\% = \frac{618,03}{13800} \times 100\% = 4,48\%$$

Observe que o valor da impedância percentual de curto-círcuito encontrado pela simulação, 4,48%, foi bem próximo ao valor fornecido, o qual é igual a 4,5%.

A perda em curto-círcuito pode ser obtida a partir dos valores de correntes das três fases tomando-se o primário e secundário. Sabe-se que:

Corrente de fase RMS do Primário (Simulação) : $I_A \approx I_B \approx I_C = 7,20$ [A]

Resistência do Primário (Calculado) : $R_p = 10,66$ [Ω]

E:

Corrente de fase RMS do Secundário (Simulação) : $I_A \approx I_B \approx I_C = 451,21$ [A]

Resistência do Secundário (Calculado) : $R_s = 0,00271$ [Ω]

Portanto:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 10,66 \cdot 7,20^2 + 0,00271 \cdot 451,21^2 = 1105,16$$
 [W]

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1105,16 = 3315,49$$
 [W]

O valor total da perda, 3315,49 [W] foi bem próximo ao calculado, o qual é igual a 3356,67 [W].

Conclusão

Através da simulação realizada no ATPDraw pode-se observar que os valores encontrados são bem próximos aos calculados.

Além disso, dados como, resistência e impedância percentual e corrente a vazio, podem ser implementados na simulação com maior precisão, quando o transformador a ser simulado dispõe dos valores de ensaio de curto e a vazio.

5 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DOIS ENROLAMENTOS NO ATP

5.1 – Introdução

A introdução e toda parte teórica de transformadores monofásico, e consequentemente, trifásico de dois enrolamentos foram apresentadas no item 4, cujo título é “Modelagem de Transformadores Monofásicos no ATP”.

Na sequencia será apresentado apenas a modelagem e parametrização dos transformadores de dois enrolamento no ATPDraw.

5.2 – Localização dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATPDraw

Os transformadores de dois enrolamentos, no ATPDraw, podem ser obtidos conforme mostra a Figura 5.1

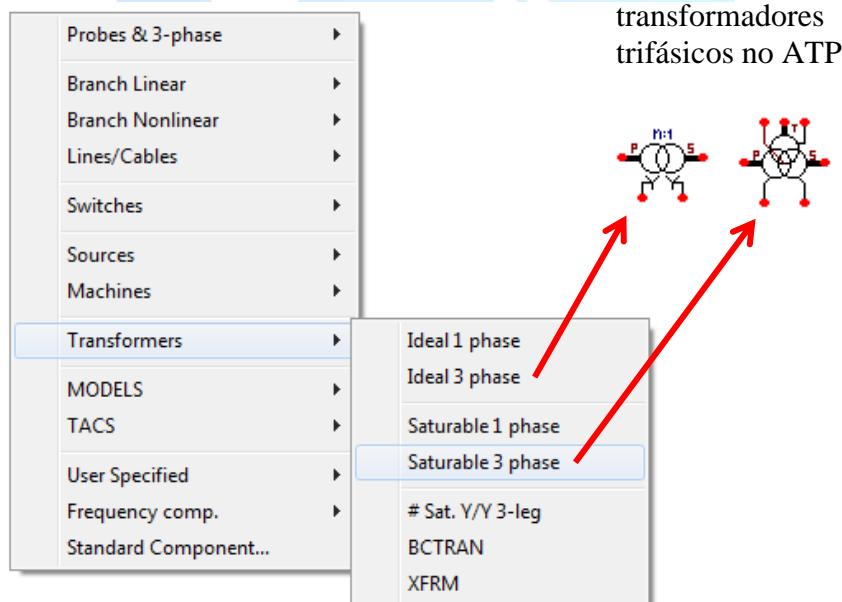


Figura 5.1 – Localização dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP.



5.3 - Características dos transformadores de dois enrolamentos no ATPDraw

Na Figura 5.2 a seguir encontra-se apresentada a tela do “Component: TRAFO_I3.sup” para transformadores trifásicos ideais no ATPDraw.

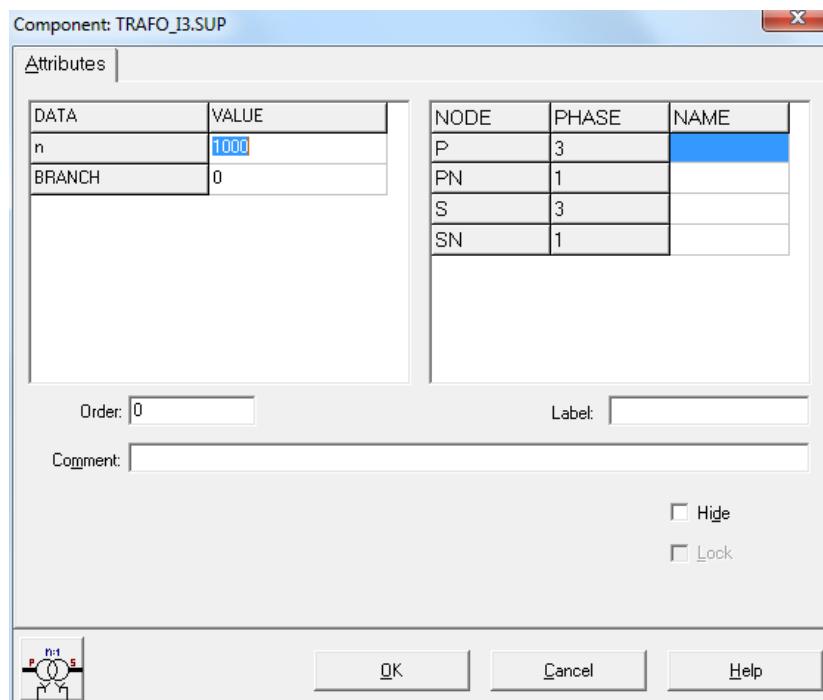


Figura 5.2 - Tela de visualização das características dos transformadores trifásicos ideais no ATPDraw.

No **Help**, podemos encontrar a informação do único parâmetro para especificar esse componente no ATPDraw:

Nome: TRAFO_I3 - transformador ideal trifásico.

Cartão: SOURCE/BRANCH

Dado: n Relação de transformação.

Tensão do primário dividida pela tensão do secundário.

Relação entre os enrolamentos secundário e primário.

BRANCH

0 – Opção SOURCE: fornece um melhor controle de inicialização.

1 – Opção BRANCH: permite melhor aterramento dos terminais e conexão das chaves.



Nó P = Primário
PN = Neutro do Primário
S = Secundário
SN = Neutro do Secundário

Para a simulação de transformadores saturáveis no ATPDraw, precisamos entrar com algumas características do transformador através das informações fornecidas pelo fabricante. Antes precisamos transformar as informações do fabricante nos parâmetro do ATPDraw. Na Figura 5.3 a seguir encontra-se apresentada a tala do “Component: SATTRAFO.sup” para transformadores trifásicos saturáveis de dois e três enrolamentos no ATPDraw, caracterizando os principais parâmetros necessários para a simulação.

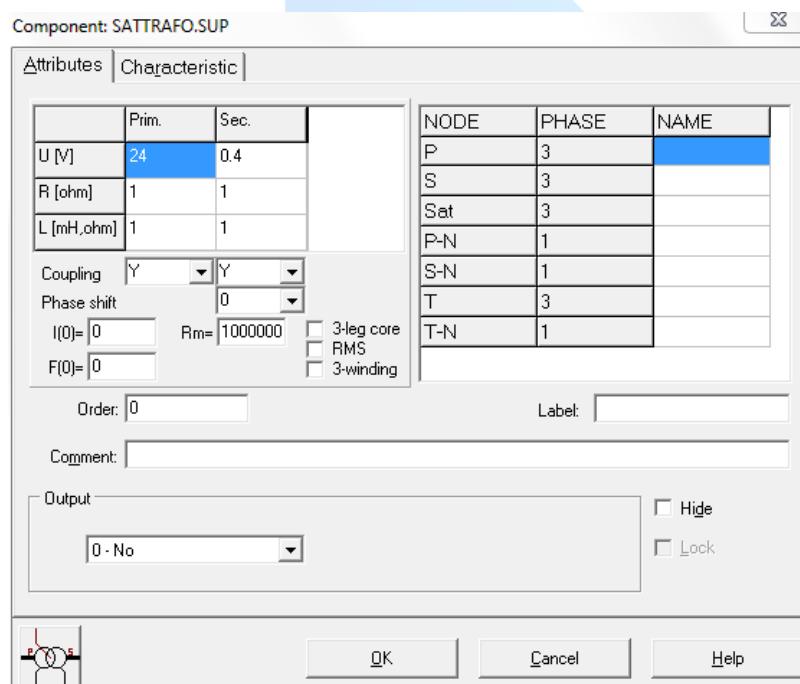


Figura 5.3 - Tela de visualização das características dos transformadores trifásicos saturáveis no ATPDraw.

No **Help**, podemos encontrar as informações de cada parâmetro e suas respectivas unidades, que o ATPDraw utiliza.

Nome: SATTRAFO - transformador saturável trifásico – 2 ou 3 enrolamentos.

Cartão: BRANCH

Dados: I_o Corrente [A] através do ramo magnetizante (MB- *Magnetizing Branch*) em regime permanente.

Fo	Fluxo [Wb-espira] no MB em regime permanente.
	O par Io, Fo define a indutância no MB em regime permanente.
Rmag	Resistência de magnetização no ramo magnetizante em [ohm].
Rp	Resistência no enrolamento primário em [ohm].
Lp	Indutância no enrolamento primário em [mH] se Xopt.=0 Indutância no enrolamento primário em [ohm] se freq de Xopt= power.
Vrp	Tensão em [kV] aplicada sobre o enrolamento primário.
Rs	Resistência no enrolamento secundário em [ohm].
Ls	Indutância no enrolamento secundário em [mH] se Xopt.=0 Indutância no enrolamento secundário em [ohm] se freq de Xopt= power.
Vrs	Tensão em [kV] aplicada sobre o enrolamento secundário.
RMS	Definição da característica não-linear: 0: A característica da corrente/fluxo deve ser incorporada. 1: A característica de Irms/Urms deve ser incorporada. ATPDraw executa um cálculo de SATURATION.
3-winding	Opção para ativar e desativar o terceiro enrolamento.
Nó	P = Lado Primário. Nó trifásico PN = Neutro do primário S = Lado Secundário. Nó trifásico SN = Neutro do secundário

A tensão no primário (Vrp) e a tensão no secundário (Vrs) vão depender do tipo de enrolamento. Para um enrolamento do tipo Y a tensão Vrp ou Vrs, é a tensão fase-neutro, e para o enrolamento do tipo Δ a tensão Vrp ou Vrs, é a tensão fase-fase aplicada sobre o enrolamento.

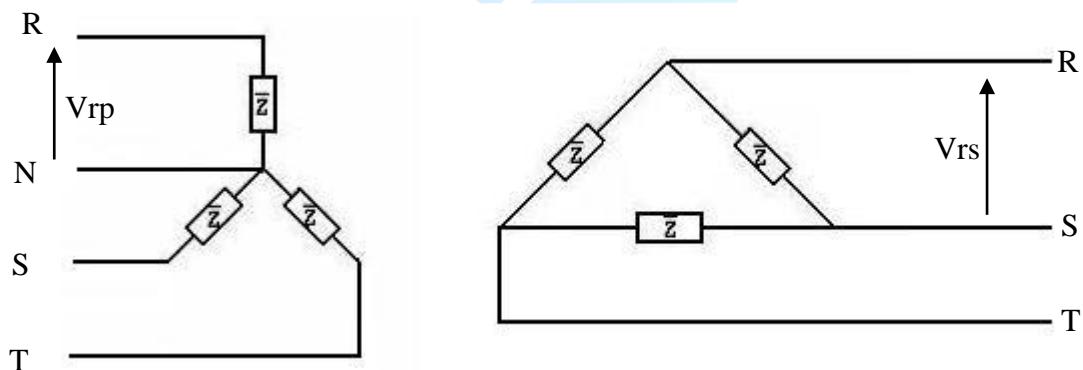
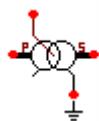


Figura 5.4 - Tensões Vrp e Vrs para transformador Y- Δ



5.4 - Exemplos de Aplicações

5.4.1 - Transformador D – Y



Para exemplificar a utilização de transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP, utiliza-se o seguinte transformador como exemplo:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: $S_n = 300 \text{ kVA}$;
- Tensões nominais de linha: 13,8/0,38 kV;
- Impedância Z%: $Z_{CC} = 4,5\%$;
- Resistência R%: $R_{CC} = 1,12\%$;
- Corrente a vazio: $I_o = 1,8\%$;
- Ligação Delta Estrela - aterrado.

Passo a passo:

1) Relação de transformação (α)

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \frac{13800}{220} = 62,73$$

2) Corrente nominal no primário e secundário (I_p e I_s)

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{100}{13,8} = 7,25 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } \Delta : I_{np(\text{Linha})} = \sqrt{3} \cdot I_{np(\text{Fase})} = \sqrt{3} \cdot 7,25 = 12,56 \text{ [A]}$$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} = \frac{100}{0,22} = 454,54 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } Y : I_{np(\text{Linha})} = I_{np(\text{Fase})} = 454,54 \text{ [A]}$$



3) Corrente a vazio (I_0)

Como a corrente a vazio foi fornecida, então não usaremos o valor de 2% e sim o de 1,8%. Dessa forma:

$$I_0 = \frac{I_0\%}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{1,8}{100} \cdot \frac{100}{13,8} = 0,130 \text{ [A]}$$

$$I_{0(pico)} = \sqrt{2} \cdot 0,130 = 0,184 \text{ [A]}$$

É importante notar que o valor que deve ser inserido no ATP é o valor de pico da corrente de magnetização.

4) Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos \varphi_0$$

Assumindo, $\cos \varphi_0 \approx 0,2$

$$P_0 = 13800 \cdot 0,130 \cdot 0,2 = 358,8 \text{ [W]}$$

$$P_{0(3\phi)} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot 358,8 = 1076,4 \text{ [W]}$$

Observe que para o cálculo da perda a vazio foi utilizado o valor RMS da corrente de magnetização e não o valor de pico.

5) Impedância do primário e secundário (Zp e Zs)

Impedância do primário:

$$Z_{base(p)} = \frac{V_{rp}^2}{S_{1\phi}} = \frac{13,8^2}{0,1} = 1904,4 \text{ [\Omega]}$$

$$Z_{T(p)} = Z_{base(p)} \times \frac{Z_{cc}}{100} = 1904,4 \times \frac{4,5}{100} = 85,698 \text{ [\Omega]}$$

$$Z_p = \frac{Z_{T(p)}}{2} = \frac{85,698}{2} = 42,849 \text{ [\Omega]}$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} = \frac{42,849}{62,73^2} = 0,01089 \text{ [\Omega]}$$

Ou:

$$Z_{base(s)} = \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} = \frac{0,22^2}{0,1} = 0,484 \text{ [\Omega]}$$

$$Z_{T(s)} = Z_{base(s)} \times \frac{Z_{cc}}{100} = 0,484 \times \frac{4,5}{100} = 0,02178 \text{ [\Omega]}$$



$$Z_s = \frac{Z_{T(s)}}{2} = \frac{0,02178}{2} = 0,01089 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = Z_s \times \alpha^2 = 0,01089 \times 62,73^2 = 42,85 \text{ } [\Omega]$$

6) Resistência do primário e secundário (Rp e Rs)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%, a qual tem o valor de 1,12%. Na ausência desse valor pode estimar um valor igual a 1%. Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 1904,4 = 10,66 \text{ } [\Omega]$$

Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(s)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 0,484 = 0,00271 \text{ } [\Omega]$$

ou

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} = \frac{10,66}{62,73^2} = 0,00271 \text{ } [\Omega]$$

7) Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de Rp e Rs, sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 10,66 \cdot 7,25^2 + 0,00271 \cdot 454,54^2 = 1120,22 \text{ } [W]$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1120,22 = 3360,66 \text{ } [W]$$

8) Reatância do primário e secundário (X_p e X_s)

Reatância do primário:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = \sqrt{42,849^2 - 10,66^2} = 41,5 \text{ } [\Omega]$$

Reatância do secundário:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,01089^2 - 0,00271^2} = 0,01055 \text{ } [\Omega]$$

ou

$$X_s = \frac{X_p}{\alpha^2} = \frac{41,5}{62,73^2} = 0,01055 \text{ } [\Omega]$$



9) Indutância do primário e secundário (L_p e L_s)

Indutância do primário:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \times 1000 = \frac{41,5}{377} \times 1000 = 110,08 \text{ [mH]}$$

Indutância do secundário:

$$L_s = \frac{X_s}{377} \times 1000 = \frac{0,01055}{377} \times 1000 = 0,028 \text{ [mH]}$$

10) Resistência de magnetização (R_{mag})

$$R_{mag} = \frac{V_{rp}^2}{P_0} = \frac{13800^2}{1076,4} = 176923,07 \text{ [\Omega]}$$

11) Fluxo de magnetização (λ₀)

$$\lambda_0 = \frac{V_{rp}}{4,44 \cdot f} = \frac{13800}{4,44 \cdot 60} = 51,8 \text{ [Wb - espira]}$$

Em resumo teremos as seguintes informações:

Dados de Entrada:

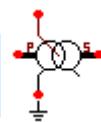
Sigla	Definição	Unidade
S _{1φ}	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V _{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	13,8 [kV]
V _{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,22 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
Z%	Impedância percentual	4,5 [%]
R%	Resistência percentual	1,12 [%]
I ₀ %	Corrente a vazio	1,8 [%]

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	62,73
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,184 [A]
P_0	Potência a vazio	1076,4[W]
Z_p	Impedância do primário	42,849 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,01089 [Ω]
R_p	Resistência do primário	10,66 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,00271 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	3360,66 [W]
X_p	Reatância do primário	41,5 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,01055 [Ω]
L_p	Indutância do primário	110,08 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,028 [mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	176923,07 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	51,8 [Wb-espira]

Os dados em destaque são os parâmetros de entrada para o componente SATTRAFO no ATPDraw.

5.4.2 - Transformador Y – D



Para exemplificar a utilização de transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP, utiliza-se o seguinte transformador como exemplo:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: $S_n=300$ kVA;
- Tensões nominais de linha: 13,8/0,38 kV;
- Impedância Z%: $Z_{CC} = 4,5\%$;
- Resistência R%: $R_{CC} = 1,12\%$;
- Corrente a vazio: $I_o = 1,8\%$;
- Ligação Estrela Delta - aterrado.



Passo a passo:

1) Relação de transformação (α)

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{380} = 20,97$$

2) Corrente nominal no primário e secundário (I_p e I_s)

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{100}{13,8} = 12,55 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } Y : I_{np(\text{Linha})} = I_{np(\text{Fase})} = 12,55 \text{ [A]}$$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} = \frac{100}{0,38} = 263,15 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } \Delta : I_{np(\text{Linha})} = \sqrt{3} \cdot I_{np(\text{Fase})} = \sqrt{3} \cdot 263,15 = 455,80 \text{ [A]}$$

3) Corrente a vazio (I_0)

Como a corrente a vazio foi fornecida, então não usaremos o valor de 2% e sim o de 1,8%. Dessa forma:

$$I_0 = \frac{I_0 \%}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{1,8}{100} \cdot \frac{100}{13,8} = 0,226 \text{ [A]}$$

$$I_{0(pico)} = \sqrt{2} \cdot 0,226 = 0,319 \text{ [A]}$$

É importante notar que o valor que deve ser inserido no ATP é o valor de pico da corrente de magnetização.

4) Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos \varphi_0$$

Assumindo, $\cos \varphi_0 \approx 0,2$

$$P_0 = \frac{13800}{\sqrt{3}} \cdot 0,226 \cdot 0,2 = 360,12 \text{ [W]}$$

$$P_{0(3\phi)} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot 360,12 = 1080,38 \text{ [W]}$$



Observe que para o cálculo da perda a vazio foi utilizado o valor RMS da corrente de magnetização e não o valor de pico.

5) Impedância do primário e secundário (Z_p e Z_s)

Impedância do primário:

$$Z_{base(p)} = \frac{\left(\frac{V_{rp}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S_{1\phi}} = \frac{\left(\frac{13,8}{\sqrt{3}}\right)^2}{0,1} = 634,8 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T(p)} = Z_{base(p)} \times \frac{Zcc}{100} = 634,8 \times \frac{4,5}{100} = 28,566 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = \frac{Z_{T(p)}}{2} = \frac{28,566}{2} = 14,283 \text{ } [\Omega]$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} = \frac{14,283}{20,97^2} = 0,03248 \text{ } [\Omega]$$

Ou:

$$Z_{base(s)} = \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} = \frac{0,38^2}{0,1} = 1,444 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T(s)} = Z_{base(s)} \times \frac{Zcc}{100} = 1,444 \times \frac{4,5}{100} = 0,06498 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_s = \frac{Z_{T(s)}}{2} = \frac{0,06498}{2} = 0,03249 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = Z_s \times \alpha^2 = 0,03249 \times 20,97^2 = 14,287 \text{ } [\Omega]$$

6) Resistência do primário e secundário (R_p e R_s)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%, a qual tem o valor de 1,12%. Na ausência desse valor pode estimar um valor igual a 1%. Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 634,8 = 3,5549 \text{ } [\Omega]$$

Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(s)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 1,444 = 0,0081 \text{ } [\Omega]$$

ou

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} = \frac{3,5549}{20,97^2} = 0,0081 \text{ } [\Omega]$$



7) Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de R_p e R_s , sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 3,5549 \cdot 12,55^2 + 0,0081 \cdot 263,15^2 = 1120,81 \text{ [W]}$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1120,81 = 3362,44 \text{ [W]}$$

8) Reatância do primário e secundário (X_p e X_s)

Reatância do primário:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = \sqrt{14,283^2 - 3,5549^2} = 13,83 \text{ [\Omega]}$$

Reatância do secundário:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,03248^2 - 0,0081^2} = 0,03145 \text{ [\Omega]}$$

ou

$$X_s = \frac{X_p}{\alpha^2} = \frac{13,85}{20,97^2} = 0,03145 \text{ [\Omega]}$$

9) Indutância do primário e secundário (L_p e L_s)

Indutância do primário:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \times 1000 = \frac{13,83}{377} \times 1000 = 36,684 \text{ [mH]}$$

Indutância do secundário:

$$L_s = \frac{X_s}{377} \times 1000 = \frac{0,03145}{377} \times 1000 = 0,0834 \text{ [mH]}$$

10) Resistência de magnetização (R_{mag})

$$R_{mag} = \frac{\left(\frac{V_{rp}}{\sqrt{3}}\right)^2}{P_0} = \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}}\right)^2}{1080,38} = 58757,10 \text{ [\Omega]}$$

11) Fluxo de magnetização (λ_0)

$$\lambda_0 = \frac{V_{rp}}{4,44 \cdot f} = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{4,44 \cdot 60} = 29,908 \text{ [Wb - espira]}$$



Em resumo teremos as seguintes informações:

Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	7,967 [kV]
V_{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,38 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	4,5 [%]
$R\%$	Resistência percentual	1,12 [%]
$I_0\%$	Corrente a vazio	1,8 [%]

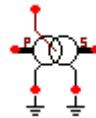
Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	20,97
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,319 [A]
P_0	Potência a vazio	1080,38 [W]
Z_p	Impedância do primário	14,283 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,03248 [Ω]
R_p	Resistência do primário	3,5549 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,0081 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-círcuito	3362,44 [W]
X_p	Reatância do primário	13,83 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,03145 [Ω]
L_p	Indutância do primário	36,684 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,0834 [mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	58757,10 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	29,908 [Wb-espira]

Os dados em destaque são os parâmetros de entrada para o componente SATTRAFO no ATPDraw.



5.4.3 - Transformador Y – Y



Para exemplificar a utilização de transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP, utiliza-se o seguinte transformador como exemplo:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: $S_n = 300 \text{ kVA}$;
- Tensões nominais de linha: 13,8/0,38 kV;
- Impedância Z%: $Z_{CC} = 4,5\%$;
- Resistência R%: $R_{CC} = 1,12\%$;
- Corrente a vazio: $I_o = 1,8\%$;
- Ligação Estrela Estrela - aterrado.

Passo a passo:

1) Relação de transformação (α)

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{\frac{380}{\sqrt{3}}} = 36,31$$

2) Corrente nominal no primário e secundário (I_p e I_s)

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{100}{\frac{13,8}{\sqrt{3}}} = 12,55 \text{ [A]}$$

Configuração Y: $I_{np(Linha)} = I_{np(Fase)} = 12,55 \text{ [A]}$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} = \frac{100}{\frac{0,38}{\sqrt{3}}} = 455,8 \text{ [A]}$$

Configuração Y: $I_{np(Linha)} = I_{np(Fase)} = 455,8 \text{ [A]}$



3) Corrente a vazio (I_0)

Como a corrente a vazio foi fornecida, então não usaremos o valor de 2% e sim o de 1,8%. Dessa forma:

$$I_0 = \frac{I_0 \%}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{1,8}{100} \cdot \frac{100}{\frac{13,8}{\sqrt{3}}} = 0,226 \text{ [A]}$$

$$I_{0(pico)} = \sqrt{2} \cdot 0,226 = 0,319 \text{ [A]}$$

É importante notar que o valor que deve ser inserido no ATP é o valor de pico da corrente de magnetização.

4) Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos \varphi_0$$

Assumindo, $\cos \varphi_0 \approx 0,2$

$$P_0 = \frac{13800}{\sqrt{3}} \cdot 0,226 \cdot 0,2 = 360,12 \text{ [W]}$$

$$P_{0(3\phi)} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot 360,12 = 1080,38 \text{ [W]}$$

Observe que para o cálculo da perda a vazio foi utilizado o valor RMS da corrente de magnetização e não o valor de pico.

5) Impedância do primário e secundário (Z_p e Z_s)

Impedância do primário:

$$Z_{base(p)} = \frac{\left(\frac{V_{rp}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S_{1\phi}} = \frac{\left(\frac{13,8}{\sqrt{3}}\right)^2}{0,1} = 634,8 \text{ [\Omega]}$$

$$Z_{T(p)} = Z_{base(p)} \times \frac{Z_{cc}}{100} = 634,8 \times \frac{4,5}{100} = 28,566 \text{ [\Omega]}$$

$$Z_p = \frac{Z_{T(p)}}{2} = \frac{28,566}{2} = 14,283 \text{ [\Omega]}$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} = \frac{14,283}{36,31^2} = 0,01084 \text{ [\Omega]}$$

Ou:



$$Z_{base(s)} = \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} = \frac{\left(\frac{0,38}{\sqrt{3}}\right)^2}{0,1} = 0,4813 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T(s)} = Z_{base(s)} \times \frac{Zcc}{100} = 0,4813 \times \frac{4,5}{100} = 0,021658 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_s = \frac{Z_{T(s)}}{2} = \frac{0,021658}{2} = 0,01083 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = Z_s \times \alpha^2 = 0,01083 \times 36,31^2 = 14,283 \text{ } [\Omega]$$

6) Resistência do primário e secundário (Rp e Rs)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%, a qual tem o valor de 1,12%. Na ausência desse valor pode estimar um valor igual a 1%. Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 634,8 = 3,5549 \text{ } [\Omega]$$

Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(s)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 0,4813 = 0,0027 \text{ } [\Omega]$$

ou

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} = \frac{3,5549}{36,31^2} = 0,0027 \text{ } [\Omega]$$

7) Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de Rp e Rs, sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 3,5549 \cdot 12,55^2 + 0,0027 \cdot 455,8^2 = 1120,84 \text{ } [\text{W}]$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1120,84 = 3362,52 \text{ } [\text{W}]$$

8) Reatância do primário e secundário (X_p e X_s)

Reatância do primário:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = \sqrt{14,283^2 - 3,5549^2} = 13,83 \text{ } [\Omega]$$

Reatância do secundário:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,01084^2 - 0,0027^2} = 0,010498 \text{ } [\Omega]$$



ou

$$X_s = \frac{X_p}{\alpha^2} = \frac{13,85}{36,31^2} = 0,010498 \text{ } [\Omega]$$

9) Indutância do primário e secundário (L_p e L_s)

Indutância do primário:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \times 1000 = \frac{13,83}{377} \times 1000 = 36,684 \text{ } [mH]$$

Indutância do secundário:

$$L_s = \frac{X_s}{377} \times 1000 = \frac{0,010498}{377} \times 1000 = 0,0278 \text{ } [mH]$$

10) Resistência de magnetização (R_{mag})

$$R_{mag} = \frac{\left(\frac{V_{rp}}{\sqrt{3}}\right)^2}{P_0} = \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}}\right)^2}{1080,38} = 58757,10 \text{ } [\Omega]$$

11) Fluxo de magnetização (λ₀)

$$\lambda_0 = \frac{V_{rp}}{4,44 \cdot f} = \frac{13800}{4,44 \cdot 60} = 29,908 \text{ [Wb - espira]}$$

Em resumo teremos as seguintes informações:

Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
S _{1φ}	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V _{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	7,967 [kV]
V _{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,22 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
Z%	Impedância percentual	4,5 [%]
R%	Resistência percentual	1,12 [%]
I ₀ %	Corrente a vazio	1,8 [%]

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	36,31
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,319 [A]
P_0	Potência a vazio	1080,38[W]
Z_p	Impedância do primário	14,283 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,01084 [Ω]
R_p	Resistência do primário	3,5549 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,0027 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-círcuito	3362,52[W]
X_p	Reatância do primário	13,83 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,010498 [Ω]
L_p	Indutância do primário	36,684 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,0278 [mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	58757,10 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	29,908 [Wb-espira]

Os dados em destaque são os parâmetros de entrada para o componente SATTRAFO no ATPDraw.

5.4.4 - Transformador D – D



Para exemplificar a utilização de transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP, utiliza-se o seguinte transformador como exemplo:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: $S_n=300$ kVA;
- Tensões nominais de linha: 13,8/0,38 kV;
- Impedância Z%: $Z_{CC} = 4,5\%$;
- Resistência R%: $R_{CC} = 1,12\%$;
- Corrente a vazio: $I_0 = 1,8\%$;
- Ligação Delta Delta.



Passo a passo:

1) Relação de transformação (α)

$$\alpha = \frac{V_p}{V_s} = \frac{13800}{380} = 36,31$$

2) Corrente nominal no primário e secundário (I_p e I_s)

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{100}{13,8} = 7,25 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } \Delta : I_{np(\text{Linha})} = \sqrt{3} \cdot I_{np(\text{Fase})} = \sqrt{3} \cdot 7,25 = 12,56 \text{ [A]}$$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} = \frac{100}{0,38} = 263,15 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } \Delta : I_{np(\text{Linha})} = \sqrt{3} \cdot I_{np(\text{Fase})} = \sqrt{3} \cdot 263,15 = 455,8 \text{ [A]}$$

3) Corrente a vazio (I_0)

Como a corrente a vazio foi fornecida, então não usaremos o valor de 2% e sim o de 1,8%. Dessa forma:

$$I_0 = \frac{I_0 \%}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{1,8}{100} \cdot \frac{100}{13,8} = 0,130 \text{ [A]}$$

$$I_{0(\text{pico})} = \sqrt{2} \cdot 0,130 = 0,184 \text{ [A]}$$

É importante notar que o valor que deve ser inserido no ATP é o valor de pico da corrente de magnetização.

4) Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos \varphi_0$$

Assumindo, $\cos \varphi_0 \approx 0,2$

$$P_0 = 13800 \cdot 0,130 \cdot 0,2 = 358,8 \text{ [W]}$$

$$P_{0(3\phi)} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot 358,8 = 1076,4 \text{ [W]}$$

Observe que para o cálculo da perda a vazio foi utilizado o valor RMS da corrente de magnetização e não o valor de pico.



5) Impedância do primário e secundário (Z_p e Z_s)

Impedância do primário:

$$Z_{base(p)} = \frac{V_{rp}^2}{S_{1\phi}} = \frac{13,8^2}{0,1} = 1904,4 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T(p)} = Z_{base(p)} \times \frac{Zcc}{100} = 1904,4 \times \frac{4,5}{100} = 85,698 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = \frac{Z_{T(p)}}{2} = \frac{85,698}{2} = 42,849 \text{ } [\Omega]$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} = \frac{42,849}{36,31^2} = 0,0325 \text{ } [\Omega]$$

Ou:

$$Z_{base(s)} = \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} = \frac{0,38^2}{0,1} = 1.444 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T(s)} = Z_{base(s)} \times \frac{Zcc}{100} = 1.444 \times \frac{4,5}{100} = 0,06498 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_s = \frac{Z_{T(s)}}{2} = \frac{0,06498}{2} = 0,0325 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_p = Z_s \times \alpha^2 = 0,0325 \times 36,31^2 = 42,85 \text{ } [\Omega]$$

6) Resistência do primário e secundário (R_p e R_s)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%, a qual tem o valor de 1,12%. Na ausência desse valor pode estimar um valor igual a 1%. Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 1904,4 = 10,66 \text{ } [\Omega]$$

Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(s)} = \frac{1,12}{2 \cdot 100} \cdot 1.444 = 0,0081 \text{ } [\Omega]$$

ou

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} = \frac{10,66}{36,31^2} = 0,0081 \text{ } [\Omega]$$



7) Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de R_p e R_s , sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 10,66 \cdot 7,25^2 + 0,0081 \cdot 263,15^2 = 1121,22 \text{ [W]}$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1121,22 = 3363,66 \text{ [W]}$$

8) Reatância do primário e secundário (X_p e X_s)

Reatância do primário:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = \sqrt{42,849^2 - 10,66^2} = 41,5 \text{ [\Omega]}$$

Reatância do secundário:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,0325^2 - 0,0081^2} = 0,0315 \text{ [\Omega]}$$

ou

$$X_s = \frac{X_p}{\alpha^2} = \frac{41,5}{36,31^2} = 0,0315 \text{ [\Omega]}$$

9) Indutância do primário e secundário (L_p e L_s)

Indutância do primário:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \times 1000 = \frac{41,5}{377} \times 1000 = 110,08 \text{ [mH]}$$

Indutância do secundário:

$$L_s = \frac{X_s}{377} \times 1000 = \frac{0,0315}{377} \times 1000 = 0,0835 \text{ [mH]}$$

10) Resistência de magnetização (R_{mag})

$$R_{mag} = \frac{V_{rp}^2}{P_0} = \frac{13800^2}{1076,4} = 176923,07 \text{ [\Omega]}$$

11) Fluxo de magnetização (λ_0)

$$\lambda_0 = \frac{V_{rp}}{4,44 \cdot f} = \frac{13800}{4,44 \cdot 60} = 51,8 \text{ [Wb - espira]}$$

Em resumo teremos as seguintes informações:



Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	13,8 [kV]
V_{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,38 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	4,5 [%]
$R\%$	Resistência percentual	1,12 [%]
$I_0\%$	Corrente a vazio	1,8 [%]

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	36,31
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,184 [A]
P_0	Potência a vazio	1076,4[W]
Z_p	Impedância do primário	42,849 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,0325 [Ω]
R_p	Resistência do primário	10,66 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,0081 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	3363,66[W]
X_p	Reatância do primário	41,5 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,0315 [Ω]
L_p	Indutância do primário	110,08 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,0835[mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	176923,07 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	51,8 [Wb-espira]

Os dados em destaque são os parâmetros de entrada para o componente SATTRAFO no ATPDraw.

5.5 - Exemplo de Aplicação

Para exemplificar a utilização de transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP, foram adotados os valores do transformador Delta-Estrela do item 5.4.1:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: $S_n=300$ kVA;



- Tensões nominais de linha: 13,8/0,38 kV;
- Impedância Z%: $Z_{CC} = 4,5\%$;
- Resistência R%: $R_{CC} = 1,12\%$;
- Corrente a vazio: $I_o = 1,8\%$;
- Ligação Delta Estrela - aterrado.

Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	13,8 [kV]
V_{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,22 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	4,5 [%]
$R\%$	Resistência percentual	1,12 [%]
$I_0\%$	Corrente a vazio	1,8 [%]

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	62,73
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,184 [A]
P_0	Potência a vazio	1076,4 [W]
Z_p	Impedância do primário	42,849 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,01089 [Ω]
R_p	Resistência do primário	10,66 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,00271 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	3360,66 [W]
X_p	Reatância do primário	41,5 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,01055 [Ω]
L_p	Indutância do primário	110,08 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,028 [mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	176923,07 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	51,8 [Wb-espira]

A fim de simular estes valores no ATPDraw, foram realizadas duas simulações:

- Ensaio a vazio do transformador;
- Ensaio de curto-circuito do transformador.

Essas duas simulações foram realizadas, já que estão relacionadas aos dois ensaios mais realizados em transformadores para obtenção de parâmetros típicos.

A Figura 5.5 apresenta o modelo utilizado para realização de ambas as simulações.

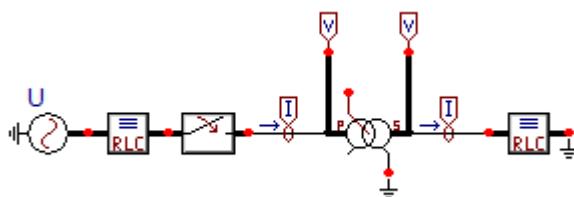


Figura 5.5 – Modelagem de transformadores trifásicos de dois enrolamentos ligados em DY para simulação a vazio e de curto-circuito.

O controle para realizar a simulação a vazio ou de curto-circuito foi através da resistência inserida após o transformador. Dessa forma, foi utilizado um valor de $1E12$ [Ω] para simular um sistema aberto e um valor de $1E-12$ [Ω] para simular um sistema em curto-circuito.

O emprego dessa resistência também foi utilizado, já que não é conveniente em simulações no ATP deixar algum ramo sem ligação, ou com ligações entre ramos de forma direta, podendo em alguns casos gerar erros.

Uma consideração importante deve ser ressaltada. Nota-se que após a fonte foi inserida uma resistência, cujo valor implementado foi igual a 630 [Ω]. Esta resistência foi inserida a fim de amortecer o valor na simulação do transformador com o secundário em curto-circuito. Em uma simulação real, o usuário deve inserir os dados corretos da impedância que está entre o transformador e a fonte.

Além dos parâmetros utilizados no componente SATTRAFO, foi utilizada a fonte AC3PH tipo 14, com os dados conforme apresenta a Figura 5.6.

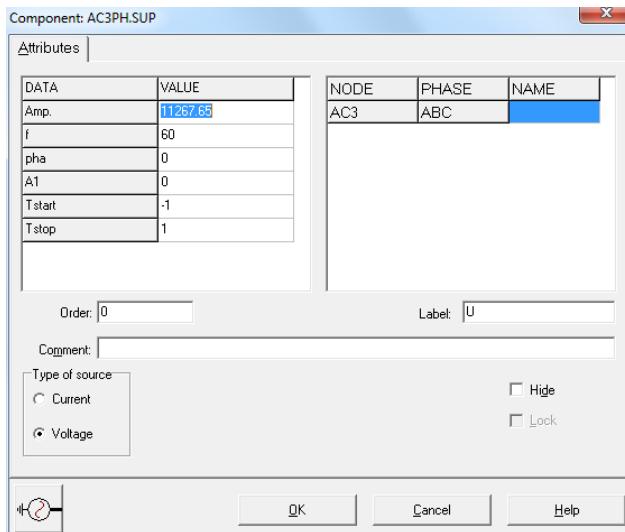


Figura 5.6 – Dados da fonte AC3PH tipo 14 utilizada para simulação do transformador.

Observe que o valor da amplitude foi de 11267.65 [V], já que no ATP deve ser inserido o valor de pico da tensão para este componente. Além disso, a tensão da fonte é fase-neutro. Portanto, o usuário deve inserir o valor de tensão de forma a obter a tensão de linha nominal desejada. Como neste caso, o valor nominal do primário do transformador é de 13800 [V], a tensão de fase é de aproximadamente 7967 [V] RMS, ou seja, aproximadamente 11267 [V] de pico.

Além disso, observe que foi inserida uma chave após a fonte para caso deseja-se simular a corrente inrush. Como neste caso não é o objetivo, então o tempo de fechamento (T-cl) e o tempo de inicialização da fonte (TSta) foi igual a -1 [s] de forma a eliminar qualquer transitório.

O tempo total para todas as simulações foi de 100 [ms], conforme pode ser visualizado na Figura 5.7, a qual apresenta as configurações das simulações realizadas. Assim, o tempo de abertura da chave (T-op) e o tempo de finalização de simulação da fonte (TSto) foi de 1 [s] para garantir que toda a simulação seja desenvolvida.

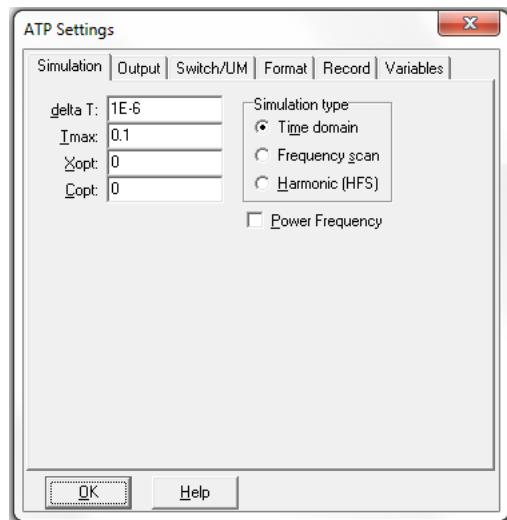


Figura 5.7 – Dados de configuração para simulação.

5.6 - Ensaio a Vazio do transformador:

O ensaio a vazio do transformador tem por objetivo determinar as suas perdas no núcleo magnético. Geralmente, este ensaio é realizado aplicando-se tensão nominal no lado de baixa tensão. A corrente que circulará pelo transformador será a corrente de magnetização, rica em harmônicos, responsável pelo estabelecimento dos campos magnéticos que circularão pelo transformador. No ATP, é possível realizar este ensaio do lado de alta tensão, coisa que na prática não é, devido ao alto valor da tensão primária.

Foi aplicada uma tensão de fase eficaz de 13800 [V] (19516,15 [V] de pico) no primário do transformador, resultando em uma tensão eficaz sobre a bobina de 220 [V] (311,13 [V] de pico). Os gráficos para estas tensões durante o ensaio a vazio estão representados abaixo, Figuras 5.8 e 5.9.

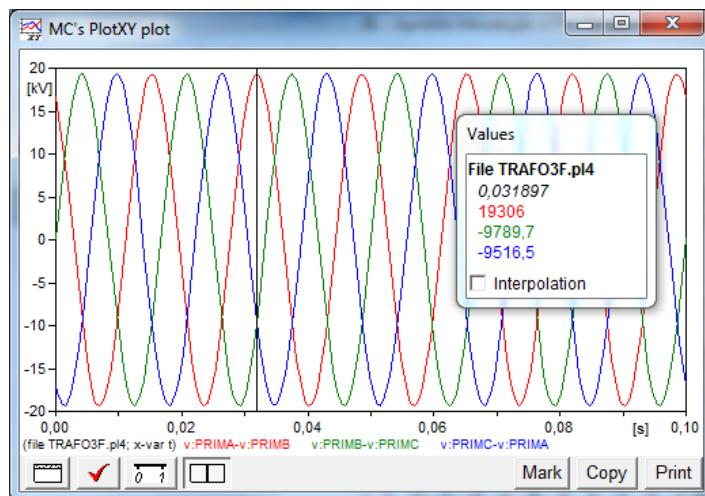


Figura 5.8 – Tensão no enrolamento primário – Ensaio a vazio.

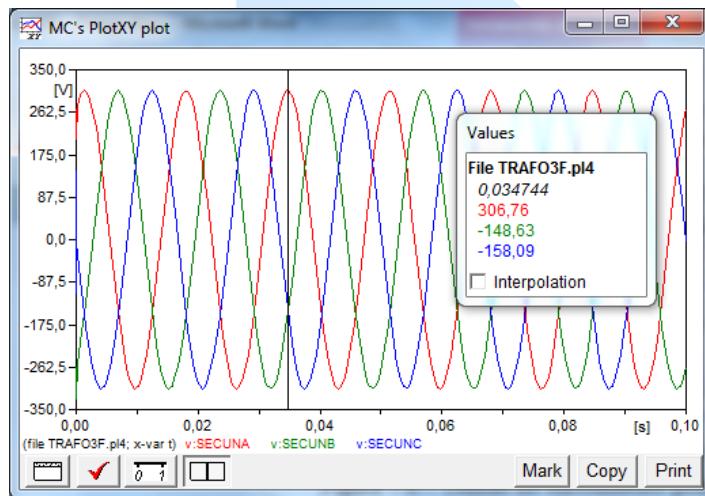


Figura 5.9 – Tensão no enrolamento secundário – Ensaio a vazio.

Com a aplicação da tensão no primário do transformador, verifica-se a circulação de uma corrente pelo mesmo, corrente esta de magnetização, responsável pela energização do mesmo. A corrente tem a forma de onda representada na Figura 5.10. O valor de pico para a corrente de linha foi de 0,329 [A], ou seja, uma corrente na fase igual a aproximadamente 0,190 [A], valor próximo ao calculado, o qual é de 0,184 [A].

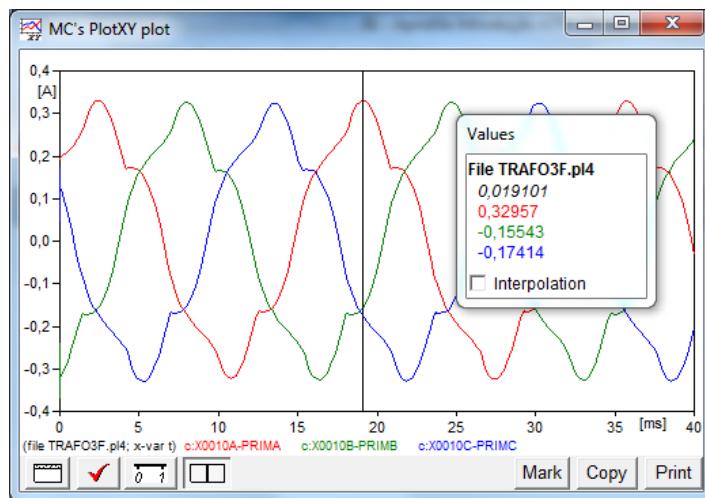


Figura 5.10 – Corrente de magnetização – Ensaio a vazio.

Com a análise de Fourier destas ondas de corrente pode-se verificar o conteúdo harmônico da corrente de magnetização, conforme é apresentado na Figura 5.11. Pode ser notada uma alta presença de 5^a harmônica (11,61% da fundamental). Como o efeito de histerese não é considerado no modelo deste transformador, a presença de 3^a harmônica não é evidente, como esperado.

Observe ainda que o período para análise Fourier foi de um ciclo e não do tempo total de simulação, o qual foi de 100 [ms]. Isto é realizado para obter resultados mais adequados.

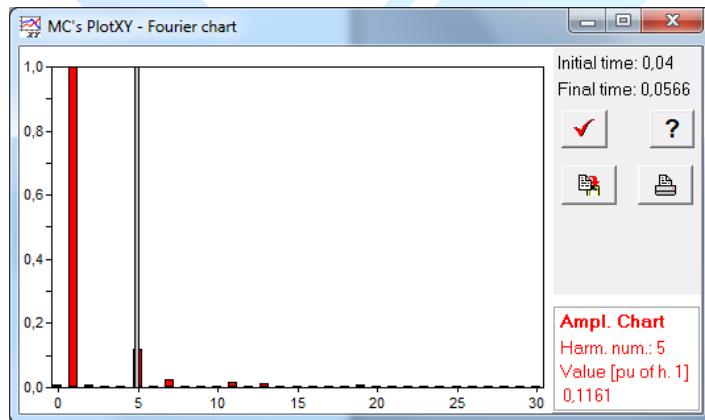


Figura 5.11 – Corrente de magnetização – Ensaio a vazio.

5.7 - Ensaio em curto-circuito do transformador

O ensaio em curto-circuito é feito aplicando-se tensão no lado de alta tensão do transformador com o secundário em curto-circuito até que a corrente nominal primária do transformador seja atingida.

A tensão aplicada no primário com o secundário em curto-circuito foi de 874,02 [V] de pico, ou seja, 618,03 [V] RMS, Figura 5.12, correspondendo a uma corrente de linha de pico no primário de 17,673 [A], ou seja, 12,49 [A] RMS (Primário em Delta: 7,20 [A] RMS de fase), Figura 5.13. Sabe-se que a corrente nominal de linha no primário do transformador calculada foi de 12,56 [A].

A corrente de curto-circuito encontrada no enrolamento secundário do transformador está apresentada na Figura 5.14. Nota-se que o valor da corrente de linha de pico, a qual é igual a corrente de fase (ligação no secundário está em estrela) é igual a 641,63 [A], ou seja, 453,7 [A] RMS. Sabe-se que a corrente nominal de linha no secundário do transformador calculada foi de 454,54 [A], ou seja, bem próximo do valor simulado.

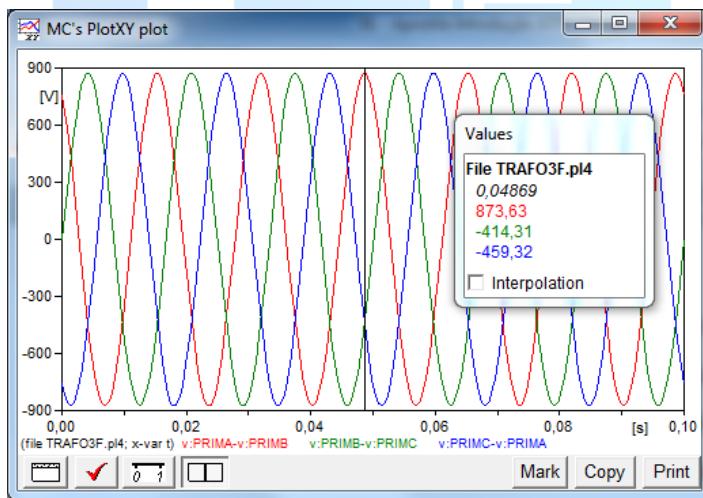


Figura 5.12 – Tensão aplicada no primário – Ensaio de curto-circuito.

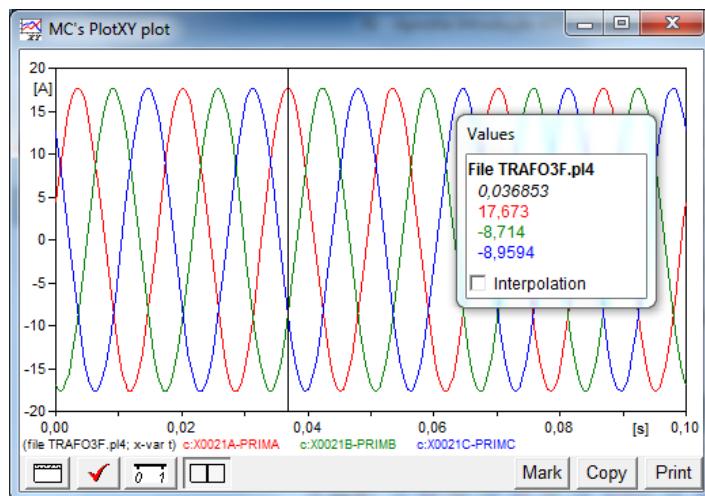


Figura 5.13 – Corrente de linha no primário – Ensaio de curto-circuito.

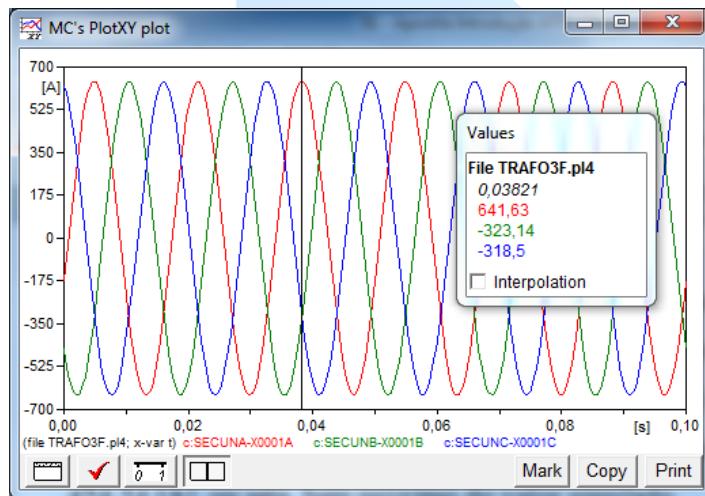


Figura 5.14 – Corrente de linha no secundário – Ensaio de curto-circuito.

Cálculo da impedância percentual e perdas em curto-círcito:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_n} \times 100\% = \frac{618,03}{13800} \times 100\% = 4,48\%$$

Observe que o valor da impedância percentual de curto-círcito encontrado pela simulação, 4,48%, foi bem próximo ao valor fornecido, o qual é igual a 4,5%.

A perda em curto-círcito pode ser obtida a partir dos valores de correntes das três fases tomando-se o primário e secundário. Sabe-se que:



Corrente de fase RMS do Primário (Simulação) : $I_A \approx I_B \approx I_C = 7,20$ [A]

Resistência do Primário (Calculado) : $R_p = 10,66$ [Ω]

E:

Corrente de fase RMS do Secundário (Simulação) : $I_A \approx I_B \approx I_C = 453,7$ [A]

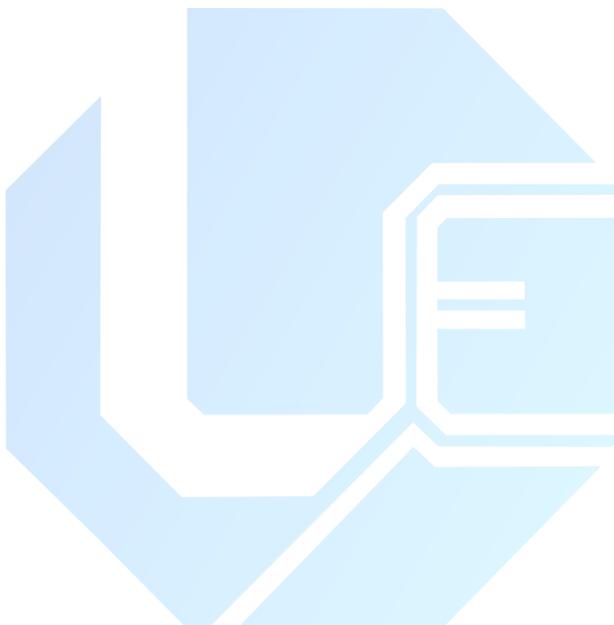
Resistência do Secundário (Calculado) : $R_s = 0,00271$ [Ω]

Portanto:

$$P_{cc} = R_p \cdot I_{np(Fase-RMS)}^2 + R_s \cdot I_{ns(Fase-RMS)}^2 = 10,66 \cdot 7,20^2 + 0,00271 \cdot 453,7^2 = 1110,45 \text{ [W]}$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1110,45 = 3331,35 \text{ [W]}$$

O valor total da perda, 3331,35 [W] foi bem próximo ao calculado, o qual é igual a 3360,66 [W].





6 - TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE 3 ENROLAMENTOS

6.1 - Introdução

Os transformadores trifásicos de três enrolamentos, geralmente, são empregados em sistemas elétricos de potência. Estes equipamentos tem grande aplicação em:

- Subestações de sistemas de transmissão;
- Subestações de usinas geradoras para obtenção de tensões de serviço;
- Transformadores ligados em Y-Y para circulação de 3^a harmônica no terciário em Δ.

A característica básica deste transformador obedece ao mesmo critério do transformador convencional, ou seja, a potência fornecida ao primário é igual à soma das potências supridas às cargas pelos enrolamentos secundário e terciário mais as perdas internas, sendo estas, em muitos casos, consideradas desprezíveis.

Como sua utilização no planejamento e operação de linhas de transmissão de alta tensão é de fundamental importância, busca-se a modelagem desde equipamento através do simulador ATPDraw. Para tal, é necessário detalhar de forma adequada todos os cálculos requeridos para a determinação dos parâmetros a serem fornecidos ao programa.

A figura 6.1 a seguir representa o circuito magnético de um transformador composto por três enrolamentos. Já a figura 6.2 ilustra o circuito elétrico equivalente de um transformador de três enrolamentos no sistema por unidade (p.u.).

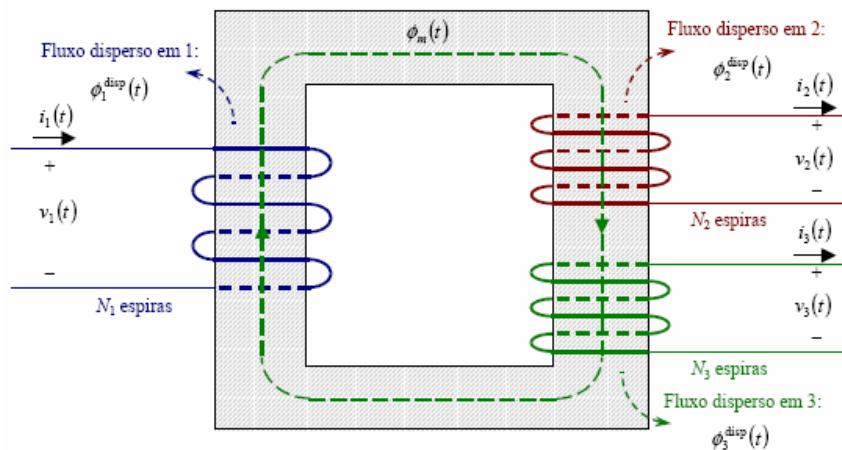


Figura 6.1 - Circuito magnético equivalente para um transformador de três enrolamentos

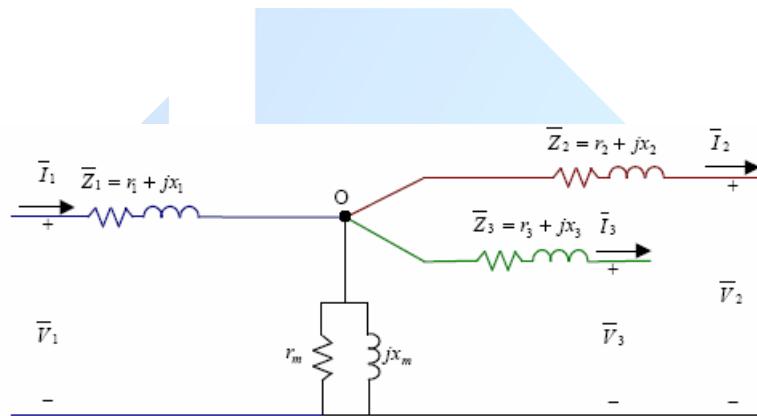


Figura 6.2 - Circuito elétrico equivalente de um transformador de três enrolamentos em p.u.

6.2 - Características dos Transformadores de Três Enrolamentos no ATP

A figura 6.3 a seguir retrata a localização do transformador de três enrolamentos no ATPDraw. Já a figura 6.4 ilustra o bloco elétrico representativo deste equipamento no *software*. Os terminais do ícone, numerados conforme sentido horário, são descritos da seguinte maneira:

- **Terminal 1:** entrada de tensão do enrolamento primário;
- **Terminal 2:** pólo positivo para medição no enrolamento primário
- **Terminal 3:** entrada de tensão do enrolamento terciário;

- **Terminal 4:** ponto comum do terciário para ligação Y;
- **Terminal 5:** entrada de tensão do enrolamento secundário;
- **Terminal 6:** ponto comum do secundário para ligação Y;
- **Terminal 7:** ponto comum do primário para ligação Y;

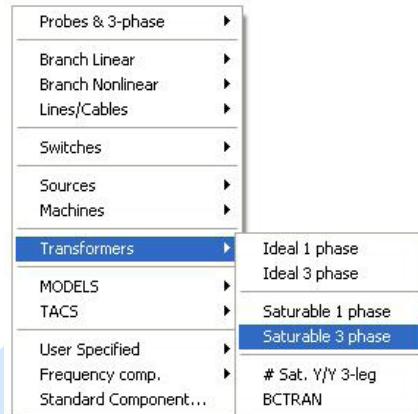


Figura 6.3 - Localização do transformador de 3 enrolamentos no ATPDraw

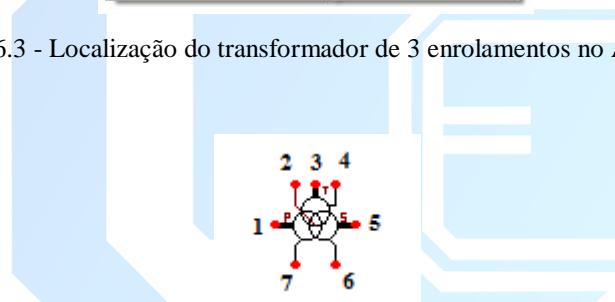


Figura 6.4 - Ícone do transformador de três enrolamentos

Mediante um duplo clique com o botão esquerdo do *mouse* no ícone representativo do transformador no ATPDraw, é apresentada a tela do componente (*SATTRAF0.sup*) contendo os parâmetros do elemento a serem fornecidos pelo usuário para a adequada simulação computacional, conforme mostra a figura 6.5, para a aba *Attributes*, e figura 6.6, para a aba *Characteristic*. Destaca-se que a grande maioria destas informações requeridas deve ser coletada em manuais e catálogos do equipamento ou através de contato direto com seu fabricante.

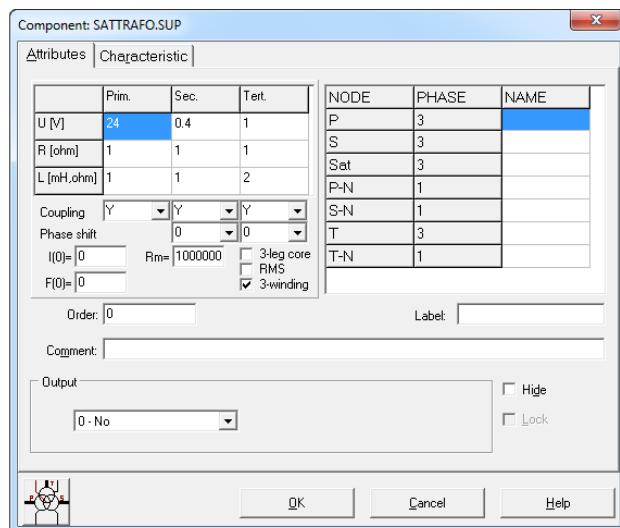


Figura 6.5 - Parâmetros da aba *Attributes* do transformador de três enrolamentos no ATPDraw

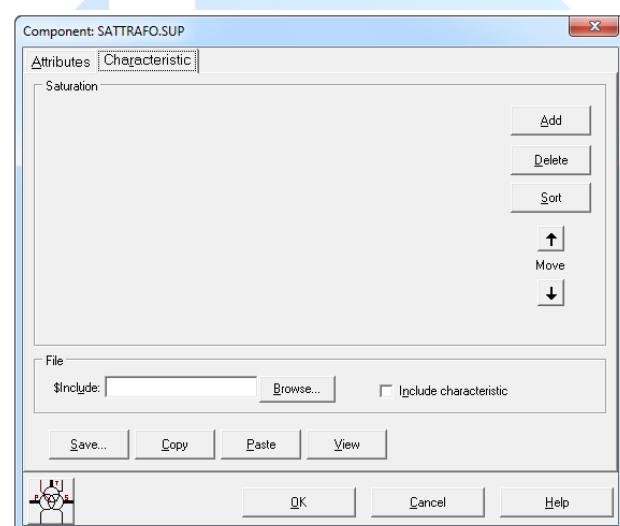


Figura 6.6 - Parâmetros da aba *Characteristic* do transformador de três enrolamentos no ATPDraw

Para a aba *Attributes*, os principais parâmetros do transformador requisitados para a simulação computacional são:

- **U [V]:** tensão fase-neutro dos enrolamentos do transformador;
- **R [ohm]:** resistência dos enrolamentos do transformador;
- **L [mH, ohm]:** indutância dos enrolamentos do transformador;
- **Coupling:** tipo de ligação dos enrolamentos do transformador;



- **Phase Shift:** defasamento angular do transformador;
- **I(0):** corrente do ramo de magnetização do transformador em regime permanente;
- **F(0):** fluxo no ramo de magnetização do transformador em regime permanente;
- **Rm:** resistência do ramo de magnetização do transformador;
- **R(0):** relutância de seqüência zero do transformador de 3 colunas.

Com relação à aba *Characteristic*, esta se resume basicamente à inserção de características da curva de saturação do transformador à simulação computacional. Dessa forma, pode-se obter resultados mais confiáveis e próximos ao real comportamento do equipamento.

6.3 - Cálculo dos Parâmetros em Ohms

6.3.1 - Cálculo da Reatância Indutiva em Ohms

A determinação da reatância indutiva do transformador de três enrolamentos pode ser obtida pela relação abaixo, quando se dispor da reatância individual do primário, secundário ou terciário apresentada em porcentagem ou p.u. (valor por unidade). No estudo de sistemas elétricos utilizando-se valores por unidade, normalmente se escolhe um valor de potência e tensão base para os quais as grandezas elétricas de todos os equipamentos da rede devem estar referenciadas. Caso essa reatância seja dada em porcentagem, determinamos seu valor em p.u. dividindo-a por 100.

$$X_{pu} = \frac{X_{real}}{X_{base}}$$

Onde:

$$X_{base} = \frac{V_n^2}{S}$$

$$S_{3\phi} = 3S_{1\phi}$$



$$S_{3\phi} = 3V_{fn} \times I_n$$

Onde:

$$I_n = \frac{V_{fn}}{X}$$

Logo:

$$S_{3\phi} = 3V_{fn} \times \frac{V_{fn}}{X}$$

$$S_{3\phi} = 3 \left(\frac{V_{ff}}{\sqrt{3}} \right)^2 \times \frac{1}{X}$$

$$S_{3\phi} = \frac{V_{ff}^2}{X}$$

$$X_{real} = \frac{V_{ff}^2}{S_{3\phi}} \times X_{pu}$$

Entretanto, se os valores fornecidos para a reatância indutiva em porcentagem ou em p.u. não forem as reatâncias individuais do primário, do secundário e do terciário do transformador, é necessário determiná-las individualmente em p.u. e, a partir daí, aplicá-las na equação acima.

$$X_{pu\ primário} = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{pt} - X_{st})$$

$$X_{pu\ secundário} = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{st} - X_{pt})$$

$$X_{pu\ terciário} = \frac{1}{2}(X_{pt} + X_{st} - X_{ps})$$

Calculando o valor da reatância do primário, secundário e terciário em ohms, através da potência aparente do transformador e suas tensões fase-fase, tem-se:



$$X_P = \frac{V_{nP}^2}{S} \times X_{pu} \text{ primário}$$

$$X_S = \frac{V_{nS}^2}{S} \times X_{pu} \text{ secundário}$$

$$X_T = \frac{V_{nT}^2}{S} \times X_{pu} \text{ terciário}$$

6.3.2 - Cálculo da Indutância Primária, Secundária e Terciária

As indutâncias (L_P , L_S e L_T), são calculadas com base nos valores das reatâncias (X_P , X_S e X_T) e da frequência angular (ω). Como ω é diretamente proporcional à frequência do sistema elétrico e, no Brasil, essa valor é de 60 Hz, tem-se que:

$$X_L = \omega L$$

Onde:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Logo:

$$L_P = \frac{X_P}{377} \times 1000 \text{ [mH]}$$

$$L_S = \frac{X_S}{377} \times 1000 \text{ [mH]}$$

$$L_T = \frac{X_T}{377} \times 1000 \text{ [mH]}$$

Entretanto, é de grande importância lembrar que em um sistema onde se tem a presença de harmônicos, o cálculo da indutância deverá ser feito para cada uma das frequências presentes.



6.3.3 - Cálculo das Correntes a Partir da Potência Trifásica

Pode-se também determinar as correntes nominais que passam pelo primário, secundário e terciário a partir da potência aparente trifásica de cada um deles e seus respectivos valores de tensão, conforme é apresentado a seguir:

$$I_{nP} = \frac{S_{3\Phi P}}{\sqrt{3} \times V_{nP}}$$

$$I_{nS} = \frac{S_{3\Phi S}}{\sqrt{3} \times V_{nS}}$$

$$I_{nT} = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{nT}}$$

Em geral, em um transformador de centenas de kVA, as perdas ôhmicas podem ser desprezadas e considera-se assim apenas as reatâncias nos enrolamentos (perdas indutivas). No entanto, quando não for possível desprezar essa perda, faz-se necessário determiná-las através das perdas provenientes das correntes que circulam pelos enrolamentos quando da realização do ensaio de curto-circuito. O tipo de ligação do transformador é de grande importância para a determinação desse parâmetro. A tabela a seguir retrata os tipos de ligações existentes em transformadores trifásicos:

Tabela 6.1 - Tipos de ligações para o transformador de três enrolamentos

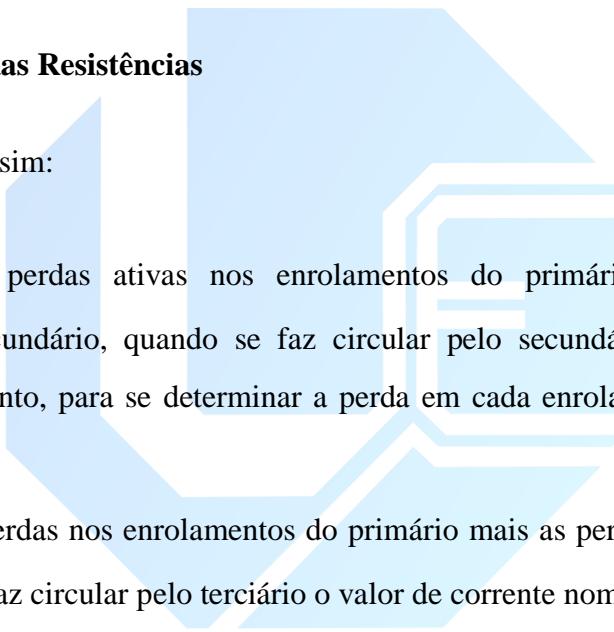
Primário	Secundário	Terciário	Primário	Secundário	Terciário
Y aterrado	Y aterrado	Y aterrado	Y	Y	Y
Y aterrado	Y aterrado	Delta	Y	Y	Delta
Y aterrado	Delta	Y aterrado	Y	Delta	Y
Y aterrado	Delta	Delta	Y	Delta	Delta
Delta	Y aterrado	Y aterrado	Delta	Y	Y
Delta	Y aterrado	Delta	Delta	Y	Delta

Delta	Delta	Y aterrado	Delta	Delta	Y
Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta

Os transformadores trifásicos de três enrolamentos podem assumir os mais variados tipos de ligação, como foi visto na tabela anterior. Assim, foi selecionado um trafo conectado em Y-Y-Δ para melhor ilustrar o cálculo dos parâmetros que deverão ser inseridos no programa ATPDraw.

6.3.4 - Cálculo das Resistências

Tem-se que $P = RI^2$, assim:



- P_{PS} : representa as perdas ativas nos enrolamentos do primário mais as perdas nos enrolamentos do secundário, quando se faz circular pelo secundário o valor de corrente nominal I_n . No entanto, para se determinar a perda em cada enrolamento deve-se utilizar a relação $P_{PS}/3$.
- P_{PT} : representa as perdas nos enrolamentos do primário mais as perdas nos enrolamentos do terciário, quando se faz circular pelo terciário o valor de corrente nominal I_n . No entanto, para se determinar a perda em cada enrolamento deve-se utilizar a relação $P_{PT}/3$.
- P_{ST} : representa as perdas nos enrolamentos do secundário mais as perdas nos enrolamentos do terciário, quando se faz circular pelo terciário o valor de corrente nominal I_n . No entanto, para se determinar a perda em cada enrolamento deve-se utilizar a relação $P_{ST}/3$.

A corrente I_p é a corrente que passa pelos enrolamentos do primário com o secundário em aberto, e com um curto-círcuito entre os terminais do terciário conectado em delta, faz-se

circular I_{nT} . Portanto, esta I_{nT} está em função da potência nominal do terciário. Como normalmente esta é menor que a potência do primário, I_P' é apenas uma parcela da corrente I_{nP} .

$$I_P' = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{nP}}$$

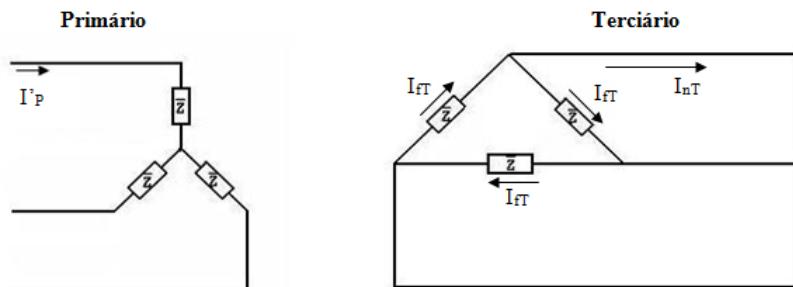


Figura 6.6 – Corrente nos enrolamentos primário e terciário do transformador

A corrente I_s' é a corrente que passa pelos enrolamentos do secundário, quando se deixa o primário em aberto e o terciário em curto-círcuito que está conectado em delta, fazendo-se circular I_{nT} . Portanto, esta corrente nominal (I_{nT}), está em função da potência nominal do terciário. Como normalmente esta é menor que a potência do primário, dessa forma, I_s' é apenas uma parcela da corrente I_{nS} :

$$I_S' = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{ns}}$$

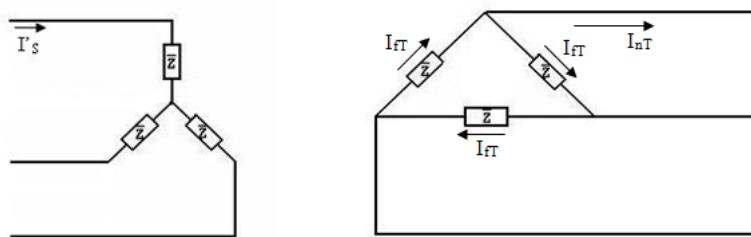


Figura 6.7 – Corrente nos enrolamentos secundário e terciário do transformador

A corrente I_{fT} é a corrente de fase que passa pelos enrolamentos do terciário que está conectado em delta.

$$I_{fT} = \frac{I_{nT}}{\sqrt{3}}$$

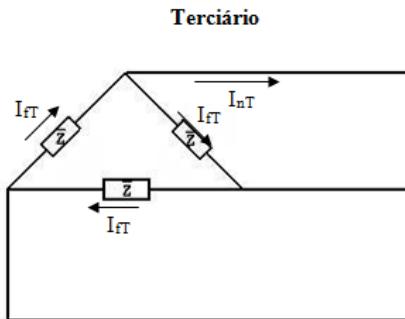


Figura 6.8 – Corrente nos enrolamentos do terciário do transformador

A corrente I_{nP} é a corrente que passa pelos enrolamentos do primário, quando deixamos o terciário em aberto e curto-circuitamos o secundário.

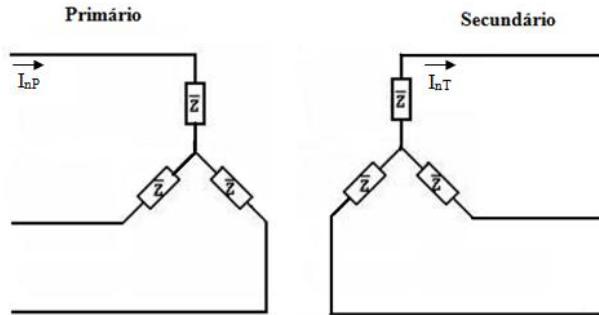


Figura 6.9 – Corrente nos enrolamentos primário e secundário do transformador

Para um transformador conectado em (Y-Y-Δ), o cálculo das resistências pode ser obtido através do determinante de uma matriz, como foi desenvolvido a seguir:



$$\begin{cases} R_p(I_{nP})^2 + R_s(I_{nS})^2 = \frac{P_{PS}}{3} \\ R_p(I_P)^2 + R_T(I_{fT})^2 = \frac{P_{PT}}{3} \\ R_s(I_S)^2 + R_T(I_{fT})^2 = \frac{P_{ST}}{3} \end{cases}$$

Colocando o sistema sob a forma de matriz, temos:

$$\begin{pmatrix} I_{nP}^2 & I_{nS}^2 & 0 \\ I_P^2 & 0 & I_{fT}^2 \\ 0 & I_S^2 & I_{fT}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p \\ R_s \\ R_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{PS}/3 \\ P_{PT}/3 \\ P_{ST}/3 \end{pmatrix}$$

Cálculo do determinante principal:

$$Det = \begin{vmatrix} I_{nP}^2 & I_{nS}^2 & 0 \\ I_P^2 & 0 & I_{fT}^2 \\ 0 & I_S^2 & I_{fT}^2 \end{vmatrix}$$

$$Det = (I_{nP}^2 \times 0 \times I_{fT}^2) + (I_{nS}^2 \times I_{fT}^2 \times 0) + (0 \times I_P^2 \times I_S^2) - (0 \times 0 \times 0) - (I_{nP}^2 \times I_{fT}^2 \times I_S^2) - (I_{nS}^2 \times I_P^2 \times I_{fT}^2)$$

$$Det = -(I_{nP}^2 \times I_{fT}^2 \times I_S^2) - (I_{nS}^2 \times I_P^2 \times I_{fT}^2)$$

Cálculo da resistência do primário:

$$R_p = \begin{vmatrix} P_{PS}/3 & I_{nS}^2 & 0 \\ P_{PT}/3 & 0 & I_{fT}^2 \\ P_{ST}/3 & I_S^2 & I_{fT}^2 \end{vmatrix}$$

$$R_p = -(I_{nP}^2 \times I_{fT}^2 \times I_S^2) - (I_{nS}^2 \times I_P^2 \times I_{fT}^2)$$

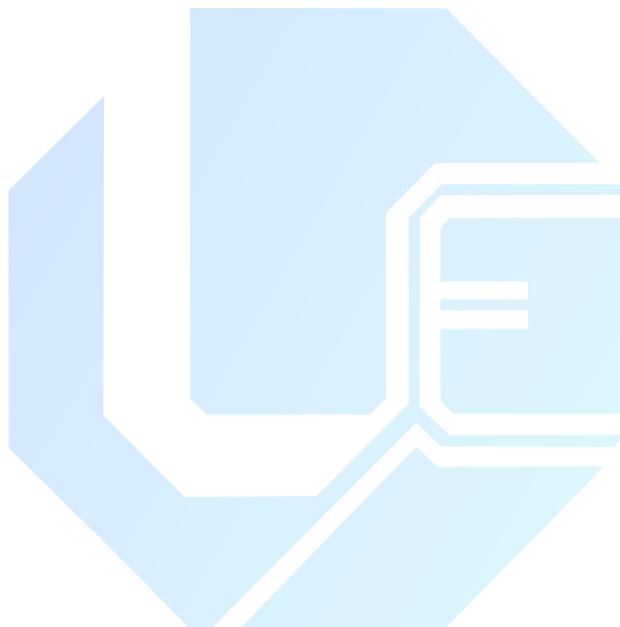
Cálculo da resistência do secundário:



$$R_S = \begin{vmatrix} I_{nP}^2 & P_{PS}/3 & 0 \\ I_P^2 & P_{PT}/3 & I_{fT}^2 \\ 0 & P_{ST}/3 & I_{fT}^2 \end{vmatrix}$$
$$R_S = -(I_{nP}^2 \times I_{fT}^2 \times I_S^2) - (I_{nS}^2 \times I_P^2 \times I_{fT}^2)$$

Cálculo da resistência do terciário:

$$R_T = \begin{vmatrix} I_{nP}^2 & I_{nS}^2 & P_{PS}/3 \\ I_P^2 & 0 & P_{PT}/3 \\ 0 & I_S^2 & P_{ST}/3 \end{vmatrix}$$
$$R_T = -(I_{nP}^2 \times I_{fT}^2 \times I_S^2) - (I_{nS}^2 \times I_P^2 \times I_{fT}^2)$$





6.3.5 - Tabela Resumida Com as Equações

Tabela 6.2 - Tabela resumida com as equações

Descrição		Fórmulas	Unidades
V_{nP}	Tensão nominal no primário		[V]
V_{nS}	Tensão nominal no secundário		[V]
V_{nT}	Tensão nominal no terciário		[V]
I_{nP}	Corrente nominal do primário	$I_{nP} = \frac{S_{3\Phi P}}{\sqrt{3} \times V_{nP}}$	[A]
I_{nS}	Corrente nominal do secundário	$I_{nS} = \frac{S_{3\Phi S}}{\sqrt{3} \times V_{nS}}$	[A]
I_{nT}	Corrente nominal do terciário	$I_{nT} = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{nT}}$	[A]
I'_P	Corrente do primário, com o secundário em aberto e o terciário em curto	$I'_P = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{nP}}$	[A]
I'_S	Corrente do secundário, com o primário em aberto e o terciário em curto	$I'_S = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{nS}}$	[A]
I_{fT}	Corrente de fase do terciário	$I_{fT} = \frac{I_{nT}}{\sqrt{3}}$	[A]
X_P	Reatância do primário	$X_P = \frac{V_{nP}^2}{S} \times X_{pu} \text{ primário}$	[Ω]
X_S	Reatância do secundário	$X_S = \frac{V_{nS}^2}{S} \times X_{pu} \text{ secundário}$	[Ω]
X_T	Reatância do terciário	$X_T = \frac{V_{nT}^2}{S} \times X_{pu} \text{ terciário}$	[Ω]
X_{PS}	Reatância do primário e secundário	Usado no cálculo da reatância por unidade	—
X_{PT}	Reatância do primário e terciário	Usado no cálculo da reatância por unidade	—
X_{ST}	Reatância do secundário e terciário	Usado no cálculo da reatância por unidade	—
$X_{pu} \text{ primário}$	Reatância por unidade do primário	$X_{pu} \text{ primário} = \frac{1}{2}(X_{PS} + X_{PT} - X_{ST})$	—



Tabela 6.3 - Tabela resumida com as equações

Descrição		Descrição		Descrição
X_{pu} secundário	Reatância por unidade do secundário	X_{pu} secundário	$= \frac{1}{2}(X_{PS} + X_{ST} - X_{PT})$	—
X_{pu} terciário	Reatância por unidade do terciário	X_{pu} terciário	$= \frac{1}{2}(X_{PT} + X_{ST} - X_{PS})$	—
L_P	Indutância do primário	L_P	$= \frac{X_P}{377} \times 1000$	[mH]
L_S	Indutância do secundário	L_S	$= \frac{X_S}{377} \times 1000$	[mH]
L_T	Indutância do terciário	L_T	$= \frac{X_T}{377} \times 1000$	[mH]
ω	Frequência angular	$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377$		[rad] [s]
R_P	Resistência do primário	R_P	$\begin{vmatrix} P_{PS}/3 & I_{nS}^2 & 0 \\ P_{PT}/3 & 0 & I_{fT}^2 \\ P_{ST}/3 & I_S^2 & I_{fT}^2 \end{vmatrix}$	[Ω]
R_S	Resistência do secundário	R_S	$\begin{vmatrix} I_{nP}^2 & P_{PS}/3 & 0 \\ I_{nT}^2 & P_{PT}/3 & I_{fT}^2 \\ 0 & P_{ST}/3 & I_{fT}^2 \end{vmatrix}$	[Ω]
R_T	Resistência do terciário	R_T	$\begin{vmatrix} I_{nP}^2 & I_{nS}^2 & P_{PS}/3 \\ I_{nT}^2 & 0 & P_{PT}/3 \\ 0 & I_S^2 & P_{ST}/3 \end{vmatrix}$	[Ω]

6.4 – Exemplo numérico:

Determinar os parâmetros de um transformador de três enrolamentos (Y-Y-Δ), da subestação de Sorriso, para a modelagem no ATP, com as seguintes características fornecidas pelo fabricante.



Tabela 6.4 – Tabela com os dados do transformador (tensão, potência e ligação)

Características	Primário	Secundário	Terciário
Tensão [kV]	230	69	13,8
Potência 3Φ [MVA]	30	30	10
Ligação	Y	Y	Δ

Tabela 6.5 – Tabela com os dados do transformador

Características	Primário/ Secundário	Primário/ Terciário	Secundário/ Terciário
Perdas a plena carga - Curto-circuito [W]	140,153	31,865	26,660

Tabela 3.6 – Tabela com os dados do transformador (reatância)

Reatância	[%]	Relação [kV/kV]	Base [MVA]
X_{PS}	11,28	230/69	30
X_{PT}	45,93	230/13,8	30
X_{ST}	33,51	69/13,8	30
X_P	11,85	230/69	30
X_S	-0,57	230/13,8	30
X_T	34,08	69/13,8	30

- Cálculo da reatância indutiva em ohms, usando os valores individuais da reatância de cada transformador:

$$X_p = \frac{V_{nP}^2}{S} \times X_{PU} \text{ primário}$$

$$X_p = \frac{(230 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} \times \frac{11,85}{100} = 208,955\Omega$$

$$X_s = \frac{(69 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} \times -\frac{0,57}{100} = -0,90459\Omega$$

$$X_t = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} \times \frac{34,08}{100} = 2,1634\Omega$$

O sinal negativo da reatância, não apresenta nenhum significado físico, podendo assim ser considerado apenas em módulo.



Pode-se ainda calcular a reatância indutiva em Ohms, usando as reatâncias (X_{PS} , X_{PT} e X_{ST}), onde:

$$X_{PU \text{ primário}} = \frac{1}{2} (X_{PS} + X_{PT} - X_{ST})$$

$$X_{PU \text{ primário}} = \frac{1}{2} \left(\frac{11,28}{100} + \frac{45,93}{100} - \frac{33,51}{100} \right) = 0,1185$$

Somente então:

$$X_p = \frac{V_{n_P}^2}{S} \times X_{PU \text{ primário}}$$

$$X_p = \frac{(230 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} \times 0,1185 = 208,955 \Omega$$

$$X_{PU \text{ secundário}} = \frac{1}{2} (X_{PS} + X_{ST} - X_{PT})$$

$$X_{PU \text{ secundário}} = \frac{1}{2} \left(\frac{11,28}{100} + \frac{33,51}{100} - \frac{45,93}{100} \right) = -5,7 \times 10^{-3}$$

$$X_s = \frac{V_{n_S}^2}{S} \times X_{PU \text{ secundário}}$$

$$X_s = \frac{(69 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} \times -5,7 \times 10^{-3} = -0,9045 \Omega$$

$$X_{PU \text{ terciário}} = \frac{1}{2} (X_{PT} + X_{ST} - X_{PS})$$

$$X_{PU \text{ terciário}} = \frac{1}{2} \left(\frac{45,93}{100} + \frac{33,51}{100} - \frac{11,28}{100} \right) = 0,3408$$

$$X_t = \frac{V_{n_T}^2}{S} \times X_{PU \text{ terciário}}$$

$$X_t = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} \times 0,3408 = 2,1633 \Omega$$

2) O cálculo das indutâncias é feito com base nas reatâncias ôhmicas:



Como:

$$X_P = \omega L_P \quad L_P = \frac{X_P}{377} \times 1000 [mH] \text{ e} \quad \omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377$$

Logo:

$$L_P = \frac{208,955}{377} \times 1000 = 554,527 mH$$

$$L_S = \frac{0,90459}{377} \times 1000 = 2,3994 mH$$

$$L_T = \frac{2,1633}{377} \times 1000 = 5,338 mH$$

3) Cálculo da corrente nominal:

$$I_{nP} = \frac{S_{3\Phi P}}{\sqrt{3} \times V_{nP}}$$

$$I_{nP} = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 230 \times 10^3} = 75,30655685 A$$

$$I_{nS} = \frac{S_{3\Phi S}}{\sqrt{3} \times V_{nS}}$$

$$I_{nS} = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3} = 251,0218562 A$$

$$I_{nT} = \frac{S_{3\Phi T}}{\sqrt{3} \times V_{nT}}$$

$$I_{nT} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3} = 418,3697603 A$$

4) Determinação das resistências:



$$\begin{cases} R_p(I_{nP})^2 + R_s(I_{nS})^2 = \frac{P_{PS}}{3} \\ R_p(I'_p)^2 + R_T(I_{fT})^2 = \frac{P_{PT}}{3} \\ R_s(I'_s)^2 + R_T(I_{fT})^2 = \frac{P_{ST}}{3} \end{cases}$$

A corrente I'_s é a corrente que passa pelos enrolamentos do secundário, quando se deixa o primário em aberto e realiza-se um curto-círcuito entre os terminais do terciário que está conectado em delta e possui uma potência de 10 MVA. Dessa forma, I'_s é apenas uma parcela da corrente I_{nS} .

$$I'_s = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3} = 83,67395206A$$

A corrente I'_p é a corrente que passa pelos enrolamentos do primário, quando deixamos o secundário em aberto e curto-circuitamos o terciário que está conectado em delta e possui uma potência de 10 MVA, dessa forma, I'_p é apenas uma parcela da corrente I_{nP} .

$$I'_p = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 230 \times 10^3} = 25,10218562A$$

A corrente I_{fT} é a corrente de fase que passa pelos enrolamentos do terciário que está conectado em delta.

$$I_{fT} = \frac{I_{nT}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{fT} = \frac{418,4}{\sqrt{3}} = 241,5458937A$$

Substituindo os respectivos valores de corrente e potência no sistema e organizando-o na forma de matriz, temos:

$$\begin{cases} R_p(75,30655685)^2 + R_s(251,0218562)^2 = 140153/3 \\ R_p(25,10218562)^2 + R_T(241,5458937)^2 = 31865/3 \\ R_s(83,67395206)^2 + R_T(241,5458937)^2 = 26660/3 \end{cases}$$



$$\begin{cases} 5671,077505R_p + 63011,97229R_s = 46717,66667 \\ 630,1197229R_p + 58344,41876R_t = 10621,66667 \\ 7001,330253R_s + 58344,41876R_t = 8886,66667 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 5671,077505R_p + 63011,97229R_s + 0R_t = 46717,66667 \\ 630,1197229R_p + 0R_s + 58344,418R_t = 10621,66667 \\ 0R_p + 7001,330253R_s + 58344,418R_t = 8886,66667 \end{cases}$$

O método escolhido para resolução da matriz foi a regra de Crammer, entretanto, fica a escolha, qualquer outro método mais conveniente.

$$\begin{pmatrix} I_{nP}^2 & I_{nS}^2 & 0 \\ I_{P}^2 & 0 & I_{fT}^2 \\ 0 & I_{S}^2 & I_{fT}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p \\ R_s \\ R_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{PS}/3 \\ P_{PT}/3 \\ P_{ST}/3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 5671,077505 & 63011,97229 & 0 \\ 630,1197229 & 0 & 58344,418 \\ 0 & 7001,330253 & 58344,418 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p \\ R_s \\ R_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 46717,66667 \\ 10621,66667 \\ 8886,66667 \end{pmatrix}$$

Cálculo do determinante principal:

$$Det = \begin{vmatrix} 5671,077505 & 63011,97229 & 0 \\ 630,1197229 & 0 & 58344,418 \\ 0 & 7001,330253 & 58344,418 \end{vmatrix}$$

$$Det = -4,633140389 \times 10^{12}$$

Cálculo da resistência do primário:

$$R_p = \frac{46717,66667 \quad 63011,97229 \quad 0}{10621,66667 \quad 0 \quad 58344,41876}$$

$$R_p = \frac{8886,66667 \quad 7001,330253 \quad 58344,41876}{10621,66667 \quad 0 \quad 58344,41876}$$

$$R_p = 5,495663445\Omega$$

Cálculo da resistência do secundário:

$$R_s = \begin{vmatrix} 5671,077505 & 46717,66667 & 0 \\ 630,1197229 & 10621,66667 & 58344,41876 \\ 0 & 8886,666667 & 58344,41876 \end{vmatrix}$$

$$R_s = 0,246799669\Omega$$

Cálculo da resistência do terciário:

$$R_t = \begin{vmatrix} 5671,077505 & 63011,97229 & 46717,66667 \\ 630,1197229 & 0 & 10621,66667 \\ 0 & 7001,330253 & 8886,666667 \end{vmatrix}$$

$$R_t = 0,122697952\Omega$$

A figura 6.10 mostra o circuito elétrico construído no ATPDraw contendo o transformador de três enrolamentos. Já a figura 6.11 retrata todos os parâmetros calculados anteriormente, já transpostos para o bloco representativo do equipamento no ATP.

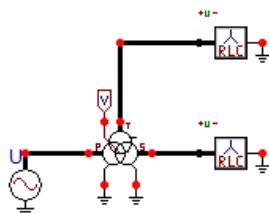


Figura 6.10 - Circuito elétrico construído no ATPDraw

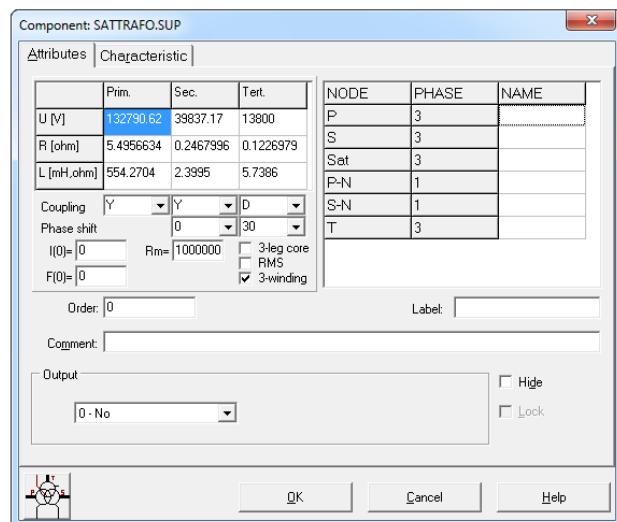


Figura 6.11 - Janela com os parâmetros do transformador

Foi definido como tempo total de simulação um período de 1 segundo, com passo de integração δT igual a 10^{-6} , como ilustra a figura 6.12 abaixo. As figuras 6.13 e 6.14 a seguir ilustram as curvas de tensão fase-neutro das fases A, B e C no primário do transformador. Pode-se notar um pico de tensão próximo a 188 kV, já que a magnitude de entrada, 230 kV RMS fase-fase, foi dividida por $\sqrt{3}$ para obtenção do módulo fase-neutro e, posteriormente, multiplicado por $\sqrt{2}$, de forma a chegar ao seu valor de pico.

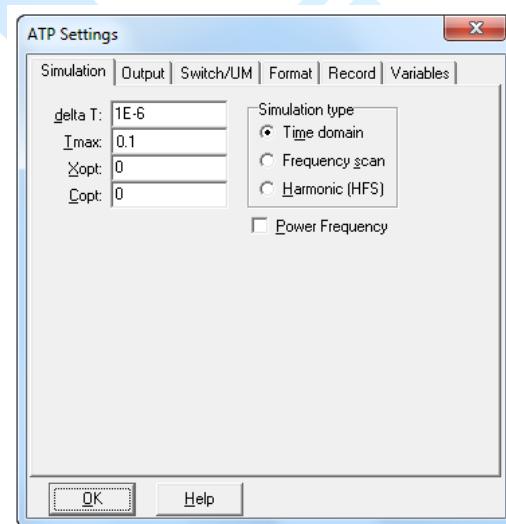


Figura 6.12 - Janela com o período de simulação e passo de integração do ATP

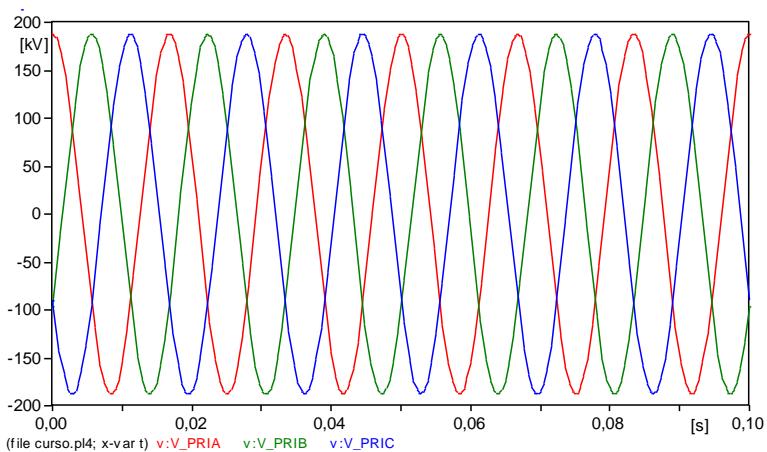


Figura 6.13 - Tensão no enrolamento primário do transformador

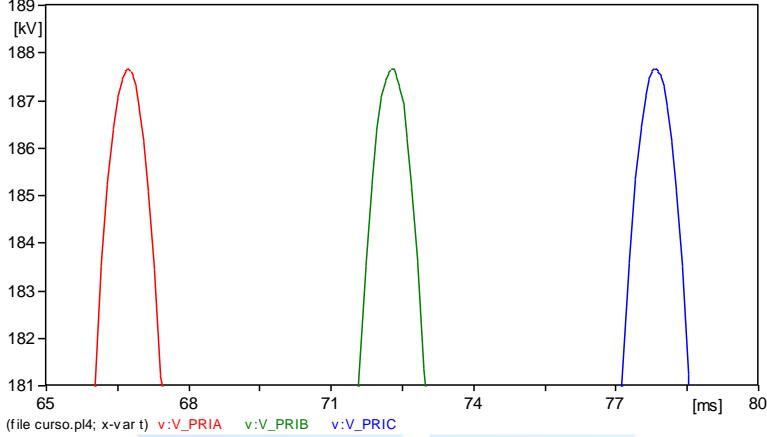


Figura 6.14 - Amplitude da curva de tensão no enrolamento primário do transformador

Com relação ao enrolamento secundário do transformador, as figuras 6.15 e 6.16 demonstram as curvas de tensão neste ponto. Pode-se notar um pico de tensão próximo a 56 kV, já que a magnitude de saída, 69 kV RMS fase-fase, foi dividida por $\sqrt{3}$ para obtenção do módulo fase-neutro e, posteriormente, multiplicado por $\sqrt{2}$, de forma a chegar ao seu valor de pico.

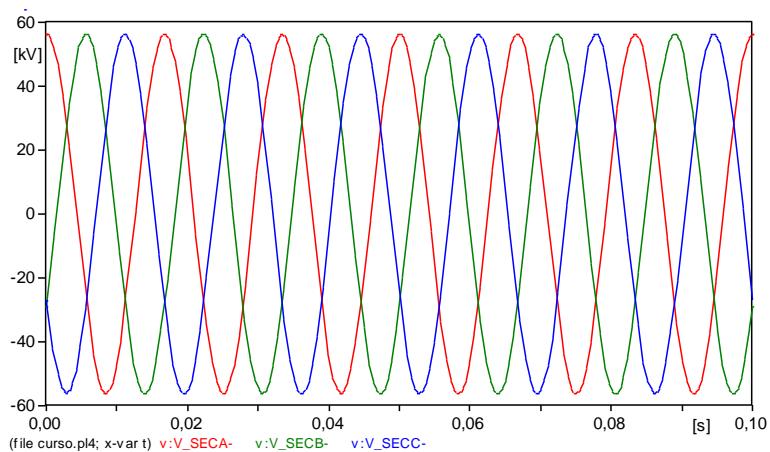


Figura 6.15 - Tensão no enrolamento secundário do transformador

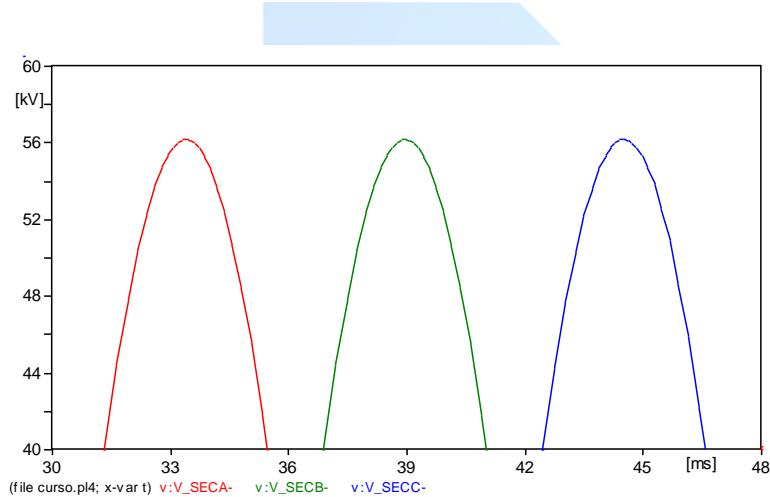


Figura 6.16 - Amplitude da curva de tensão no enrolamento secundário do transformador

Com relação ao enrolamento terciário do transformador, as figuras 6.17 e 6.18 ilustram as curvas de tensão neste ponto. Pode-se notar um pico de tensão próximo a 11 kV, já que a magnitude de saída, 13,8 kV RMS fase-fase, foi dividida por $\sqrt{3}$ para obtenção do módulo fase-neutro e, posteriormente, multiplicado por $\sqrt{2}$, de forma a chegar ao seu valor de pico.

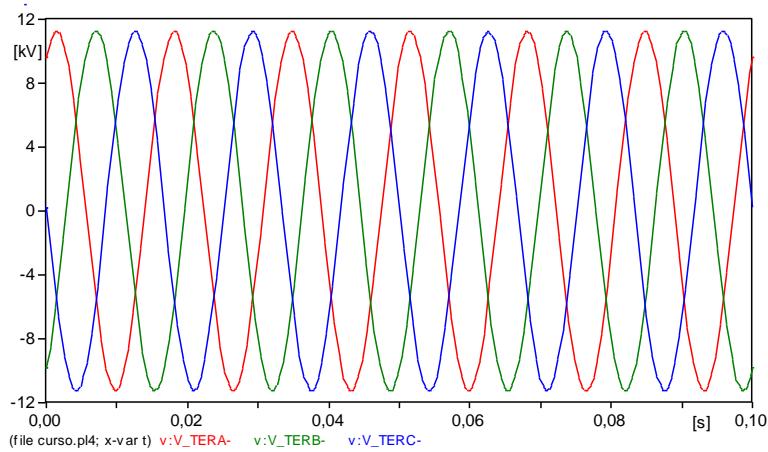


Figura 6.17 - Tensão no enrolamento terciário do transformador

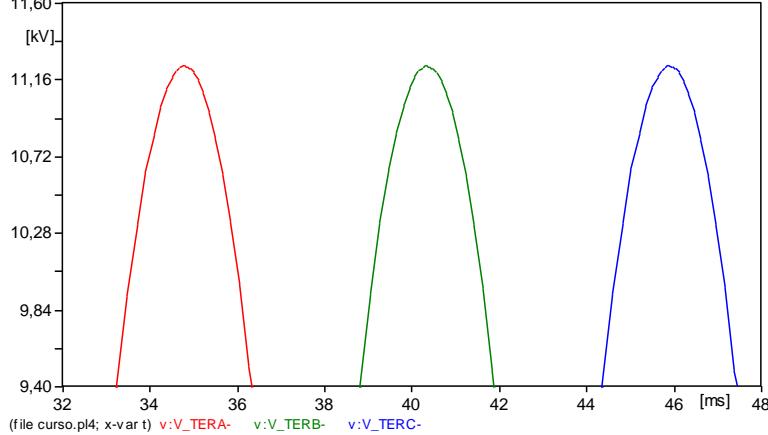


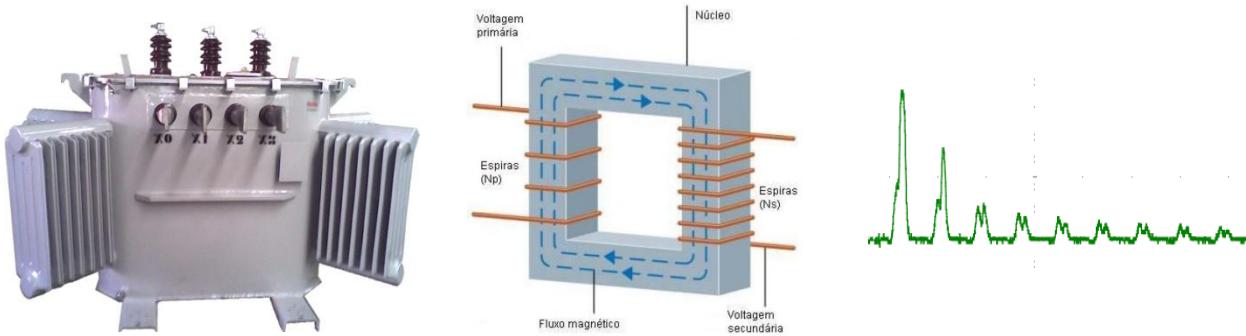
Figura 6.18 - Amplitude da curva de tensão no enrolamento terciário do transformador

Conclusões

O transformador de três enrolamentos constitui-se num importante equipamento para o adequado funcionamento de sistemas elétricos de potência. Diante disso, é essencial o desenvolvimento de modelos computacionais deste elemento que permitam a execução de estudos efetivos a respeito de seu comportamento na rede.

Dessa forma, este capítulo abordou a modelagem e a compreensão dos princípios de funcionamento do transformador de três enrolamentos. O cálculo dos principais parâmetros e sua inserção no bloco elétrico representativo do ATPDraw, a execução da simulação computacional e a análise dos resultados obtidos demonstraram a eficácia do estudo proposto.

7 - Transformadores: Característica de Saturação e Corrente de Energização



7.1 - Introdução

Os grandes transformadores de potência pertencem à classe dos equipamentos de alto custo e de vital importância para o funcionamento dos sistemas elétricos de potência de corrente alternada. A proteção destes equipamentos é um dos grandes desafios na área de proteção de sistemas de potência. A tentativa de inibir as elevadas correntes de magnetização, denominadas frequentemente de correntes de *inrush*, é uma dessas questões. As correntes de *inrush* em transformadores de potência ou mesmo de pequenos transformadores resultam de qualquer mudança abrupta na tensão de excitação. Usualmente consideradas como resultado da energização de um transformador, as elevadas correntes de magnetização podem também ser causadas pela ocorrência de faltas externas aos transformadores, quando podem surgir sobretensões no sistema, ou no restabelecimento da tensão de excitação após a eliminação de uma falta externa. A corrente de *inrush* de magnetização devido a energização de um transformador é considerada o caso mais severo [1].

Conforme estabelece a teoria clássica sobre o tema, a energização convencional de transformadores de potência pode resultar em elevados fluxos dinâmicos no núcleo do transformador, responsáveis pela saturação de uma ou mais colunas do núcleo e, como consequência, elevados valores da corrente de magnetização podem surgir [1].

Essas correntes possuem amplo espectro harmônico, incluindo as harmônicas pares, e ocasionam efeitos indesejáveis ao próprio transformador e ao sistema de potência, tais como:

fadiga mecânica nos enrolamentos, deterioração da isolamento, falha na operação do relé diferencial de proteção do transformador e afundamentos temporários de tensão. Estes dois últimos efeitos afetam diretamente a qualidade da energia elétrica do sistema, enquanto os dois primeiros têm efeito na degradação da vida útil do referido equipamento. Tanto as interrupções temporárias quanto aquelas de maior duração implicam em grandes perdas para as concessionárias e consumidores. Os afundamentos de tensão podem frequentemente ocasionar o funcionamento irregular de equipamentos sensíveis, enquanto que a interrupção de fornecimento, quer temporário ou de duração mais prolongada, implica na interrupção de processos industriais, ocasionando danos à produção, perdas de matérias-primas, etc., resultando em dispendiosa força de trabalho e tempo para o seu restabelecimento [1]. A figura 7.1 apresenta o exemplo da energização de um transformador com as respectivas correntes de *inrush* do equipamento.

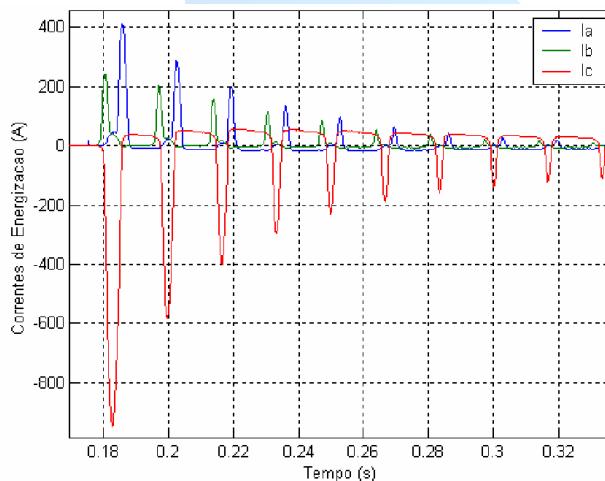


Figura 7.1 – Correntes nas três fases do transformador – ensaio de energização.

Vale ressaltar que a corrente de *inrush* dos transformadores está diretamente relacionada com as características físicas e construtivas do núcleo do transformador e o tipo de material utilizado na construção do mesmo.



7.2 - Características dos Materiais Ferromagnéticos

As lâminas de aço e ferro-silício são os mais importantes materiais magnéticos produzidos para uma grande variedade de produtos elétricos, tais como: motores elétricos, núcleos de grandes reatores e transformadores, rotores de máquinas de alta velocidade, etc. O aço utilizado em equipamentos elétricos (transformadores, motores, etc.) pode ser definido como sendo um material de fácil magnetização, delgado, do tipo lâminas de aço, geralmente na faixa de 0,15 a 1,0mm de espessura. De um modo geral os materiais utilizados atualmente em equipamentos/dispositivos elétricos são constituídos de aços de grãos orientados e não orientados. A tabela 7.1 resume as aplicações típicas para esses aços aplicados em dispositivos/equipamentos elétricos [2].

Tabela 7.1 – Aplicações típicas de aços utilizados em dispositivos elétricos

Aplicação	Aço de grãos não orientados			Aço de grãos orientados	
	sem silício	pouco silício	bastante silício	convencional	alta
Motores pequenos	X	X			
Reatores para lâmpadas	X	X			
Motores médios de CA	X	X			
Transformadores de solda		X	X		
Transformadores de áudio		X	X		
Transformadores de pequena potência		X	X	X	
Grandes máquinas rotativas			X	X	
Geradores médios		X	X		
Transformadores de distribuição				X	X
Transformadores de potência					X

As lâminas de aço de grãos orientados são magneticamente anisotrópicas e têm propriedades magnéticas superiores na direção de laminação. Estas qualidades especiais são devido à combinação de composição química, laminação e tratamento com calor. As lâminas de aço de grãos orientados são mais caras do que as lâminas de aço de grãos não orientados e são principalmente usadas em transformadores de distribuição e de potência, assim como também para grandes máquinas elétricas rotativas. Atualmente a espessura das lâminas varia de 0,23 mm a 0,35mm, produzidas na forma de lâminas com largura de até aproximadamente 1270 mm. O



conteúdo de silício varia de 2,9 a 3,2%, restringindo-se a um máximo de 3,4% porque o material se torna quebradiço, além das dificuldades de laminação. O conteúdo de silício é crítico no desempenho dos aços usados em dispositivos elétricos porque ele aumenta a resistividade, reduz a anisotropia e a magnetostrição.

As lâminas de aço de grãos não orientadas são geralmente isotrópicas, tendo as mesmas propriedades mecânicas e magnéticas em todas as direções. Estas lâminas são frequentemente usadas em pequenos motores elétricos. As lâminas de aço de grãos não orientados podem ser fornecidas completamente processadas ou semiprocessadas. As lâminas semiprocessadas podem ser fornecidas sem silício ou contendo baixas percentagens de silício. As lâminas semiprocessadas são mais fáceis de cortar, mas requerem o recozimento e a cobertura com uma fina camada de isolamento após o corte, a fim de que o material possa alcançar suas propriedades magnéticas. O recozimento afeta a estrutura interna e a composição do aço, enquanto a cobertura adiciona uma superfície de óxido de ferro que serve como uma camada isolante entre as lâminas.

A principal questão que afeta a eficiência de um transformador ou motor está relacionada com as perdas visto que a redução destas aumentará a eficiência dos equipamentos. As componentes de perdas no núcleo de lâminas de aço podem ser geralmente reduzidas através de:

- Redução da espessura (correntes induzidas);
- Aumento na resistividade do material do núcleo pelo aumento do conteúdo de silício (correntes induzidas);
- Redução do tamanho dos grãos (correntes induzidas);
- Aumento da pureza do material (histerese);
- Redução no esforço interno e na superfície (histerese e correntes induzidas);
- Submissão do material ao laser, objetivando a orientação dos domínios magnéticos.

As perdas no núcleo podem ser separadas nas seguintes componentes: perdas por histerese, perdas por correntes induzidas, perdas anômalas e perdas rotacionais (presentes nos motores). Estas são consideradas em maiores detalhes na sequencia.

7.2.1- Perdas por correntes induzidas: são produzidas pelo fluxo magnético alternado induzindo uma força eletromotriz nas lâminas do núcleo, resultando na circulação de corrente em qualquer caminho fechado disponível. Seus principais efeitos são: reduzir o campo magnetizante



aplicado e produzir perdas elétricas no material sob a forma de calor. Tais perdas são consideradas de acordo com a teoria clássica atribuída a Steinmetz, a qual expressa as mesmas por correntes induzidas e dependentes da taxa de mudança na densidade de fluxo, ou alternativamente da frequência e da máxima densidade de fluxo. Assumindo que o fluxo tenha uma forma de onda senoidal, obtém-se a expressão das perdas em questão na forma:

$$P_{CI} = \frac{Vol \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot e^2 \cdot (B_{MAX})^2}{6\rho} \text{ ou } P_{CI} = \frac{Vol \cdot e^2}{12\rho} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \text{ (Watts)}$$

sendo:

f - Frequência (Hz);

Vol - Volume do núcleo (m³);

e - Espessura das lâminas (m);

ρ - Resistividade da lâmina ($\Omega \cdot m$);

B_{max} - Densidade de fluxo magnético máximo (Tesla).

7.2.2 - perdas por histerese: estas estão relacionadas com a não linearidade e diferenças na magnetização e desmagnetização de todos os materiais ferromagnéticos. Assim, as perdas por histerese num dado volume de material são dadas por:

$$P_H = k_1 \cdot Vol \cdot f \cdot (B_{MAX})^{n_{st}} \text{ (Watts)}$$

sendo:

k_1 - Uma constante para um dado tipo de ferro e dada faixa de densidade de fluxo;

Vol - Volume do núcleo (m³);

n_{st} - Índice de Steinmetz;

B_{max} - Densidade de fluxo magnético máximo (Tesla);

f - Freqüência (Hz).

Uma equação de Steinmetz modificada para o cálculo das perdas por histerese foi encontrada experimentalmente, ajustando-se a curva às perdas medidas [3], cuja expressão é:

$$P_H = k_1 \cdot Vol \cdot f^{1.1} \cdot (B_{MAX})^{1.8} \text{ (Watts)}$$

7.2.3 - As perdas anômalas: em materiais de grãos grosseiros, um outro mecanismo de perdas, as perdas por correntes induzidas anômalas, podem tornar-se significante. Os grandes espaçamentos das paredes do domínio magnético dão uma distribuição não uniforme às correntes induzidas, causando aumentos locais nas perdas por correntes induzidas e consequentemente um aumento nas perdas totais por estas correntes. As perdas por correntes induzidas anômalas podem ser calculadas por:

$$P_{AN} = k_2 \cdot Vol \cdot (f \cdot B_{MAX})^{1.5} \quad (\text{Watts})$$

sendo:

Vol - Volume do núcleo (m^3);

f - Freqüência (Hz);

B_{max} - Densidade de fluxo magnético máximo (Tesla);

k_2 - Constante que depende dos parâmetros elétricos e estruturais do aço.

As perdas anômalas também podem ser equacionadas como:

$$P_{AN} = \frac{2^{0.75} k_3 \cdot Vol \cdot e^2}{(2\pi)^{1.5}} \cdot \left(\frac{dB}{dt}\right)^{1.5} \quad (\text{Watts})$$

sendo:

k_3 - Constante empírica.

As perdas por correntes induzidas, histerese e perdas anômalas contribuem para a largura do laço de histerese dinâmico. A figura 7.2 ilustra esse comportamento.

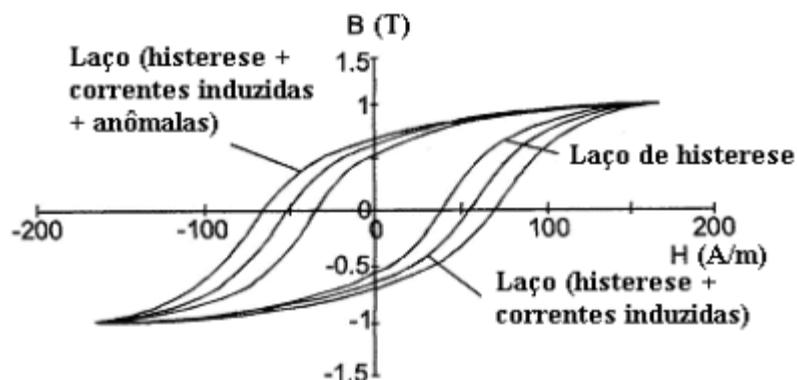


Figura 7.2– Diferentes laços de histerese representando as três perdas no material ferromagnético.



Na figura observa-se que o laço de histerese torna-se mais largo na direção da intensidade de campo magnético (H) quando ocorrem as perdas por correntes induzidas e anômalas.

As constantes nas fórmulas das perdas por histerese e anômalas nem sempre são de fácil obtenção e separação, por conseguinte, o procedimento utilizado para extração dos laços de histerese nos testes laboratoriais implicitamente conterá todas as perdas anteriormente mencionadas.

7.3 - Propriedades Gerais dos Laços de Histerese

Tendo em vista que a curva ou laço de histerese é de extrema importância na modelagem do núcleo não linear do transformador, destaque será dado aos termos e definições que a ela se relacionam.

Uma característica especial dos materiais ferromagnéticos é que a magnetização espontânea começa a ocorrer abaixo da temperatura específica do material (ponto Curie). Os ímãs atômicos elementares são alinhados em paralelo dentro de regiões macroscópicas denominadas de domínios. Esses domínios são normalmente orientados de modo que nenhum efeito magnético é perceptível. Entretanto, quando um material ferromagnético é colocado num campo magnético esse comportamento torna-se diferente. Partindo-se de $H=0$ e $B=0$ obtém-se a curva de magnetização inicial. Em baixos níveis da intensidade de campo, os domínios que são favoravelmente orientados ao campo magnético crescem as custas dos que não são favoravelmente orientados. Isto produz o que se denomina de deslocamento das paredes. Para maiores intensidades de campo, domínios inteiros orientam-se magneticamente, correspondendo à parte mais íngreme da curva e finalmente os momentos magnéticos saem dos estados preferidos dado pela estrutura do cristal, na direção do campo magnético até que a saturação seja obtida, ou seja, todos os ímãs elementares no material estão na direção do campo, conforme mostrado numa forma simplificada na figura 7.3. Se, agora, a intensidade de campo for reduzida a zero, aumentada na direção contrária, novamente reduzida a zero, e finalmente aumentada na direção inicial, a curva B é completamente diferente, criando o laço de histerese conforme mostrado na figura 7.4.

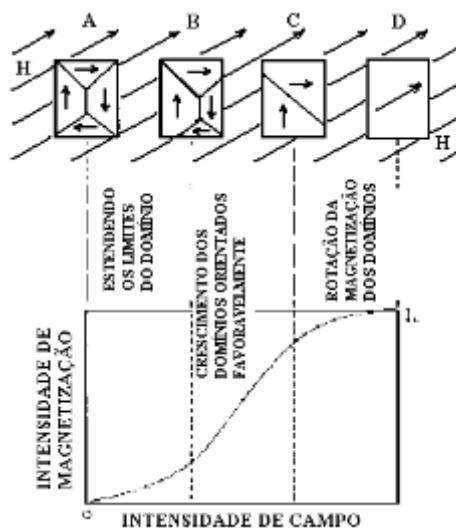


Figura 7.3 – Efeito da magnetização do material versus força de magnetização.

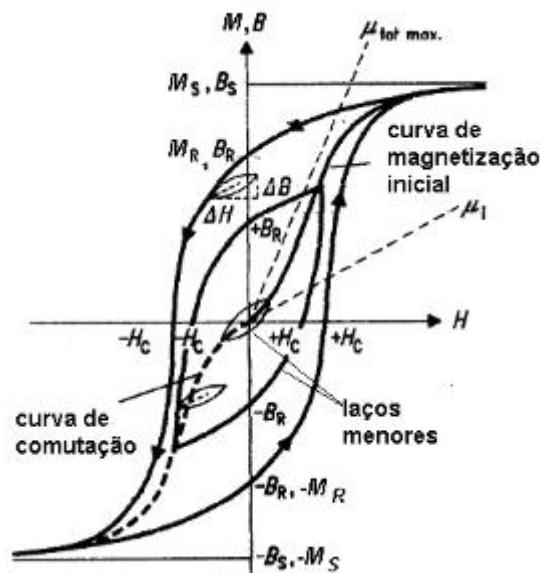


Figura 7.4 – Laço de histerese maior e laços menores.

sendo:

$$H \quad - \text{Intensidade de campo magnético} = \frac{i_n}{l} (A/m);$$

$$B \quad - \text{Densidade de fluxo magnético} = \frac{\Phi}{A} \left(\frac{V_s}{m^2} \right) \text{ ou (Tesla)}.$$



A relação geral entre B e H é dada por:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r (H) \cdot H \text{ (V.s/m²)}$$

sendo:

μ_0 - Permeabilidade do ar ($= 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/(A.m)}$);

μ_r - Permeabilidade relativa.

Referindo-se à figura 3, os seguintes parâmetros básicos do laço de histerese podem ser definidos:

7.3.1 - Curva de magnetização inicial

A curva de magnetização inicial descreve a relação $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ para a primeira magnetização seguindo-se uma desmagnetização total. Unindo-se o ponto final de todos os sublaços, de $H=0$ até $H=H_{max}$, obtém-se a assim chamada curva de comutação (também chamada de normal ou curva de magnetização média), que para materiais de ferrite facilmente magnetizáveis, coincide com a curva de magnetização inicial.

7.3.2 - Densidade de fluxo magnético de saturação (B_s)

A densidade de fluxo magnético de saturação B_s é definida como a máxima densidade de fluxo atingível num material, isto é, para um elevado valor de intensidade de campo magnético, em uma dada temperatura; acima do valor de B_s não é possível aumentar B por incremento de H .

7.3.3 - Densidade de fluxo remanescente ($B_R(H)$)

A densidade de fluxo remanescente (densidade de fluxo residual) é uma medida do grau de magnetização residual no material. Se a intensidade de campo magnético H é reduzida a zero, o material retém ainda uma densidade de fluxo específica do material $B_R \neq 0$. Na figura 4 equivalente a intersecção com a ordenada para $H=0$.

7.3.4 - Intensidade de campo magnético coercitivo (H_C)

A densidade de fluxo B pode ser reduzida a zero aplicando-se um campo em oposição ($-H_C$). Na figura 3 equivalente a intersecção com a abscissa para $B=0$.

7.3.5 - Permeabilidade

Diferentes valores de permeabilidade μ são definidos em um laço de histerese.

7.3.5.1 - Permeabilidade inicial - μ_i

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (\Delta H \rightarrow 0)$$

A permeabilidade inicial μ_i define a permeabilidade relativa em baixos níveis de excitação e constitui o mais importante meio de comparação de materiais magnéticos facilmente magnetizáveis.

7.3.5.2 - Permeabilidade efetiva - μ

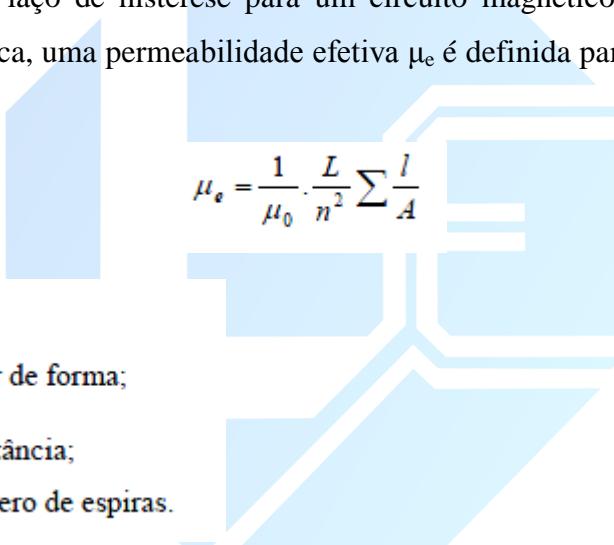
Muitas das formas de núcleo em uso atualmente não têm um caminho magnético fechado, sendo que o circuito magnético consiste de regiões onde $\mu_i \neq 1$ (no material) e $\mu_i = 1$ (no ar). A figura 7.5 mostra a forma do laço de histerese para um circuito magnético consistindo de material magnético e ar. Na prática, uma permeabilidade efetiva μ_e é definida para núcleos com entreferro de ar.

sendo:

$\sum \frac{l}{A}$ - Fator de forma;

L - Indutância;

n - Número de espiras.



7.3.5.3 - Permeabilidade coercitiva – μ_{hc}

A permeabilidade coercitiva é definida como:

$$\mu_{hc} = \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right); \text{ p/ } (\Delta H \rightarrow 0 \text{ em } H_c)$$

Outras definições de permeabilidade existem, tais como: permeabilidade aparente, permeabilidade complexa, permeabilidade reversível, permeabilidade incremental (dB/dH), permeabilidade absoluta (B/H) e permeabilidade de amplitude, entretanto tais definições não serão de uso neste trabalho.

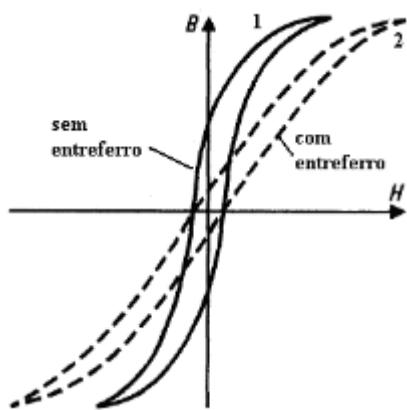


Figura 7.5 – Comparação dos laços de histerese para um núcleo com e sem um entreferro de ar.

7.4 - Transformadores Saturáveis no Programa ATP

Conforme mencionado anteriormente, a inserção da característica de saturação nos modelos de transformadores é extremamente importante para análise de alguns eventos no sistema elétrico, sobretudo, aqueles relacionados a transitórios elétricos. Neste cerne, o ATP se apresenta como uma boa ferramenta para a realização de estudos de transitórios elétricos, tais como: chaveamentos de bancos de capacitores, energização de transformadores, faltas, etc.

A representação de transformadores no programa ATP através de modelos elétricos equivalentes possibilita a representação dos mais variados tipos de transformadores, desde os mais simples até as configurações mais complexas para os mesmos, constituídos de unidades trifásicas do tipo núcleo envolvido ou envolvente, de três ou cinco colunas, com dois ou mais enrolamentos por fase. Outra característica bastante interessante que também é oferecida pelo aplicativo, é a possibilidade de representação da curva de saturação do equipamento.

A figura 7.6 apresenta o circuito elétrico equivalente do transformador saturável monofásico de dois enrolamentos, também conhecido por “Saturable Transformer”, disponível na biblioteca do ATP.

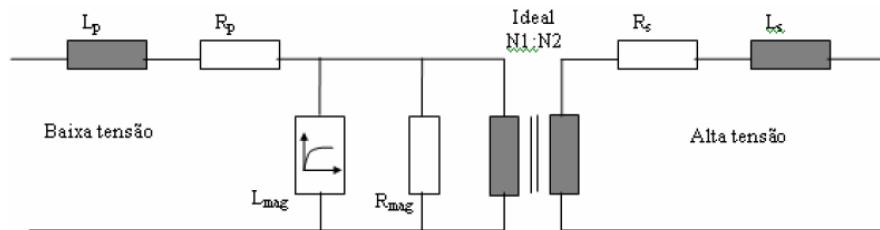


Figura 7.6 – Diagrama unifilar – circuito elétrico equivalente do transformador monofásico de dois enrolamentos – ATP.

Conforme pode-se observar, o modelo é composto basicamente por um transformador ideal de dois enrolamentos ($N_1:N_2$), sendo este o responsável pela representação da relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário. Adicionado a isto, o mesmo ainda apresenta as impedâncias dos enrolamentos do equipamento, na forma de resistências e indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente (R_p e L_p – enrolamento primário) e (R_s e L_s – enrolamento secundário). Além disso, o circuito equivalente apresenta ainda um ramo responsável pela representação do efeito de saturação do transformador (L_{mag}), sendo este conectado no circuito que representa o enrolamento primário. Por fim, as perdas por excitação, também conhecidas por perdas no núcleo, são representadas através de um elemento resistivo linear (R_{mag}), também conectado no circuito representativo do enrolamento primário, paralelamente ao ramo de saturação.

A figura 7.7 apresenta o respectivo cartão do transformador saturável monofásico de dois enrolamentos, destacado em vermelho no arquivo “ATP-file”, cujo equivalente elétrico foi apresentado anteriormente.



```
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW setembro, terça-feira 20, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C   dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
C     1.E-6    .001
C     500      1      1      1      1      1      0      0      1      7      0
C     1       2       3       4       5       6       7       8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER           IO____FO____TX0001RMAG_____
1.                  1.
2.                  2.
3.                  3.
4.                  4.
5.                  5.
9999
1BUS11 BUS21          R1____L1____N1_____
2BUS12 BUS22          R2____L2____N2_____
```

Figura 7.7 – Transformador saturável monofásico – arquivo ATP-file.

A figura 7.8 ilustra o elemento representativo do transformador monofásico saturável existente na interface gráfica ATPDraw.

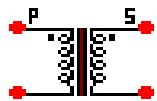


Figura 7.8 – Transformador saturável monofásico.

A figura 7.9 (a) e (b) ilustram respectivamente as janelas onde são inseridos os parâmetros elétricos equivalentes relativos às características dos enrolamentos e relacionados a curva de magnetização do transformador (que representa as características magnéticas do núcleo do transformador).



Component: TRAFO_S.SUP

Attributes		Characteristic	
DATA	VALUE	NODE	PHASE
I _o	0	P1	1
F _o	0	P2	1
R _{mag}	100000	S1	1
R _p	10	S2	1
L _p	10		
V _{rp}	230		
R _s	10		
L _s	10		

Order: 0 Label:

Comment:

Output: Hide Lock

Component: TRAFO_S.SUP

Attributes		Characteristic			
Saturation					
I [A]	Fluxlinked [Wb-T]	<input type="button" value="Add"/>			
0.	0.	<input type="button" value="Delete"/>			
0.	0.	<input type="button" value="Sort"/>			
0.	0.	<input type="button" value="Move"/>			
0.	0.	<input type="button" value="Up"/>			
0.	0.	<input type="button" value="Down"/>			
0.	0.				
File	\$Include: <input type="text"/> <input type="button" value="Browse..."/> <input type="checkbox"/> Include characteristic	<input type="button" value="Save..."/>	<input type="button" value="Copy"/>	<input type="button" value="Paste"/>	<input type="button" value="View"/>

a) Características elétricas dos enrolamentos;

b) Características elétricas equivalentes do núcleo;

Figura 7.9 – Janelas de parametrização do transformador saturável monofásico.

As principais informações necessárias para suprir o modelo de transformador apresentado são:

✓ **INFORMAÇÕES ELÉTRICAS:**

- I_o – Corrente no ramo magnetizante em regime permanente – [A];
- F_o – Fluxo no ramo magnetizante em regime permanente – [Wb-espira];
- R_{mag} – Resistência no ramo de magnetizante – [ohm];
- R_p – Resistência no enrolamento primário – [ohm];
- L_p – Indutância no enrolamento primário – [mH];
- V_{rp} – Tensão nominal no enrolamento primário – [kV];
- R_s – Resistência no enrolamento secundário – [ohm];
- L_s – Indutância no enrolamento secundário – [mH];
- V_{rs} – Tensão nominal no enrolamento secundário – [kV];

✓ **INFORMAÇÕES DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO:**

- (Corrente, Fluxo) – Pares de pontos de corrente *versus* fluxo concatenado, representativos da curva de saturação do transformador representado no ATP.



Vale ressaltar que os valores de corrente e fluxo correspondem a amplitudes máximas – [A] e [Wb.espira];

✓ **INFORMAÇÕES SOBRE OS NÓS:**

- BUS11, BUS12 – Pontos de entrada e saída do enrolamento primário;
- BUS21, BUS22 – Pontos de entrada e saída do enrolamento secundário.

Assim basta ao usuário inserir as informações elétricas nos campos ilustrados na figura 9 e o modelo de transformador estará pronto para ser utilizado. Vale ressaltar que a curva de saturação do transformador deve ser inserida através de pares de pontos de corrente *versus* fluxo concatenado ($i \times \lambda$). Estes pares de pontos representativos da curva de saturação do transformador devem ser fornecidas pelo fabricante, ou obtidas em laboratório através de ensaio experimental. Caso nenhuma destas possibilidades sejam viáveis, uma terceira opção para a obtenção da curva de saturação do transformador consiste em um método de cálculo analítico através de alguma informações básicas do equipamento como:

- Tipo de transformador;
- Potência nominal;
- Tensões nominais;
- Tipo de ligação;
- Impedância percentual (Z%);
- Corrente a vazio.

Estas informações geralmente podem ser encontradas nos dados de placa do equipamento, ou nos programas de gerenciamento do sistema elétrico da concessionária de energia. Além destas informações, o operador do programa ATP necessita possuir uma informação essencial referente a curva ($B \times H$) do tipo de material magnético utilizado na construção do núcleo do equipamento. Nesse caso, como a maioria dos transformadores de distribuição existente no Brasil utilizam chapas de aço-silício da fornecedora “Acesita”, a curva de material magnético que será utilizada como base para os cálculos será a curva ($B \times H$) da chapa de aço-silício da Acesita de 0,3 mm. A figura 7.10 apresenta a curva ($B \times H$) da referida chapa que será utilizada nos cálculos



para o levantamento da curva corrente *versus* fluxo concatenado ($i \times \lambda$) do transformador a ser simulado.

Curva de Magnetização

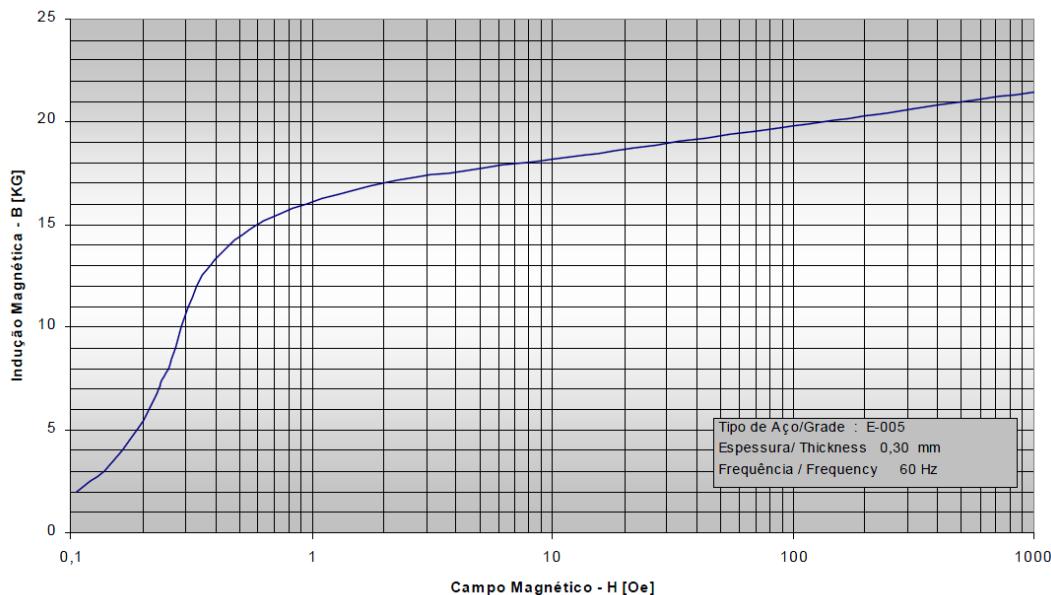


Figura 7.10 – Curva de magnetização (BxH) da chapa de aço silício de grãos orientados, utilizado na construção do núcleo do transformador.

A maneira como são realizados todos os cálculos dos parâmetros elétricos equivalentes relacionados enrolamentos dos transformadores monofásicos, trifásicos de dois enrolamentos e trifásico de três enrolamentos já foram apresentados anteriormente. Entretanto a metodologia para o cálculo da curva de saturação do equipamento ainda não foi contemplada até o presente momento. O processo é bastante simples e pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Determinação do tipo de material utilizado na construção do núcleo do equipamento; (obs.: conforme mencionado anteriormente, o tipo de material mais utilizado na prática nos transformadores de distribuição no Brasil e que será utilizado em nossos estudos computacionais será a chapa de aço-silício da “Acesita” de 0,3 mm de espessura).



- Levantamento de alguns pontos da curva ($B \times H$);
(obs.: nesse caso foram levantados cerca de 10 pontos da curva).

- Cálculo da corrente nominal no lado do transformador que se queira ter como referência;
(obs.: geralmente faz-se o cálculo em relação ao primário do transformador).

- Determinação da corrente do ramo magnetizante em regime permanente ou corrente a vazio (I_o);
(obs.: corresponde a corrente de magnetização do transformador, relacionada ao ponto do joelho da curva de saturação do equipamento).

- Determinação do correspondente fluxo do ramo magnetizante em regime permanente (λ_o);
(obs.: corresponde ao respectivo fluxo relativo a corrente de magnetização do transformador, também relativo ao ponto do joelho da curva de saturação do equipamento).

- Estimação dos demais valores de corrente e fluxo relativos aos demais valores de ($B \times H$) existentes na curva;
(obs.: esta técnica consiste em uma técnica que utiliza um processo por estimativa ou aproximação. Quando disponível o ideal é utilizar a curva levantada em laboratório ou fornecida pelo fabricante).

7.5 - Cálculo da Curva de Saturação para um Transformador Monofásico



Para determinar a característica de saturação do transformador foram utilizados os dados da curva de magnetização da chapa de aço silício de grãos orientados da Acesita (0,3 mm), apresentada a seguir.

H [A/m]	B [T]	I _{pico} [A]	λ _{pico} [Wb]
6,684	0,200	Calcular	Calcular
11,099	0,400	Calcular	Calcular
17,729	0,800	Calcular	Calcular
23,805	1,200	Calcular	Calcular
31,495	1,400	Calcular	Calcular
64,166	1,600	Calcular I ₀ (joelho da curva)	Calcular λ ₀ (joelho da curva)
136,311	1,700	Calcular	Calcular
946,842	1,850	Calcular	Calcular
7419,427	2,000	Calcular	Calcular
30000,000	2,100	Calcular	Calcular

Curva (B x H) -

Os valores de corrente a vazio e de fluxo, apresentados na tabela e que serão utilizados no modelo do transformador no ATP, foram obtidos a partir do cálculo apresentado abaixo. Para isso, inicialmente devem ser calculados os valores de I₀ e λ₀. Para tanto, o primeiro passo é calcular o valor de I_{n1}, conforme equação abaixo:

$$I_{n1} = \frac{S_n}{V_{n1}}$$

Onde:

- I_{n1} – Corrente nominal do primário do transformador;
- S_n – Potência nominal do transformador;
- V_{n1} – Tensão nominal do lado primário do transformador;



De posse da corrente nominal do primário do transformador (I_{n1}), pode-se calcular a corrente de magnetização ou corrente a vazio do equipamento.

$$I_0 = \sqrt{2} \cdot \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{n1}$$

Onde:

- I_0 – Corrente de magnetização do transformador;
- $I_{0\%}$ - Percentual da corrente de magnetização ou corrente a vazio em relação ao nominal;
- I_{n1} – Corrente nominal do primário do transformador;

O respectivo fluxo magnetizante relativo a corrente de magnetização ou corrente a vazio do equipamento pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\lambda_0 = \frac{V_{n1}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f} = \frac{V_{n1}}{4,44 \cdot f}$$

Onde:

- λ_0 – Fluxo magnetizante do transformador referente ao joelho da curva de magnetização;
- V_{n1} – Tensão nominal do lado primário do transformador;
- f – Frequência da tensão da rede elétrica;

Os demais valores de corrente e fluxo mostrados na tabela foram obtidos pelas seguintes equações:

$$I_i = \frac{I_0}{64,166} \cdot H_i$$

Onde:

- I_i – Corrente do ponto da curva de magnetização que se quer calcular;
- I_0 – Corrente de magnetização do transformador;
- H_i – Valor de H no ponto da curva de magnetização que se quer calcular a corrente;



$$\lambda_i = \frac{\lambda_0}{1,600} \cdot B_i$$

Onde:

- λ_i – Fluxo magnetizante do transformador referente ao ponto da curva que se quer calcular;
- λ_0 – Fluxo magnetizante do transformador referente ao joelho da curva de magnetização;
- B_i – Valor de B no ponto da curva de magnetização que se quer calcular o fluxo magnetizante;

Assim deve-se proceder aos cálculos dos pares de pontos ($i \times \lambda$) relativos aos respectivos pares de pontos ($B \times H$) da curva de saturação do transformador.

7.5.1 - Exemplo: Cálculo dos Parâmetros Elétricos e da Curva de Saturação de um Transformador Trifásico de Distribuição

Os dados do transformador de MT/BT são:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: 30 KVA;
- Tensões nominais de linha: 13,8 / 0,380 KV;
- Ligação: Δ - Y aterrado;
- Impedância: $Z\% = 3,5\%$;
- Resistência: $R\% = 1,0\%$;
- Corrente a vazio: 0,4 %.

Primeiramente, serão calculados os valores das indutâncias e resistências do primário e do secundário do transformador, considerando o primário o lado de maior tensão.



- Cálculo da impedância base:

$$Z_{b1} = \frac{V_{MT}^2}{S_n} = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{30 \times 10^3} = 19044[\Omega] \quad Z_{b2} = \frac{V_{BT}^2}{S_n} = \frac{220^2}{30 \times 10^3} = 4,84[\Omega]$$

3

- Cálculo de X%:

$$X\% = \sqrt{Z\%^2 - R\%^2} = \sqrt{3,5^2 - 1,0^2} = 3,354[\%]$$

- Cálculo de L₁:

$$X_1 = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{Z_{b1}}{2} = \frac{3,354}{100} \cdot \frac{19044}{2} = 319,378[\Omega]$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi \cdot f} = \frac{319,378}{2\pi \cdot 60} = 847,175[mH]$$

- Cálculo de R₁:

$$R_1 = \frac{R\%}{100} \cdot \frac{Z_{b1}}{2} = \frac{1,0}{100} \cdot \frac{19044}{2} = 95,22[\Omega]$$

- Cálculo de L₂:

$$X_2 = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{Z_{b2}}{2} = \frac{3,354}{100} \cdot \frac{4,84}{2} = 0,0812[\Omega]$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi \cdot f} = \frac{0,0812}{2\pi \cdot 60} = 0,215[mH]$$

- Cálculo de R₂:

$$R_2 = \frac{R\%}{100} \cdot \frac{Z_{b2}}{2} = \frac{1,0}{100} \cdot \frac{4,84}{2} = 0,024[\Omega]$$



Para determinar a característica de saturação do transformador foram utilizados os dados da curva de magnetização da chapa de aço silício de grãos orientados da Acesita, apresentada a seguir.

H [A/m]	B [T]	I _{pico} [A]	λ _{pico} [Wb]
6,684	0,200	0,000427	6,471
11,099	0,400	0,000709	12,942
17,729	0,800	0,001132	25,884
23,805	1,200	0,001521	38,826
31,495	1,400	0,002012	45,297
64,166	1,600	0,004099	51,768
136,311	1,700	0,008708	55,004
946,842	1,850	0,060488	59,857
7419,427	2,000	0,473985	64,710
30000,000	2,100	1,916529	67,946

Os valores de corrente a vazio e de fluxo, apresentados na tabela e que serão utilizados no modelo do transformador no ATP, foram obtidos a partir do cálculo apresentado abaixo. Para isso, inicialmente calculam-se os valores de I₀ e λ₀.

$$I_{n1} = \frac{S_n}{V_{MT}} = \frac{\frac{30 \times 10^3}{3}}{13800} = 0,72464[A]$$

$$I_0 = \sqrt{2} \cdot \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{n1} = \sqrt{2} \cdot \frac{0,4}{100} \cdot 0,72464 = 0,004099[A]$$



$$\lambda_0 = \frac{V_{MT}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f} = \frac{13800}{4,44 \cdot 60} = 51,802[Wb]$$

Os demais valores de corrente e fluxo mostrados na tabela foram obtidos pelas seguintes equações:

$$I_i = \frac{I_0}{64,166} \cdot H_i = \frac{0,004099}{64,166} \cdot H_i \Rightarrow I_i = 6,388 \times 10^{-5} \cdot H_i$$

$$\lambda_i = \frac{\lambda_0}{1,600} \cdot B_i = \frac{51,768}{1,600} \cdot B_i \Rightarrow \lambda_i = 32,355 \cdot B_i$$

A resistência do ramo de magnetização foi calculada conforme apresentado a seguir (considerando um fator de potência a vazio de 0,2):

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_0 \cdot I_0 \cdot \cos \phi_0$$

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_{MT} \cdot \frac{0,4}{100} I_{n1} \cdot 0,2 = S_n \cdot \frac{0,08}{100} = 30 \times 10^3 \cdot \frac{0,08}{100} = 24[W]$$

$$R_{mag} = \frac{V_{MT}^2}{P_0} = \frac{13800^2}{24} = 7,935[M\Omega]$$

No modelo do transformador também foram consideradas capacitâncias de fuga das buchas e entre os enrolamentos do primário e secundário de 8 pF.

Referências Bibliográficas

[1] – APOLÔNIO, R., Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2004.

[2] – MOSES, A. J., Electrical steels: past, present and future developments, IEE Proceedings, Vol. 137, Pt. A, nº 5, p. 233-245, September 1990.

[3] RASMUSSEN, C. B. and RITCHIE, E. Iron losses and properties of soft magnetic materials for electrical machines, Institution Inst. of Energy Technology, Aalborg University.



8 - LINHAS DE TRANSMISSÃO

8.1 – Introdução

Linha de transmissão de energia elétrica – LT é a ligação entre o centro produtor e o centro consumidor. Em muitos casos, ela une dois centros consumidores ou dois centros produtores, mas a função é sempre, quer no primeiro quer no segundo caso, suprir um centro consumidor. Sistema interligado é uma malha de linhas de transmissão que suprem de energia toda uma região.

8.2 - Modelagem de Linhas de Transmissão

Uma LT de energia elétrica possui quatro parâmetros: resistência, indutância, capacitância e condutância, que influenciam em seu comportamento como componentes de um sistema de potência.

A condutância entre condutores e condutor e terra leva em conta a corrente de fuga nos isoladores das linhas aéreas de transmissão, ou na isolação dos cabos subterrâneos. No entanto, a condutância entre condutores de uma linha aérea pode ser considerada nula, pois a fuga nos seus isoladores é desprezível.

Um problema muito importante no projeto e na operação de um sistema de potência é a conservação da tensão dentro dos limites especificados, em vários pontos do sistema, por isso a modelagem das LT se faz necessária, visando possíveis soluções a este problema. Estes limites são normatizados e se encontram nos Procedimentos de Rede da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e nos Procedimentos de Distribuição – PRODIST do Operador Nacional do Sistema – ONS.

A figura representa um circuito equivalente de uma Linha de Transmissão Curta.

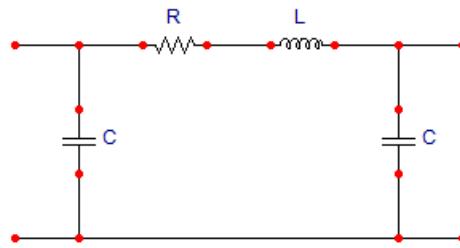


Figura 8.10 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta

Onde:

- ‘R’ é a resistência;
- ‘L’ é a indutância e;
- ‘C’ é a capacidade.

8.2.1 - Resistência das LT

É a oposição natural que cada condutor de uma fase oferece à passagem da corrente. Os condutores das linhas áreas geralmente têm uma alma de aço (para tração mecânica), circundada por alumínio, que constitui o condutor. A resistência, nas frequências usuais dos sistemas de potência, é maior do que aquela medida em corrente contínua, por causa do efeito pelicular (Efeito Skin).

A resistência das LT representa a dissipação de potência ativa devido à passagem de corrente. É a principal causa das perdas de energia nas linhas de transmissão.

8.2.2 - Indutância das LT

Comparativamente aos circuitos magnéticos, uma LT pode ser tratada como um circuito que possui entreferro constante (ar) ao longo de seu comprimento. Com isso, a relação entre o fluxo magnético concatenado ‘ λ ’ e a corrente que o origina ‘ i ’ será linear, definindo assim a indutância ‘ L ’ (1).

$$L = \frac{\lambda}{i}$$

No entanto, a indutância em LT é comumente determinada pela relação entre a reatância indutiva ‘ X_L ’ e a frequência natural ‘ ω ’:

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

Em uma linha trifásica, com espaçamento assimétrico, a indutância de fases é diferente e o circuito é desequilibrado. Por intermédio da transposição da linha, é possível restaurar o equilíbrio de fases, do ponto de vista dos terminais da linha.

A transposição consiste em fazer com que cada fase ocupe cada uma das posições na torre por igual distância, de tal modo que cada fase ocupe sua posição original, em distâncias iguais (para uma linha trifásica, três são as posições possíveis e deve-se fazer com que cada fase ocupe 1/3 do comprimento da linha em cada uma das três posições).

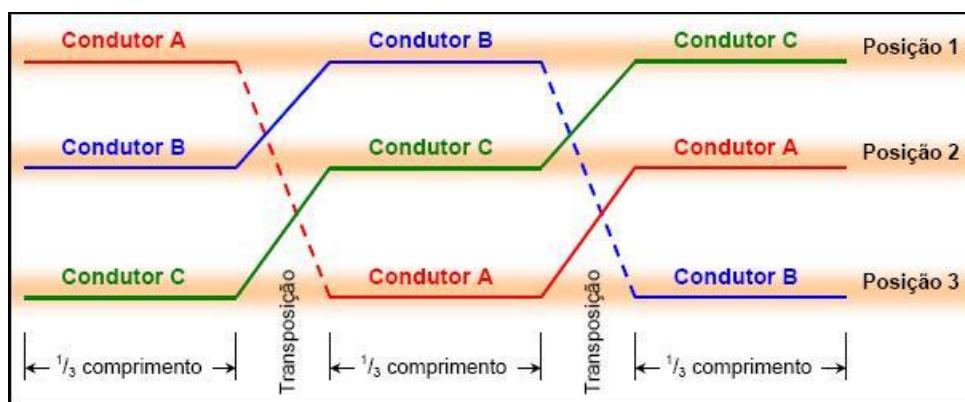


Figura 8.11 – Linha de transmissão trifásica com um ciclo de transposição

8.2.3 - Capacitância das LT

A capacidade de uma LT resulta da diferença de potencial entre os condutores; ela faz com que estes se tornem ‘carregados’ de modo semelhante às placas de um capacitor entre as quais existe uma diferença de potencial. A capacidade entre condutores em paralelo é uma constante que depende das dimensões e do afastamento dos condutores. Para linhas menores que 80 km de comprimento, o efeito da capacidade é mínimo e usualmente desprezado. Para linhas longas de tensões mais elevadas, torna-se necessário avaliar a influência da capacidade no sistema.

8.2.4 - Classificando as Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão segundo seu comprimento podem ser classificadas como curtas, médias e longas.



- Linhas curtas: até 80 km
- Linhas médias: até 240 km
- Linhas longas: mais de 240 km

Embora nem sempre as linhas possuam espaçamento equilátero e sejam plenamente transpostas, a assimetria resultante em sistemas de alta tensão e extra-alta tensão é pequena e as fases podem ser consideradas equilibradas.

Observação:

- Quase todas as linhas são modeladas como linhas médias (modelo II nominal).
- Se a linha é longa, é modelada como vários circuitos π nominais em cascata.
- As LT curtas (até 80 km) normalmente são encontradas em redes de distribuição e subtransmissão em média tensão. Neste modelo de LT os efeitos dos campos elétricos podem ser desprezados, ou seja, capacitâncias shunt são desprezadas.

8.3 - Linhas e cabos no ATPDraw

O menu de linhas e cabos apresenta vários sub-menus de acordo com os diferentes tipos de modelos:

LUMPED – Modelos de linhas com parâmetros concentrados

- Modelo π (1, 2 ou 3 fases).
- Elementos RL acoplados mutuamente (2, 3 ou 6 fases).
- Linha simétrica com elementos RL acoplados (3 ou 6 fases).

DISTRIBUTED – Modelos de linhas com parâmetros distribuídos e constantes (por exemplo: independe da frequência)

- Linhas transpostas – *Clarke* (1, 2, 3, 6¹ e 9 fases)
- Linhas sem transposição – *KCLee* (2 ou 3 fases)

¹ Existem dois modelos com 6 fases: sendo que no primeiro existe acoplamento eletromagnético entre as três fases de cada um dos dois circuitos trifásicos, e no segundo modelo este acoplamento é inexistente.



LCC: Modelos de linhas e cabos com parâmetros constantes ou dependentes da frequência (*Bergeron, PI, Jmarti, Noda ou Semlyen*).

8.3.1 - MODELO II

A modelagem das LT é geralmente realizada utilizando parâmetros distribuídos, com ou sem variação da frequência.

Este tipo de modelagem apresenta resultados similares, desde que o comprimento de cada seção II seja adequado ao fenômeno transitório em análise. Este modelo de linha de transmissão, a **parâmetros concentrados**, não apresenta valores satisfatórios para médias e longas distâncias sendo, portanto utilizado para linhas de curta distância.

O modelo II trifásico está disponível no ATP 3.5 pode ser selecionada como mostra a figura a seguir.

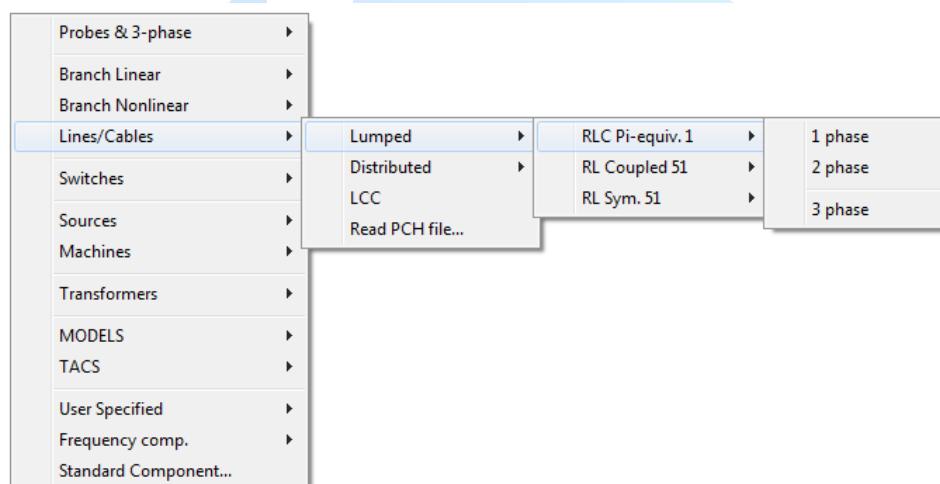


Figura 8.12 – Seleção do modelo II no ATPDraw

Tabela 8.1 - Modelos II disponibilizados no ATPDraw

Elemento	Nome	Ícone	Descrição
RLC Pi-equiv.1 + 1 phase	LINEPI_1		Modelo II monofásico
RLC Pi-equiv.1 + 2 phase	LINEPI_2		Modelo II bifásico e assimétrico
RLC Pi-equiv.1 + 3 phase	LINEPI_3		Modelo II trifásico e assimétrico



8.3.1.1 - Parâmetros no programa ATP

Ao modelarmos uma LT no ATP utilizando o modelo Π é necessário que se conheça três parâmetros: a resistência ‘R’, a indutância ‘L’ e a capacitância ‘C’.

A tabela a seguir apresenta os parâmetros, com suas respectivas unidades, necessários para modelar uma LT no ATPDraw utilizando o modelo Π monofásico.

Tabela 8.2 – Parâmetros do modelo Π

Parâmetro	Notação	Unidade
Resistência	R	Ω
Indutância	L	mH ou Ω^2
Capacitância	C	μF ou μS^3

Foram apresentados apenas os parâmetros para modelar uma LT monofásica utilizando o modelo Π . No entanto, como apresentado acima, é possível que se faça também simulações com linhas bi e trifásicas com este mesmo modelo. Nestes dois casos, entre todas as fases, tomadas duas-a-duas, poderá ser definido também uma resistência, uma indutância e uma capacitância. A Figura 8.13 ilustra este acoplamento entre fases⁴.

² Para fornecer o valor da indutância em $ohm - \Omega$ basta alterar o valor de ‘Xopt’, em **ATP>Settings... (F3)**, para a mesma frequência do sistema.

³ Analogamente ao caso da indutância, para fornecer o valor da capacitância em $micro-Siemens - \mu S$ basta alterar o valor de ‘Copt’, em **ATP>Settings... (F3)**, para a mesma frequência do sistema.

⁴ As resistências foram desprezadas.

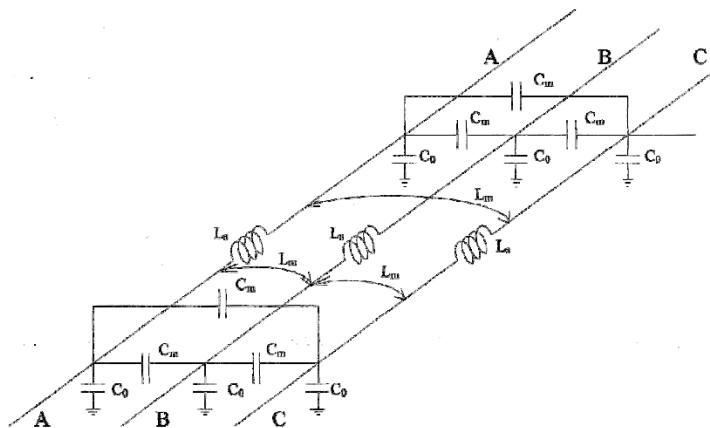


Figura 8.13 – Linha trifásica do modelo Π representando o acoplamento entre fases

8.3.2 - MODELO CLARKE (*Transposed Lines - Linhas Transpostas*)

Para a análise de LT para **parâmetros distribuídos** à frequência constante ou com resistências concentradas no meio e nas extremidades da linha de transmissão usa-se o modelo Clarke.

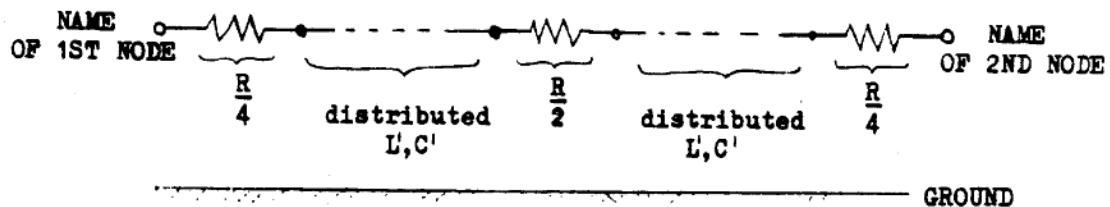


Figura 8.14

A consideração de resistências concentradas no meio e nas extremidades de uma LT é uma aproximação que não introduz erros consideráveis para os fenômenos transitórios caracterizados como **sobretensões de manobra**, sendo utilizada de um modo geral sem restrições.

Pode-se acessar este tipo de linha no programa ATP, seguindo os passos mostrados na figura abaixo:

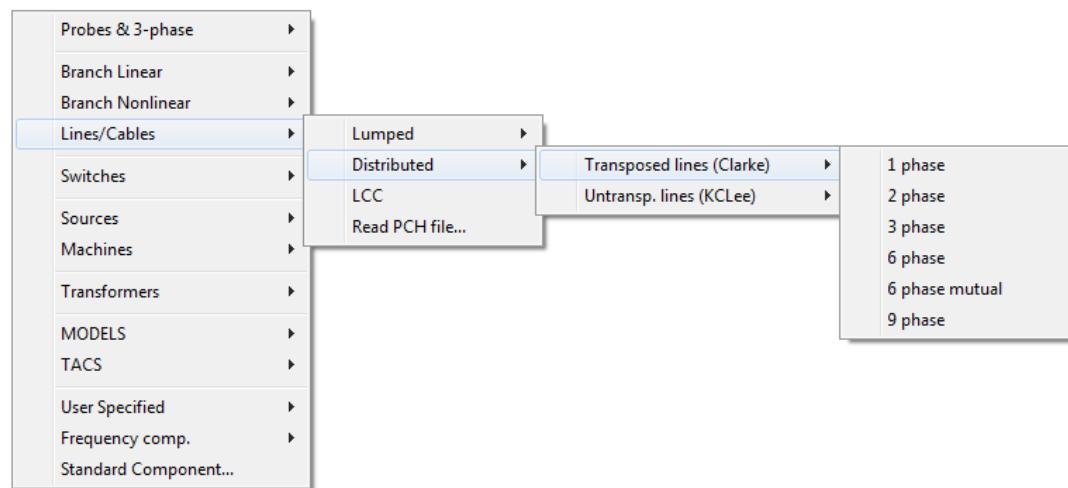


Figura 8.15 - Seleção do modelo Clarke no ATPDraw

Tabela 8.3 - Modelos II disponibilizados no ATPDraw

Elemento	Nome	Ícone	Descrição
Transposed lines (Clarke) + 1 phase	LINEZT_1		Modelo Clarke monofásico
Transposed lines(Clarke) + 2 phase	LINEZT_2		Modelo Clarke bifásico simétrico (linha transposta)
Transposed lines(Clarke) + 3 phase	LINEZT_3		Modelo Clarke trifásico simétrico (linha transposta)
Transposed lines(Clarke) + 3 phase	LINEZT6N		Modelo Clarke hexafásico simétrico (linha transposta)
Transposed lines (Clarke) + 6 phase mutual	LINEZT_6		Modelo Clarke duplo circuito trifásico com acoplamento mútuo simétrico (linha transposta)
Transposed lines(Clarke) + 9phase	LINEZT_9		Modelo Clarke enneafásico simétrico (linha transposta)

8.3.3 - LINEZT_6

Este modelo assume que os dois circuitos trifásicos são individuais com transposição de fases, no entanto possuem um circuito de acoplamento de sequência zero comum.

Esta representação de circuito trifásico duplo é preferível quando os dois circuitos estão fisicamente separados, como mostra a Figura 8.17. Se os dois circuitos estiverem na mesma torre como mostra a Figura 8.16 é indicado a utilização do modelo LINEZT6N. De toda forma, é questionável se, realmente, existe vantagem de um modelo com relação ao outro (2).

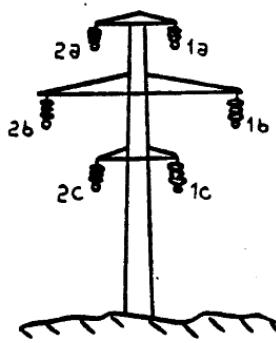


Figura 8.16—Círculo trifásico duplo na mesma torre

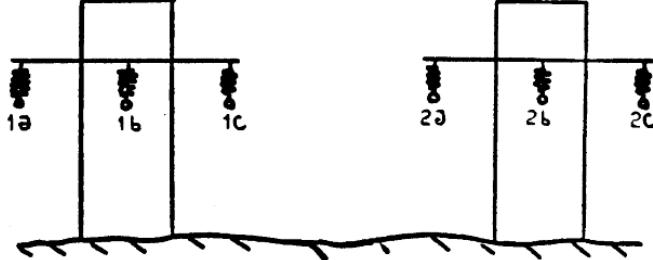


Figura 8.17—Círculo trifásico duplo cada um em uma torre

8.3.3.1 - Parâmetros no programa ATP

R: Resistência em ohms por unidade de comprimento ($\Omega/\text{comprimento}$).

R/I+: Resistência de sequência positiva.

R/I0: Resistência de sequência zero.

A+: Indutância de sequência positiva em [mH/comprimento] se $\text{ILINE}=0$.

A0: Indutância de sequência zero em [mH/comprimento] se $\text{ILINE}=0$.

B+: Capacitância de sequência positiva em [$\mu\text{F/comprimento}$] se $\text{ILINE}=0$

B0: Capacitância de sequência zero em [$\mu\text{F/comprimento}$] se $\text{ILINE}=0$.

ILINE: Indicador do tipo de especificação para os parâmetros A e B.



L (*length*-comprimento): Comprimento da linha.

IPUNCH: Indicador do tipo de modelagem.

$$\text{IPUNCH} = 0$$

Para LT com resistência concentrada no meio e nas extremidades (usual).

$$\text{IPUNCH} = 1$$

LT sem distorções.

IPOSE: Indicador do tipo de posição da linha.

$$\text{IPOSE} = 0$$

Usado para LT perfeitamente transpostas.

$$\text{IPOSE} = N$$

Usado para LT não transpostas, sendo N o numero de ‘fases’.

8.3.4 - MODELO KCLee (*Untransposed Lines* - Linhas sem transposição)

Modelo de resistência concentrada com matriz de transformação modal complexa.

Os parâmetros para estes modelos de linhas assimétricas são normalmente gerados fora do ATP. São modelos de linhas de parâmetros distribuídos, sem transposição e resistência concentrada com uma matriz de transformação modal complexa (referida como *KCLee-type* no ATP Rule-Book).

São disponibilizados os sistemas bi e trifásicos:

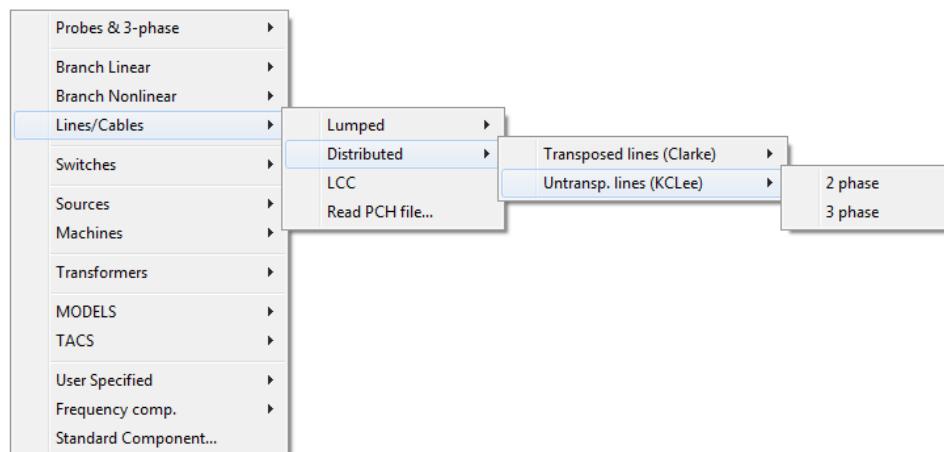




Figura 8.18 - Seleção do modelo Clarke no ATPDraw

Tabela 4 - Modelos II disponibilizados no ATPDraw

Elemento	Nome	Ícone	Descrição
Untransposed lines (KCLee) + 1 phase	LINEZU_2		Modelo KCLee bifásico (linha sem transposição com matriz de transformação complexa)
Untransposed lines (KCLee)+ 2 phase	LINEZU_3		Modelo KCLee trifásico (linha sem transposição com matriz de transformação complexa)

8.3.4.1 - Parâmetros no programa ATP

Este modelo de LT é composto daqueles mesmos parâmetros do modelo de Clarke somados a outros parâmetros que definem a parte real e imaginária de cada elemento de sua matriz de transformação modal.

Para o circuito trifásico a matriz de transformação modal é dada por:

$$Q = \begin{pmatrix} reQ11 + imQ11 & reQ12 + imQ12 & reQ13 + imQ13 \\ reQ21 + imQ21 & reQ22 + imQ22 & reQ23 + imQ23 \\ reQ31 + imQ31 & reQ32 + imQ32 & reQ33 + imQ33 \end{pmatrix}$$

8.3.5 – LCC

O elemento LCC no ATPDraw baseia-se nas seguintes rotinas do ATP-EMTP: LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS e CABLE PARAMETERS. O usuário deve primeiro descrever a geometria do sistema e as constantes dos materiais. O ATPDraw então executa uma rotina para processar este caso de dados e converte a saída, arquivo PUNCH (.PCH) contendo o modelo elétrico da linha ou cabo, em formato de arquivo LIB.

A ideia no ATPDraw é facilitar a modelagem para o usuário de forma que ele tenha que se preocupar apenas com os dados geométricos e o tipo de material das linhas ou cabos. Assim o

componente LCC a partir destes dados calcula os parâmetros elétricos das linhas e cabos, como resistência, indutância, capacidade e/ou condutância.

Para usar o módulo de parametrização de uma linha ou cabo no ATPDraw, o usuário deve primeiramente escolher no menu de seleção principal o componente LCC, como mostrado na figura a seguir.

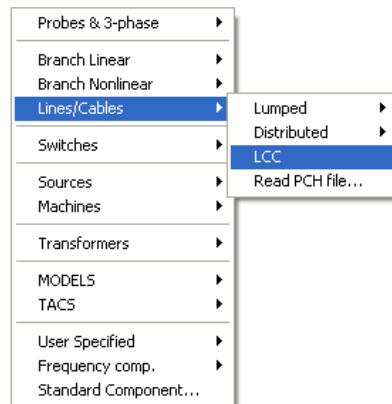


Figura 8.19 – Escolha do componente LCC no ATPDraw

Isto irá exibir um componente na área de montagem para ser conectado ao circuito como qualquer outro componente.



Figura 8.20 – Componente LCC na área de montagem de circuitos do ATPDraw

Clicando sobre o componente LCC duas vezes com o botão esquerdo do mouse vai abrir uma caixa de diálogo de entrada de dados para linhas ou cabos. Esta janela contém duas abas (ou guias), uma para as especificações do modelo (MODEL) e uma para os dados relativos à geometria e materiais (DATA), como mostrado a seguir.

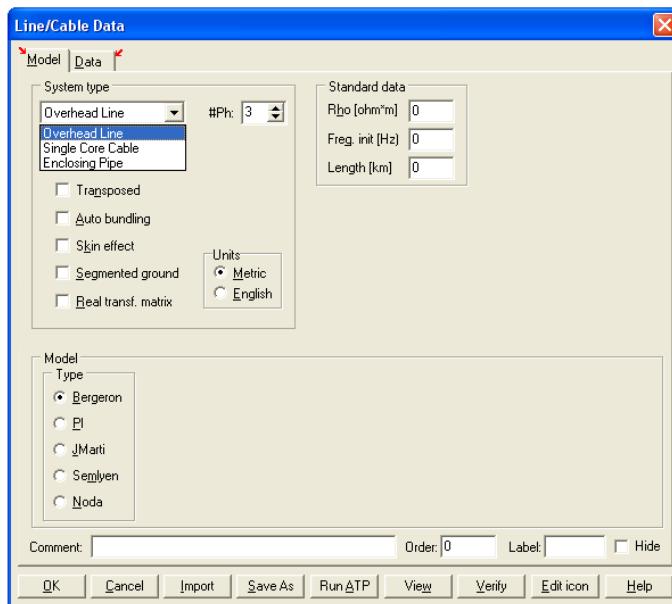


Figura 8.21 - Caixa de diálogo de entrada de dados para linhas e cabos

Existem três tipos de sistemas que poderão ser simulados: *Overhead Line*, *Single Core Cable* e *Enclosing Pipe*. Os parâmetros das duas abas MODEL e DATA serão diferentes em função do tipo de sistema escolhido para ser simulado.

Assim que especificados todos os dados o usuário poderá fechar a janela clicando em OK. Quando o fizer, o usuário será deverá salvar os dados do modelo em arquivo ‘.alc’ (ATPdraw Linha/Cabo). É recomendado que este arquivo seja salvo no diretório /LCC.

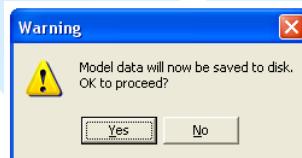


Figura 8.22

O usuário também é questionado se o ATP deve gerar o arquivo PUNCH ‘.pch’.

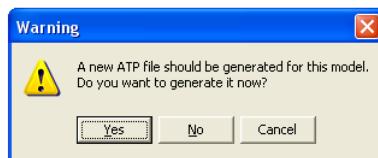


Figura 8.23

Se o usuário responder NÃO, o arquivo LIB para o modelo LCC não será gerado no ATPDraw impedindo assim a simulação. Veja a figura a seguir.

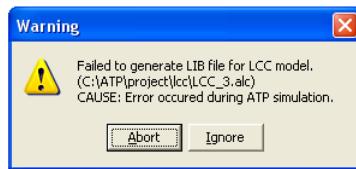


Figura 8.24

Se o usuário responder SIM, O arquivo de saída PUNCH (.pch) é transferido para uma base de dados pelo ATP após o cálculo bem sucedido dos parâmetros da linha. O arquivo LIB necessário para construir o arquivo final do ATP recebe o mesmo nome que o arquivo ‘.alc’ (com extensão .lib) e é armazenado na mesma pasta. O usuário poderá então, executar o ATP (*Run ATP*), armazenar os dados em um arquivo ‘.alc’ diferente (*Save As*) ou importar dados de outro arquivo ‘.alc’ (*Import*).

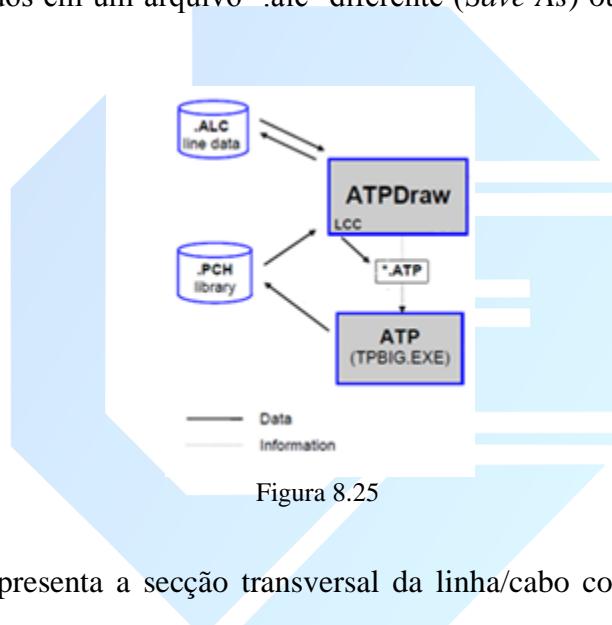


Figura 8.25

O botão *View* apresenta a secção transversal da linha/cabo como mostrado na figura a seguir.

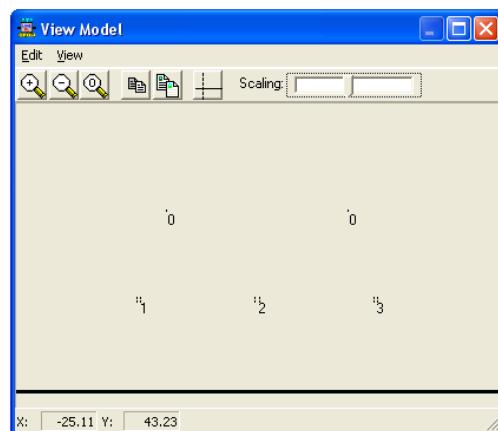


Figura 8.26



No caso de linhas aéreas o número das fases é exibido (o número zero é utilizado para o cabo guarda e os números de 1 a 3 para cada uma das fases). Para os cabos, os condutores aterrados são desenhados com uma cor cinza, enquanto os condutores não aterrados são negros. A linha horizontal grossa representa a superfície do solo. O botão *Verify* da caixa de diálogo LCC ajuda o usuário a obter uma visão geral do desempenho do modelo no domínio da frequência.

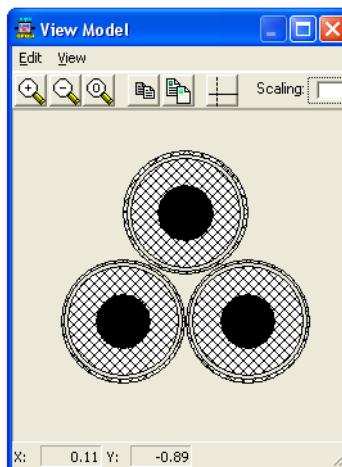


Figura 8.27

Ao criar uma linha/cabo com o modelo *Noda* o programa Armafit é executado automaticamente para criar o arquivo ‘.lib’. O comando Armafit é especificado em *Tools/Options/Preferences*. O arquivo runAF.bat está integrado ao ATPDraw. O formato dos dados do modelo Noda não permite a gravação completa do arquivo lib no arquivo do ATP. Como resultado, o arquivo ‘.alc’ deve ser armazenado no mesmo diretório do arquivo ‘.atp’ ou o arquivo ‘.lib’ deve ser movido para este diretório manualmente. Para todos os outros modelos de linhas/cabos a opção *\$Prefix/\$Suffix* deve ser desativada ou os arquivos ‘.lib’ devem ser movidos para o diretório /USP.

ATPDraw suporta os seguintes modelos elétricos: *Bergeron* (KCLee e Clarke), *PI*, *JMarti*, *Noda*, e *Semlyen*. É simples para alternar entre diferentes modelos. Em tipo de sistema o usuário pode selecionar entre ***Overhead Line*** (linha aérea) e ***Single Core Cable*** (cabo unipolar) ou ***Enclosing Pipe*** (cabo multipolar).

Um cabo unipolar é um cabo constituído por um único condutor isolado e dotado, no mínimo, de cobertura.



Um cabo multipolar é constituído por dois ou mais condutores isolados e dotado, no mínimo, de cobertura. Os condutores isolados constituintes dos cabos unipolares e multipolares são chamados de veias. Os cabos multipolares contendo 2, 3 e 4 veias são chamados, respectivamente, de cabos bipolares, tripolares e tetrapolares.

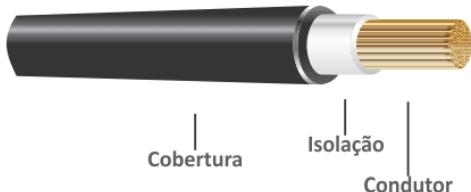


Figura 8.28 – Cabo Unipolar

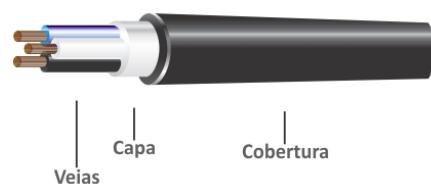


Figura 8.29 - Cabo Tripolar

A tabela abaixo mostra todas as opções par tipo de sistema e modelo que o usuário poderá escolher na caixa de diálogo *Line/Cable*.

Tabela 5 - Tipos de sistemas e modelos na caixa de diálogo *Line/Cable*

System type:	Model type:
Overhead Line: LINE CONSTANTS	Bergeron: Parâmetros constantes (KCLee ou Clarke).
Single Core Cable: CABLE PARAMETERS CABLE CONSTANTS	PI: Modelo PI (linhas curtas). JMartí: Modelo dependente da frequência com matriz de transformação constante.
Enclosing Pipe: CABLE PARAMETERS CABLE CONSTANTS	Noda: Modelo dependente da frequência (não aplicável a CABLE CONSTANTS) Semlyen: Modelo de preenchimento simples dependente da frequência (não aplicável a CABLE PARAMETERS)

A caixa de diálogo *Line/Cable Data* consiste de três páginas: página de modelos, página de dados das linhas e página de cabos (embora apenas dois destas são visíveis simultaneamente). Os nomes de parâmetros usados no componente LCC são idênticos àqueles dos capítulos XXI e XXIII para LINE CONSTANTS e CABLE CONSTANTS no Rule-book, respectivamente. Na



página modelo, os parâmetros *standard data* se referem a dados comuns para qualquer tipo de linha e cabo, são eles:

Standard data	
Rho [ohm·m]	50
Freq. init [Hz]	60
Length [km]	100

Figura 8.30 – Dados comuns para todos os modelos de linhas e cabos

- **Rho:** Resistividade do solo em ohms para uma terra homogênea (Teoria de Carson).
- **Freq.** Frequência em que os parâmetros da linha serão calculados (*Bergeron* e PI) ou a menor frequência (*JMarti*, *Noda* e *Semlyen*) para cálculo dos parâmetros.
- **Comprimento:** Comprimento das linhas aéreas em [km] ou [milhas] e dos cabos em metros [m].

8.3.5.1 - Páginas de configuração de modelo e dados de linhas aéreas

Para as linhas de transmissão as configurações do tipo de sistema (*System type*) são as seguintes:

- **Transposed:** A linha aérea é tratada como transposta se o botão estiver marcado. Se estiver desmarcado, será considerado o modelo PI.
- **Auto bundling:** Quando marcado permite o recurso de agregação automática.
- **Skin effect:** Se o botão for marcado o efeito pelicular será considerado.
- **Metric/English:** Alternar entre os sistemas de unidades métricas e Ingles.
- **Segmented ground:** Se o botão estiver desmarcado, os cabos (de aterramento) serão assumidos como continuamente aterrados.
- **Real trans. matrix:** Se marcado a matriz de transformação é assumida como sendo real. Os auto-vetores da matriz de transformação são rotacionados de forma a desconsiderar a parte imaginária da matriz. Recomendado para simulações em regime transitório. Caso



contrário, uma matriz de transformação completa complexa será usada. Recomendado para análise de regime permanente.

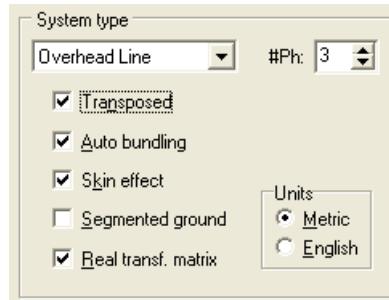


Figura 8.31

- **#Ph:** Define a quantidade de fases do circuito.

8.3.5.2 - Configurações do tipo de modelo

- **Bergeron:** Não requer configurações adicionais.
- **PI:** Para modelagem de linhas (curtas) com o modelo PI nominal. Configurações opcionais:
 - **Printed output:** Se for selecionado a capacidade shunt, a matriz série de impedância/admitância do sistema não reduzido, e/ou do sistema equivalente dos condutores de fase (depois da eliminação dos fios de aterramento e do agrupamento dos condutores), e/ou das componentes simétricas serão calculadas.
 - **ω [C] print out:** Seleção entre matriz de capacidade e de susceptância.

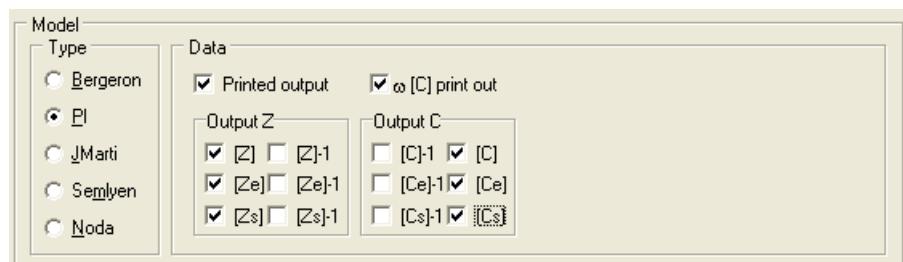


Figura 8.32 – Configurações opcionais para o modelo PI

- **JMarti:** O modelo de linha JMarti é montado em uma faixa de frequência que se inicia a partir da frequência inicial em *Standard data* até um limite de frequência máxima especificada pelos parâmetros (obrigatórios) *Decades* e *Points/Dec*. O modelo também requer uma frequência (*Freq. Matrix [Hz]*) onde a matriz de transformação é calculada e uma frequência (*Freq. SS [Hz]*) para o cálculo da condição de regime permanente. O parâmetro *Freq. Matrix [Hz]* deve ser selecionado de acordo com a componente de frequência dominante do estudo de regime permanente. O modelo JMarti precisa em alguns casos de ajustar os dados padrão no campo *Model fitting data*, que podem ser visualizados desmarcando a caixa de seleção *Use default fitting*. Para mais detalhes o Rule Book deve ser consultado.

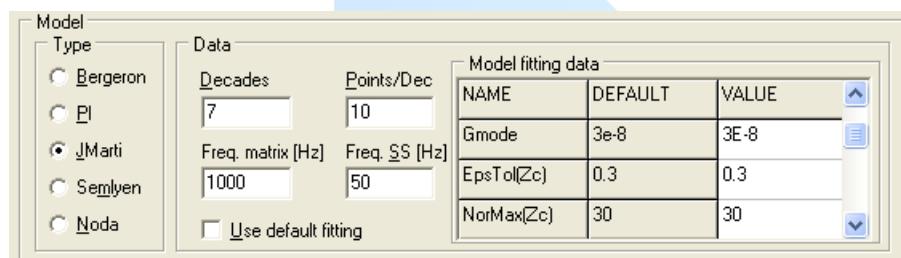


Figura 8.33 – Configurações dos parâmetros para um modelo de linha JMarti

O modelo de linha **Noda** é montado em uma faixa de frequência que se inicia a partir da frequência inicial em *Standard data* até um limite de frequência máxima especificada pelos parâmetros *Decades* e *Points/Dec*. O modelo necessita de uma frequência (*Freq. veloc. [Hz]*), onde as velocidades de onda dos modos de propagação naturais são calculadas. Um valor maior do que a maior frequência de digitalização é apropriado. O modelo *Noda* precisa em alguns casos de ajustar os dados padrão no campo *Model fitting data*, que podem ser visualizados desmarcando a caixa de seleção *Use default fitting*. Para mais detalhes o Rule Book deve ser consultado.

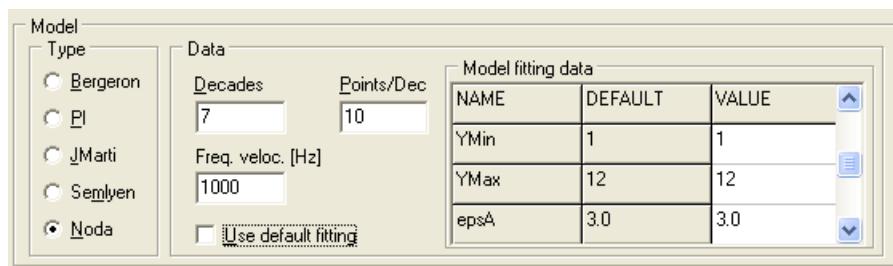


Figura 8.34 – Configurações dos parâmetros para um modelo de linha Noda

Semlyen: O modelo de linha Semlyen é um modelo ajustado simples dependente da frequência. A faixa se inicia a partir da frequência inicial em *Standard data* até um limite de frequência máxima especificada pelos parâmetros *Decades* e *Points/Dec*. O modelo também requer uma frequência (*Freq. Matrix [Hz]*) onde a matriz de transformação é calculada e uma frequência (*Freq. SS [Hz]*) para o cálculo da condição de regime permanente. O parâmetro *Freq. Matrix [Hz]* deve ser selecionado de acordo com a componente de frequência dominante do estudo de regime permanente. O modelo Semlyen precisa em alguns casos de ajustar os dados padrão no campo *Model fitting data*, que podem ser visualizados desmarcando a caixa de seleção *Use default fitting*. Para mais detalhes o Rule Book deve ser consultado.

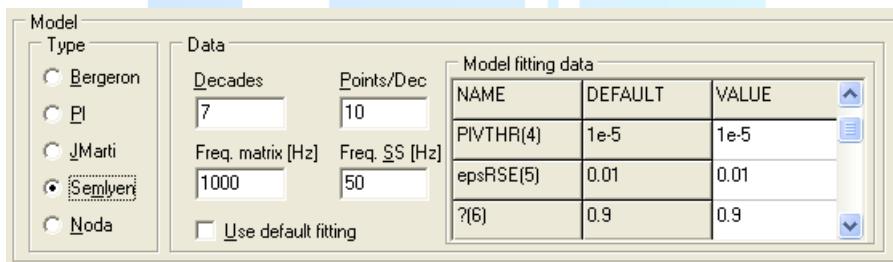


Figura 8.35 - Configurações dos parâmetros para um modelo de linha Semlyen

8.3.5.3 - Configurações da página de dados das linhas

A página de dados contém campos de entrada onde o usuário pode especificar os dados geométricos e/ou dados dos materiais das linhas ou cabos. Para as linhas aéreas, o usuário pode especificar o número de cada fase, os raios internos e externos dos condutores, a agregação (NB – número de condutores por fase), e as posições dos condutores, como mostrado na figura a seguir.



#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.7	1.45	0.069	-19.5	25.1	10.1	60	45	4
2	2	0.7	1.45	0.069	0	25.1	10.1	60	45	4
3	3	0.7	1.45	0.069	19.5	25.1	10.1	60	45	4
4	0	0.5	0.77	0.44	-15	39.7	24.7	0	0	0
5	0	0.5	0.77	0.44	15	39.7	24.7	0	0	0

Figura 8.36 – Caixa de diálogo de uma linha trifásica com 4 condutores por fase mais dois cabos de guarda⁵.

ATPDraw define o aterramento automaticamente ou dá avisos se as condições de aterramento não coincidirem com o número de fases. Você pode apagar a última linha da tabela em *Delete last row*, ou adicionar uma nova, clicando no comando *Add row*. Linhas dentro da tabela também podem ser excluídas, basta arrastá-la para baixo, usando a seta correspondente, colocando na última linha.

Os parâmetros da tabela acima serão descritos a seguir:

- **Ph.no.:** Número da fase. 0 para cabos de guarda (eliminado na matriz de redução).
- **Rin:** Raio interno do condutor. Considerado somente se o botão de efeito pelicular estiver habilitado. Caso contrário, a coluna Rin é removida e em seu lugar aparece a coluna *React*, onde o usuário especifica a reatância para corrente alternada da linha em ohm/unidade de comprimento.
- **Rout:** Raio externo (cm ou *inch*) do condutor.
- **RESIS:** Resistência DC (corrente contínua) do condutor (ohm/unidade de comprimento) se considerado o efeito pelicular, senão, deve ser informada a resistência AC (corrente alternada) na frequência inicial. Neste último caso o efeito pelicular é considerado.
- **Horiz:** Distância horizontal (m ou pé) a partir do centro do feixe de uma linha de referência escolhida pelo usuário.
- **Vtower:** Altura vertical do feixe na torre (m ou pé).
- **Vmid:** Altura vertical no meio do vão (m ou pé). A altura média do condutor (h) pode ser calculada pela seguinte equação: $h = 2/3 \cdot Vmid + 1/3 \cdot Vtower$.

⁵ O cabo OPGW – *Optical Power Ground Wire* é bastante utilizado. Trata-se de uma cabos de guarda de linha de transmissão aérea com fibras ópticas incorporadas.



- Se a opção Auto bundling em System type estiver habilitada:
- **Separ:** Distância entre os condutores no feixe de cada fase (cm ou polegada)
- **Alpha:** Posição angular de um dos condutores em um feixe, medido no sentido anti-horário a partir da linha horizontal.
- **NB:** Número de condutores em um feixe.

8.3.5.4 - Configurações da página de modelo e dados para sistemas de cabos unipolares

Suporte para CABLE CONSTANTS e CABLE PARAMETERS foi adicionado ao módulo LCC do ATPDraw para dar mais praticidade ao usuário em termos de configuração de um sistema com cabos. CABLE PARAMETERS permite um esquema de aterramento mais flexível, suportado pelo modelo de cabo *Semlyen* em vez do modelo *Noda* e da utilização do modelo PI em cascata. Por outro lado habilitando a opção CABLE CONSTANTS o ATPDraw não suporta capacidade shunt adicional, entrada de condutância e seleção do modelo Noda. CABLE CONSTANTS e CABLE PARAMETERS suportados pelo ATPDraw não se estende para a parte de linhas aéreas e modelo multicamada do solo. Para sistemas do tipo cabo de um único núcleo (cabos coaxiais) os parâmetros de configuração são os seguintes:

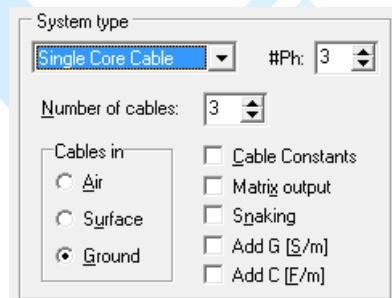


Figura 8.37

- **Cables in:** Selecione se os cabos estão no ar, na superfície do solo ou se são subterrâneos.
- **Number of cables:** Especifica o número de cabos no sistema.
- **Cable constants:** Seleciona entre CABLE CONSTANTS e CABLE PARAMETERS. Se selecionado, a condutância adicional e a opção de capacidade serão desabilitadas e as opções de aterramento na página de dados de cabos (*Cable Data*) serão ativadas. O modelo *Semlyen*



é disponível apenas para CABLE CONSTANTS e o modelo Noda apenas para CABLE PARAMETERS.

- **Matrix output:** Habilite esta opção para mostrar as matrizes de impedância e admitância (R , ωL e ωC).
- **Snaking:** Se habilitado os cabos serão transpostos.
- **Add G:** Este botão habilitado permite entrar com o valor da condutância entre condutores. Não é habilitado para CABLE CONSTANTS.
- **Add C:** Este botão habilitado permite entrar com um valor adicional de capacidade entre condutores. Não é habilitado para CABLE CONSTANTS.

8.3.5.5 - Configurações do tipo de modelo para cabos unipolares

Bergeron, JMarti, Noda e Semlyen: As configurações para os dados e tipo de modelo a ser empregado para cabos unipolares são idênticas àquelas das linhas de transmissão aéreas. Users are warned however, that the frequency dependent models may produce unrealistic results, due to neglecting the frequency dependency of the transformation matrix, which is acceptable in overhead line modeling but not for cables. No entanto, os usuários devem ficar atentos, já que os modelos que permitem variação da frequência podem produzir resultados irrealistas, devido ao negligenciamento da dependência da frequência na matriz de transformação, o qual é aceitável na modelagem de linhas mas não para os cabos.

Se a opção *Cable Constants* for selecionada no campo *System type*, o modelo PI permitirá a entrada de alguns parâmetros adicionais para se ter um sistema com modelos PI em cascata. O tipo *Homogenous* pode ser utilizado em todos esquemas de aterramentos.

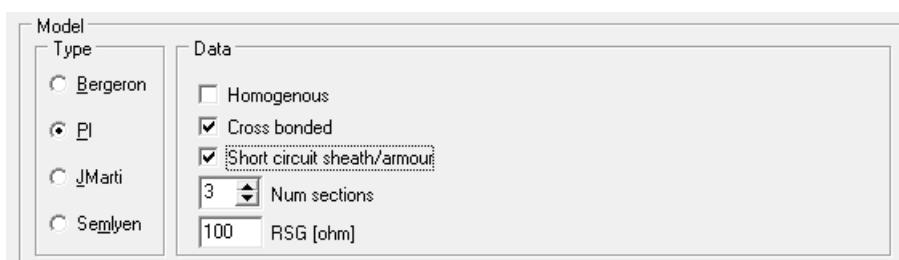


Figura 8.38 – Dados de cabos unipolares para circuitos PI em cascata

8.3.5.6 - Configurações da página de dados para cabos unipolares

A página de dados contém campos de entrada onde o usuário pode especificar os dados geométricos e dos materiais dos cabos. O usuário pode ativar as opções de revestimento (*sheath*) e de armadura (*armadura*) por meio de um único botão. Isto permite definir ainda se haverá um material isolante intermediário e seus parâmetros. O cabo a ser parametrizado pode ser escolhido na página *DATA* utilizando-se das setas ‘para cima’ e ‘para baixo’. O número máximo de cabos é aquele especificado na caixa (*Number of cables*) na página *MODEL*.

Para CABLE PARAMETERS (*Cable Constants* não selecionado) as opções de aterramento são desabilitadas e o número de condutores de aterramento é calculado internamente no ATPDraw com base no número total de condutores no sistema e do número de fases inicialmente definido.

Para CABLE CONSTANTS (*Cable Constants* selecionado) o usuário deve especificar qual condutor é aterrado, verificando os botões de aterramento apropriados na página *Data*. No botão *View* pode ser visualizado que os condutores aterrados são mostrados pela cor cinza e os não aterrados na cor preta.

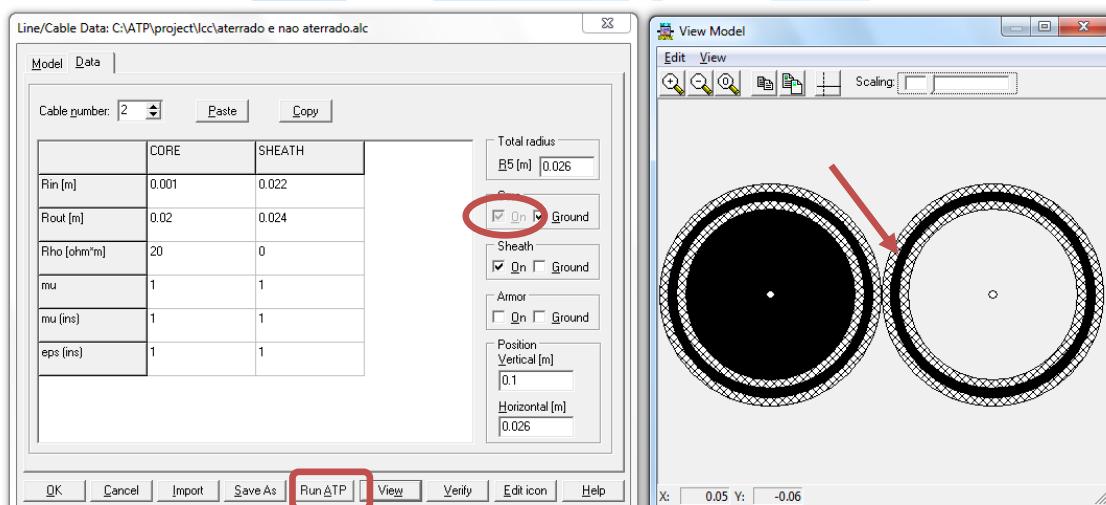


Figura 8.39 – Página de dados de dois cabos unipolares e suas ilustrações esquemáticas

Um aviso aparecerá se um descompasso entre o número de fases e o número de condutores não aterrados for encontrado, como pode ser visto na figura a seguir.

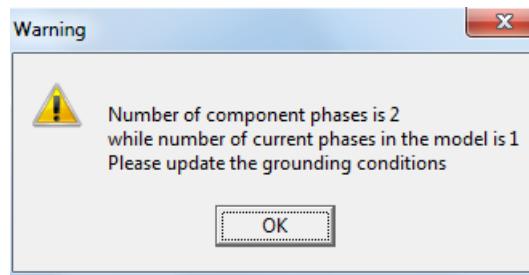


Figura 8.40 – Aviso de erro

Para cada condutor (*CORE*), revestimento (*SHEATH*) e armadura (*ARMOR*) poderão ser especificados os seguintes dados:

- **Rin:** Raio interno do condutor [m].
- **Rout:** Raio externo do condutor [m].
- **Rho:** Resistividade do material do condutor.
- **mu:** Permeabilidade relativa do material do condutor.
- **mu(ins):** Permeabilidade relativa do material isolante em torno do condutor.
- **eps(ins):** Permissividade relativa do material isolante em torno do condutor.
- **Total radius:** Raio total do cabo (isolante externo) [m].
- **Sheath/Armor On:** Botão opcional para acrescentar ao condutor: o revestimento (*SHEATH*) e a armadura (*ARMOR*).
- **Position:** Posição vertical e horizontal relativa à superfície do solo.

A figura a seguir ilustra alguns parâmetros de um cabo unipolar.

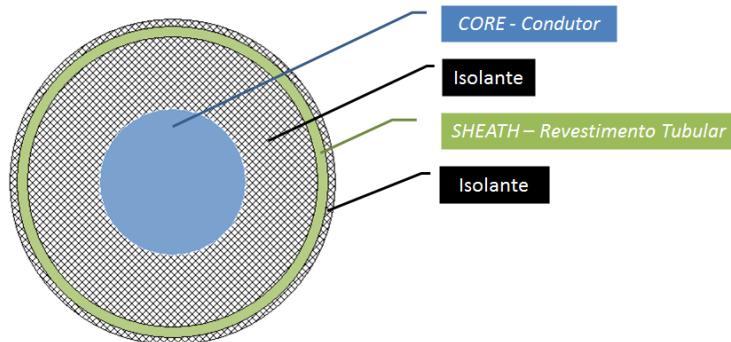


Figura 8.41 – Cabo unipolar

8.3.5.7 - Página de configurações dos dados e modelo para cabos multipolares e coaxiais

Esta seção especifica um sistema de cabo que consiste de um cabo coaxial com um único núcleo, delimitado por um tubo (referido como Classe-B no *Rule Book*). O sistema de cabo pode ser subterrâneo ou no ar. As definições dos tipos de sistema são idênticas às da Classe-A (cabos unipolares). Quando o botão *Cable Constants* está ativado a condutância shunt e a capacitância adicional são desativadas e o botão *Ground* é apresentado para saber se o tubo será aterrado ou não. A transposição dos cabos dentro do tubo está disponível através do botão *Snaking*. A opção de se trabalhar com circuitos PI em cascata pode ser especificada como no caso dos cabos unipolares. Para cabos utilizando o tubo como delimitador, os dados desta tubulação são necessários:

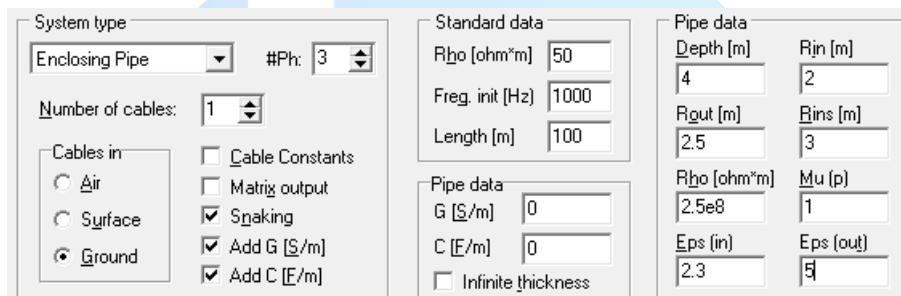


Figura 8.42 – Configuração do tipo de sistema e dados do tubo para um cabo multipolar

- **Depth:** Distância positiva em metros [m] entre o centro do tubo e a superfície do solo.
- **Rin:** Raio interno do tubo em metros [m].
- **Rout:** Raio externo do tubo em metros [m].
- **Rins:** Raio externo do isolante externo (raio total do cabo) em metros [m].
- **Rho:** Resistividade do material do tubo.
- **Mu:** Permeabilidade relative do material do tubo.
- **Eps(in):** Permeabilidade relativa do material do isolante interno (entre os cabos e o tubo).
- **Eps(out):** Permissividade relativa do isolante externo (em torno do tubo).
- **G e C:** Condutância shunt e capacitância shunt adicional entre os cabos e o tubo.
- **Infinite thickness:** Tubo de espessura ‘infinita’.

Os campos de entrada na página *Data* para cabos multipolares (*Enclosing Pipe type cable systems*) são idênticos àqueles dos cabos unipolares (*Single Core Cable*). A única diferença é a interpretação do seguinte parâmetro:

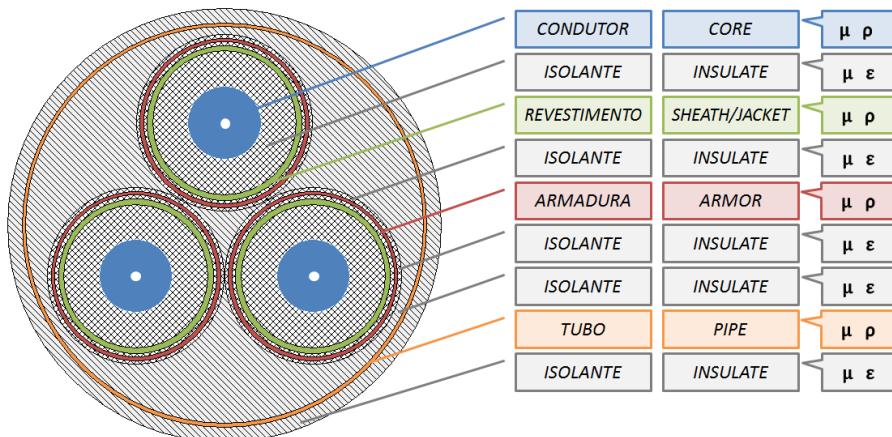
- **Position:** Posição relativa do centro do tubo (*Pipe*) em coordenadas polares (distância e ângulo).

A figura a seguir ilustra o modelo de um cabo multipolar completo gerado no ATPDraw. Na 1^a e 2^a colunas são apresentados os nomes, em português e em inglês respectivamente, para cada parte constituinte do cabo e a terceira coluna (mais a direita) mostra os parâmetros a serem fornecidos para cada uma destas partes.

Onde:

- ρ : resistividade do material;
 μ : permeabilidade relativa;
 ϵ : permissividade relativa;

Para mais informações relativas a estas grandezas supracitadas, veja o Anexo 2.



O revestimento na figura também é conhecido como bainha de estanqueidade. Nos Estados Unidos o termo '*sheath*' é utilizado para invólucros/revestimentos metálicos e o termo '*jacket*' para aqueles não metálicos.

A figura a seguir ilustra um exemplo real de cabo tripolar.



Figura 8.43 – Ilustração de um cabo tripolar real

Dos materiais empregados na fabricação de condutores, geralmente os mais utilizados são o cobre e o alumínio. Como material dielétrico o XLPE⁶ é bastante utilizado por ter excelentes propriedades físicas e químicas, tais como baixa permissividade e fator de perdas. Para o revestimento, normalmente, usa-se PVC⁷. E para a armadura, aço.

No anexo 1 são apresentadas informações de cabos utilizados nas linhas de transmissão da ELETROBRAS FURNAS.

8.3.6 - Read PCH files...

O pacote de simulação ATP-EMTP consiste em vários programas separados que se comunicam uns com os outros através de ficheiros em disco: isto é, as saídas dos pré-processadores são utilizadas como entrada para o TPBIG.EXE, o programa principal (ATP), enquanto que o produto da simulação pode ser usado como entrada para os programas de plotagem. “Desta forma, este módulo permite a leitura de arquivos do tipo “punch”, que são aqueles com extensão “.pch” para criar automaticamente objetos no ATPDraw (arquivos “.sup” e “.lib”).

⁶Polietileno reticulado XLPE é um polímero semicristalino.

⁷ O policloreto de polivinila (também conhecido como cloreto de vinila ou policloreto de vinil; nome IUPAC: policloroeteno) é um material termoplástico rígido, sintético e derivado do petróleo.

O ATPDraw reconhece os seguintes formatos de linhas: modelo PI, *KCLee*, *Clarke*, *Semlyen* e *JMarti*. Na figura a seguir é mostrado a interação do ATPDraw com os demais programas do pacote ATP-EMTP.

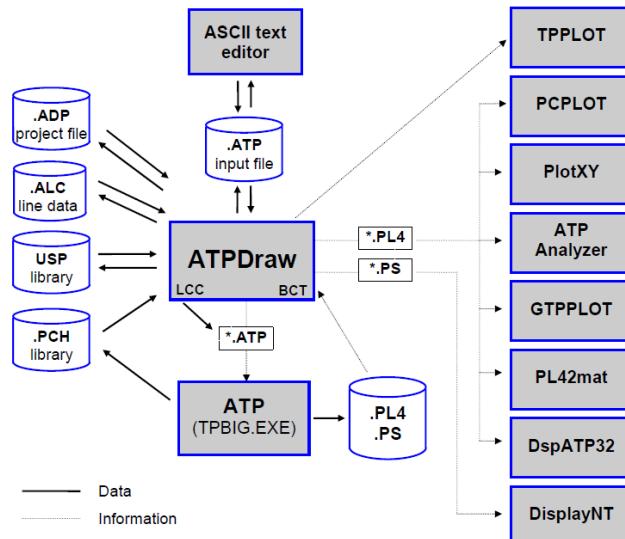


Figura 8.44 – Intereração entre o ATPDraw com os demais programas do pacote ATP-EMTP

8.4 - EXEMPLO PRÁTICO

A proposta deste exercício é de apresentar um estudo sobre o comportamento da tensão, durante o processo de energização de uma linha de transmissão. A sobretensão deverá ser analisada na cadeia de isoladores no meio e no final da linha.

8.4.1 - Dados da torre de transmissão para simulação

O nível básico de isolação da cadeia de isoladores (NBI) considerado é 190 kV. Portanto, as sobretensões no meio e no final da linha não poderão ultrapassar esse limite. A ultrapassagem do NBI causará *flashover*, o que provocará o desligamento da linha.

A energização da linha considerou um disjuntor que atende a dois critérios:



I – energização direta;

II – energização com resistor de pré-inserção;

A linha de transmissão possui 200 km de comprimento e foi fabricada para operar em tensão nominal igual a 138 kV, cujas características geométricas e elétricas da torre de transmissão padrão são apresentadas na figura e tabela a seguir:

Tabela 8.6 - Características dos condutores da linha de transmissão

Condutores	Fase	Pára-Raios
Tipo	Grosbeak	HS 3/8"
Diâmetro	2,5146 cm	0,9525 cm
Altura da flecha	Fase A 11,360 m Fase B 7,585 m Fase C 9,500 m	17,800 m
Resistência Elétrica a 70 °C	0,0913 ohm/km	3,913 ohm/km

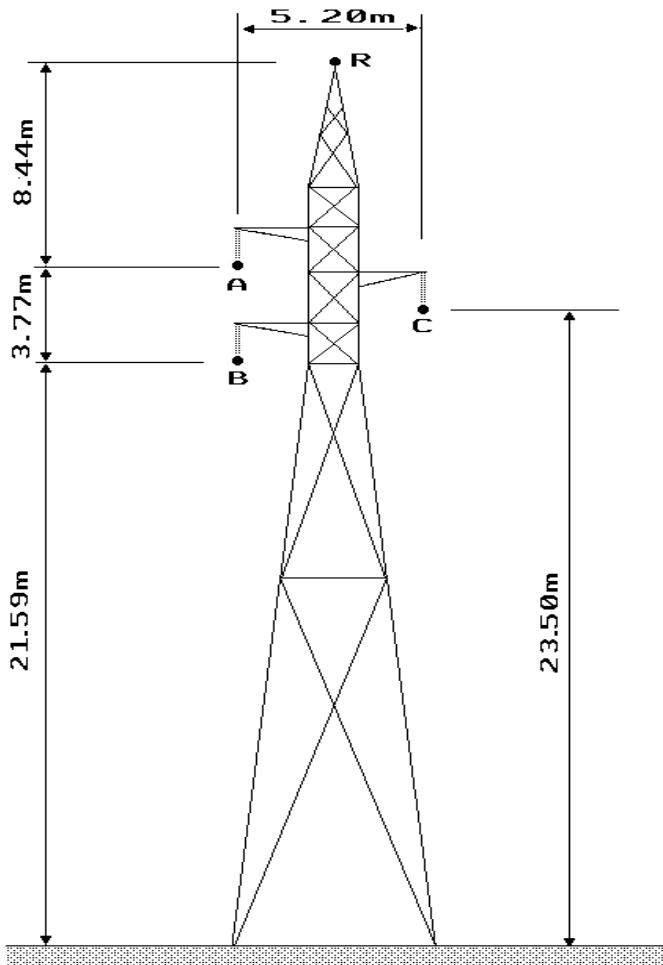


Figura 8.45 – Torre da linha de transmissão de 138 kV

8.4.2 - Parâmetros do circuito

Fonte de tensão

Será utilizada uma fonte de tensão alternada, trifásica e cossenoidal. Seus parâmetros são apresentados a seguir:

$$\text{Amplitude (tensão de pico fase-neutro): } 138000 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 112677 \text{ V.}$$

Frequência: **60 Hz**.

Linha de transmissão

O modelo do ATPDraw utilizado para a parametrização da linha de transmissão é o *Line/Cable Constant – LCC*. Para todos os casos o modelo de parâmetros distribuídos é baseado no método de *Bergeron*. O efeito pelicular nos cabos foi considerado em todas simulações. O



modelo simulado é composto por quatro cabos, sendo três fases e um cabo de proteção (cabo guarda), de acordo com os dados da

Tabela 8.6. A LT foi representada por quatro modelos LCC idênticos, sendo cada um representante de $\frac{1}{4}$ da linha. A parametrização de cada uma dessas 4 partes é apresentada nas duas próximas figuras.

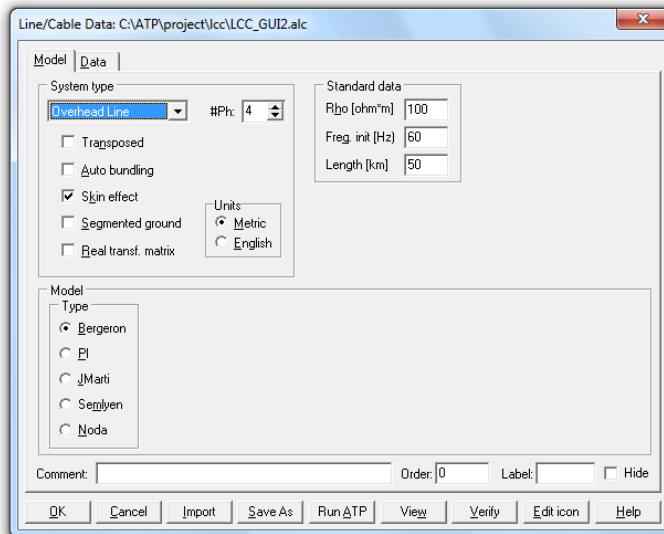


Figura 8.46 – Configuração da página modelo do sistema

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.2573	0.0913	0	25.36	11.36
2	2	0	1.2573	0.0913	0	21.59	7.585
3	3	0	1.2573	0.0913	5.2	23.5	9.5
4	4	0	0.47625	3.913	2.6	33.8	17.8

Buttons at the bottom: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move up/down, OK, Cancel, Import, Save As, Run ATP, View, Verify, Edit icon, Help.

Figura 8.47 - Configuração da página de dados do sistema

8.4.3 - Torres de transmissão

Cada torre foi representada por uma resistência de valor típico 10Ω .

8.4.4 - Energização direta

O circuito elétrico simulado no ATP é apresentado na figura a seguir.

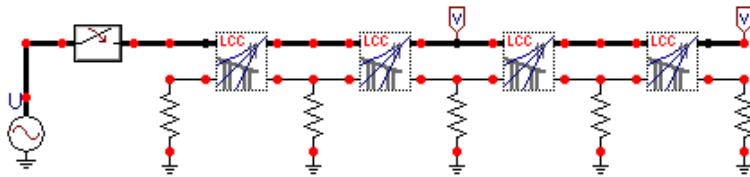


Figura 8.48 – Modelo simulado da LT

As tensões das três fases no meio da LT são mostradas na figura a seguir.

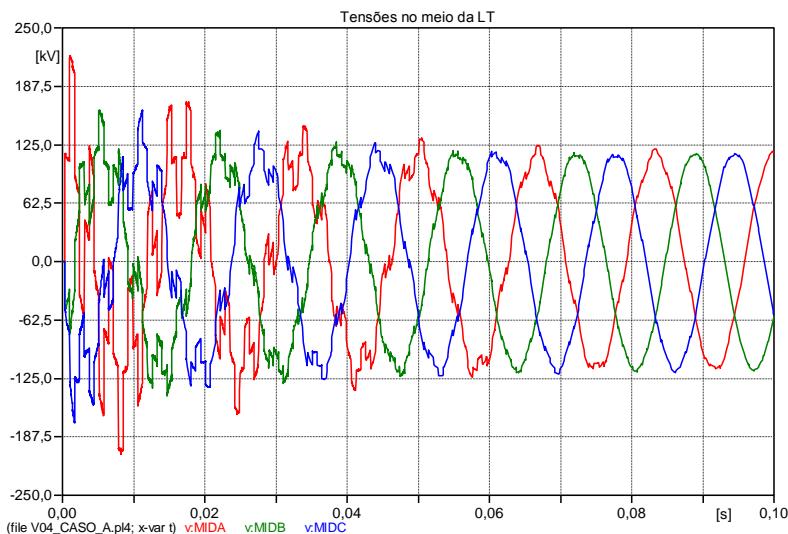


Figura 8.49 – Tensões no meio da LT

Já as tensões no final da LT podem ser visualizadas na próxima figura.

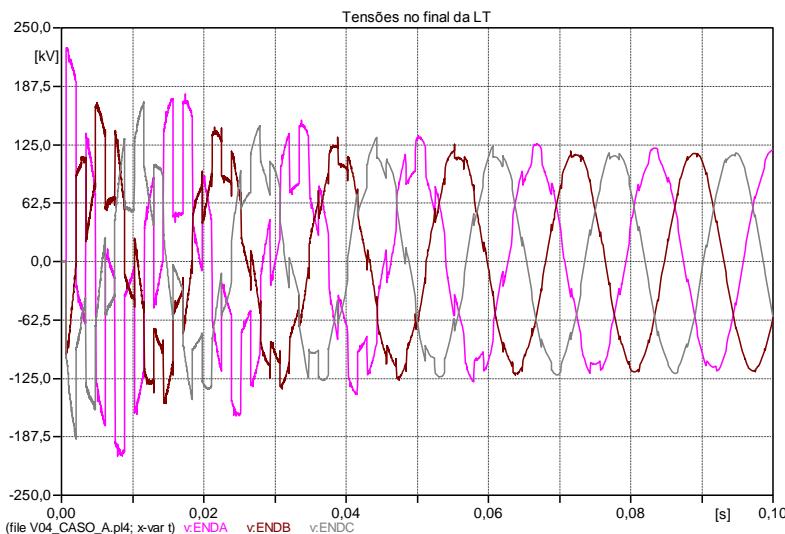


Figura 8.50 – Tensões no final da LT

Verifica-se que as tensões no final da LT têm amplitudes pouco maiores que aquelas no meio. Nota-se também que para valores de tempo próximos de 0,1 segundo o transitório é praticamente inexistente.

Analisando os picos de tensão constatam-se valores de 220 kV para a tensão no meio da LT e quase 230 kV no final da mesma, o que corresponde a sobretensões de 2pu. Portanto, nestas condições a LT não poderá ser energizada visto que haveria ultrapassagem do NBI (190kV) causando *flashover*, o que provocaria o desligamento da linha. Como solução poderia fazer uso de resistores de pré-inserção para mitigar os transitórios durante a energização.

8.4 - ANEXO 1

Informações de cabos utilizados nas linhas de transmissão da ELETROBRAS FURNAS

Cabos Condutores

Os cabos utilizados nas LTs são formados por fios encordoados, em camadas concêntricas em torno de um fio central.

- Tipos de Cabos Condutores Usados em Linhas de Transmissão

Cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA)

Compostos de uma ou mais camadas de fios de alumínio encordoados em torno de um fio ou cabo de aço, denominado alma. A função da alma de aço é aumentar a resistência mecânica do cabo.

Cabos de Alumínio-Liga (CAL)

Constituídos por fios de alumínio-liga. Estes cabos possuem resistência mecânica superior aos Cabos de Alumínio (CA).

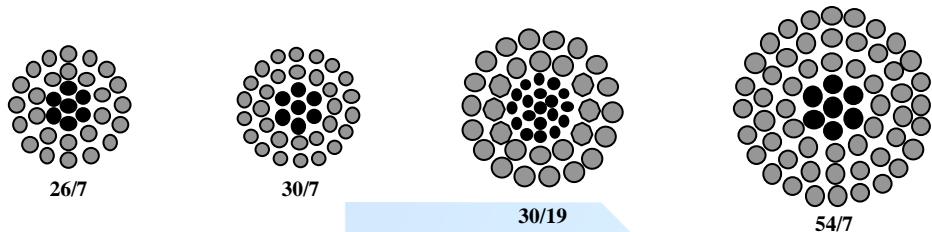


Figura 8.51 - Formação alumínio/aço

Cabos Para-raios

Os materiais usados nos cabos para-raios, em geral são aço, alumínio e alumínio-liga. São os seguintes tipos de cabos para-raios:

Cabos de aço galvanizado - composto de fios de aço galvanizado encordoados, de alta ou extra alta resistência mecânica.

Cabos CAA - compostos de uma ou mais camadas de fios de alumínio encordoados em torno de um fio ou cabo de aço denominado alma. São utilizados quando a LT apresenta elevada corrente de curto-circuito.

Cabos OPGW (Optical Ground Wire) - Os cabos OPGW são constituídos por fios de alumínio-liga e/ou aço alumínio, encordoados em torno de um núcleo onde se encontram as fibras ópticas. As fibras ópticas permitem a transmissão de dados por meio digital, aumentando a confiabilidade e facilitando o gerenciamento do sistema de transmissão.

8.5 - ANEXO 2

Teoria de parâmetros de cabos

Antes de adentrar na modelagem de cabos serão explanados alguns conceitos correlacionados.



Os materiais constituintes dos cabos podem ser definidos por seus parâmetros constitutivos: **permeabilidade** μ (*Mu*), **permisividade** ϵ (*Epsilon*) e **condutividade** σ (*Sigma*). Este último pode ser determinado pelo inverso da resistividade ρ (*Rho*).

Permeabilidade

A permeabilidade dos materiais magnéticos está associada aos efeitos indutivos e aos campos magnéticos.

Em sistemas onde a frequência é maior que zero, 60 Hz por exemplo, existe corrente elétrica, definida pela variação de carga no tempo, e consequentemente energia armazenada em campos magnéticos, confirmando portanto a existência do efeito indutivo. A permeabilidade magnética quantifica a facilidade com que as linhas de campo magnético podem atravessar um dado material. A permeabilidade pode ser expressa por:

$$\mu = L \cdot \frac{l}{A}$$

Onde:

μ : permeabilidade do material magnético [H/m];

L : indutância em *henrys* [H];

l : comprimento em metros [m];

A : área da secção transversal em metros quadrados [m²].

Ou ainda:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Onde:

μ : permeabilidade do material magnético;

μ_r : permeabilidade relativa;

μ_0 : permeabilidade do vácuo⁸.

Permissividade

A permissividade descreve os materiais dielétricos usados, por exemplo, como isolantes nos cabos. A permissividade é determinada pela habilidade de um material polarizar-se em

⁸ No Sistema Internacional de Unidades, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].



resposta a um campo elétrico aplicado e, dessa forma, cancelar parcialmente o campo dentro do material. Ela pode ser expressa por:

$$\epsilon = C \cdot \frac{l}{A}$$

Onde:

ϵ : permissividade do material magnético [F/m];

C : capacidade em *farads* [F];

l : comprimento em metros [m];

A : área da seção transversal em metros quadrados [m^2].

Ou ainda:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

Onde:

ϵ : permissividade do material magnético;

ϵ_r : permissividade relativa ou *constante dielétrica*;

ϵ_0 : permissividade do vácuo⁹.

Todos os dielétricos são de alguma maneira meios com perdas. Esta natureza de perdas pode ser atribuída à condutividade finita, à perda de polarização ou a combinação das duas. Com condutividade finita, o campo elétrico produz uma corrente de fuga, o que resulta em dissipação de energia e assim atenuação na potência transmitida. Este mecanismo de perda é proporcional à frequência.

Condutividade

A condutividade se relaciona à habilidade do material em conduzir corrente. A unidade de condutividade é frequentemente expressa em termos de siemens por metro [S/m], ou pelo termo equivalente [$1/\Omega\text{m}$] e, menos comumente, mhos por metro [G/m]. No entanto, no ATPDraw, deve ser fornecida a resistividade. Assim, há de se calcular o inverso da condutividade para a correta parametrização de cabos no software supracitado. Sua unidade é ohms por metro [Ω/m]:

⁹ No Sistema Internacional de Unidades, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} [\text{F}/\text{m}] \approx 10^{-9}/36\pi [\text{F}/\text{m}]$.



$$\sigma = 1/\rho$$

Onde:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$

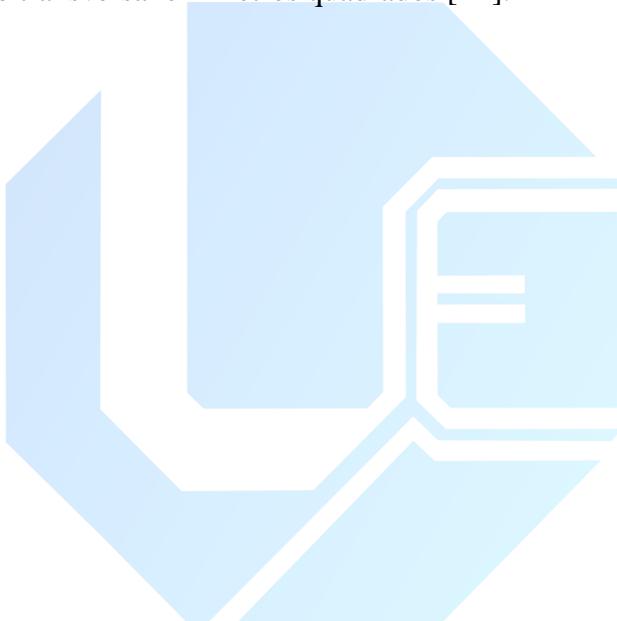
σ : condutividade do material magnético [S/m];

ρ : resistividade do material magnético [Ω m];

R : resistência em ohms [Ω];

l : comprimento em metros [m];

A : área da secção transversal em metros quadrados [m^2].



9 - SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO COMPLETO NO ATP

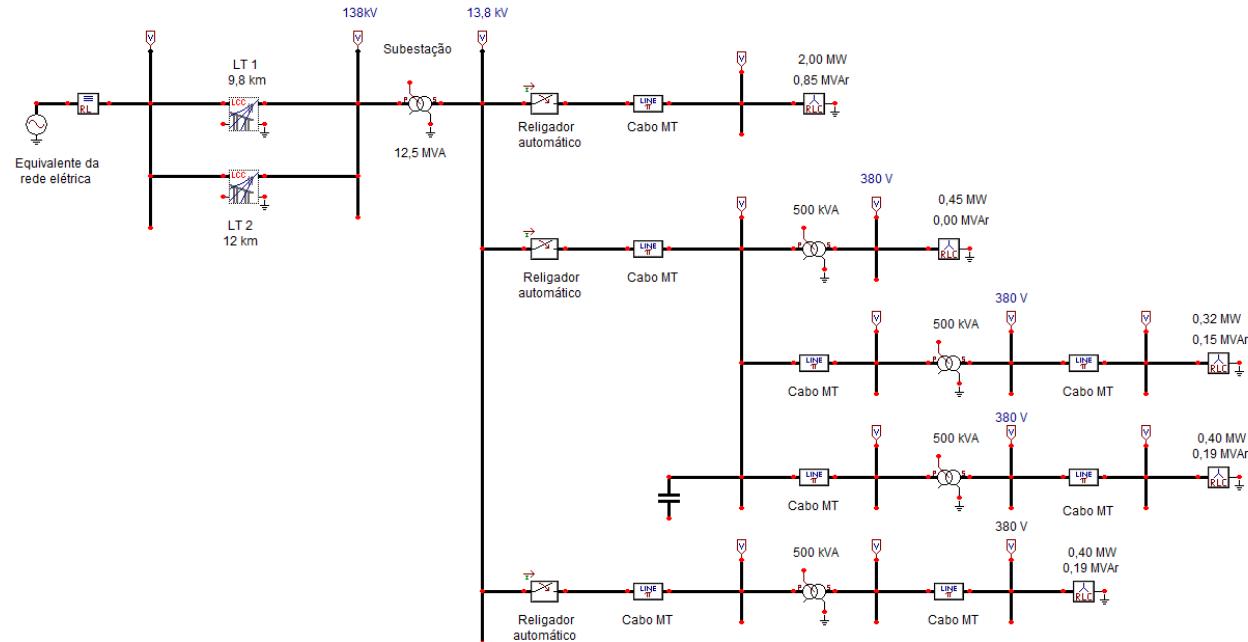


Figura 9.1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico no ATPDraw

9.1 - Introdução

Neste item, será realizada a modelagem e simulação de um sistema elétrico típico, o qual integra todos os componentes discutidos nos tópicos anteriores deste curso. A Figura apresenta o diagrama unifilar da rede elétrica a ser analisada, a qual é parte constituinte de um sistema de distribuição de energia real.

9.1.1 - Dados do sistema elétrico

A seguir, são fornecidos os parâmetros dos elementos componentes do sistema elétrico em análise.

Equivalente da rede elétrica: A Tabela 9.7 apresenta os dados do equivalente da rede elétrica ser simulado.



Tabela 9.7 - Dados do equivalente da rede elétrica

Nível de curto circuito (MVA)	1346
Ângulo do nível de curto circuito (graus)	74,70
Tensão nominal (kV)	138

Transformadores trifásicos: A Tabela 9.8 apresenta os dados nominais dos transformadores presentes no sistema elétrico em análise. Adicionalmente, a Tabela 9.9 apresenta a respectiva característica de saturação da chapa de aço silício utilizada na construção do núcleo de transformador.

Tabela 9.8 - Parâmetros dos transformadores

Transformador	Transformador 1*	Transformador de distribuição
Potência nominal	12,5 MVA	500 kVA
Tensão	138/13,8 kV	13,8/0,38 kV
Conexão	Δ/Y	Δ/Y
Z	6 %	5 %
Frequência	60 Hz	60 Hz

* Este transformador deverá ser modelado através de um banco de transformadores monofásicos.

Tabela 9.9 - Característica de saturação do núcleo do transformador 1

Fluxo magnético (H) (A/m)	Densidade de Fluxo Magnético (B) (T)
0,106	2000
0,137	3000
0,188	5000
0,288	10000
0,455	14000
0,960	16000
2,000	17000
7,200	18000
18,000	18600
100,000	19800
200,000	20280
500,000	20970
1000,00	21430

Linhas de transmissão e distribuição: A Figura 9.52 apresenta o perfil da torre da linha de transmissão e a Tabela 9.10 apresenta os parâmetros dos condutores e a Tabela 9.11 apresenta o comprimento das linhas. No que tange às linhas de distribuição, seus respectivos dados estão apresentados na Tabela 9.12.

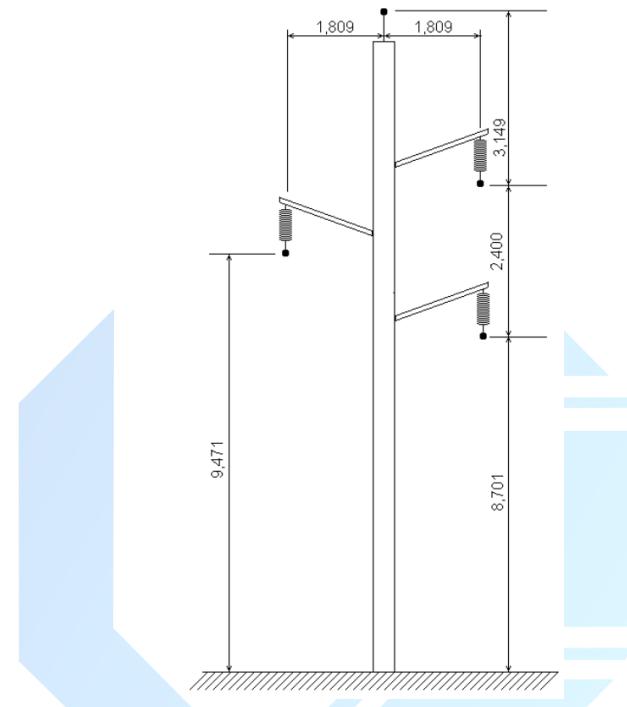


Figura 9.52 - Perfil da linha de transmissão (distância em metros)

Tabela 9.10 - Parâmetros dos condutores das linhas de transmissão

Tipo de condutor	Raio (cm)	Resistência em CC (Ω)
Fase Elgin – #652,5 MCM	1,177	0,1013
Para-raios Bute – #312,8 MCM	0,815	0,2113

Tabela 9.11 - Comprimento das linhas de transmissão

-	Linha de transmissão 1	Linha de transmissão 2
Comprimento (km)	9,8	12



Tabela 9.12 - Parâmetros das linhas de distribuição do sistema (Cabos Pirelli 15 kV)

Barra de início	Barra de fim	Secção (mm²)	Resistência (Ω/km)	Reatância Indutiva série em 60 Hz (Ω/km)	Reatância Capacitativa para terra em 60 Hz (Ω/km)	Comprimento (km)
3	4	500	0,054	0,107	6700	10,0
3	5	500	0,054	0,107	6700	8,0
3	11	500	0,054	0,107	6700	11,5
5	7	300	0,089	0,130	800	2,0
5	9	300	0,089	0,130	800	1,5
6	13	95	0,248	0,153	10500	0,5
8	14	95	0,248	0,153	10500	0,5
10	15	95	0,248	0,153	10500	0,6
12	16	95	0,248	0,153	10500	0,4

Banco de capacitores: A Tabela 9.13 apresenta os dados dos bancos de capacitores do sistema.

Tabela 9.13 - Banco de capacitor do sistema

Barra	Potência Nominal (MVar)	Tensão (kV)
5	0,20	13,8

Cargas elétricas: A Tabela 9.14 detalha as cargas existentes no sistema de distribuição.

Tabela 9.14 - Dados das cargas existentes no sistema de distribuição*

Barra	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Tensão (kV)
4	2,00	0,85	13,8
13	0,45	0,00	0,38
14	0,32	0,15	0,38
15	0,40	0,19	0,38
16	0,40	0,19	0,38



* As cargas devem ser modeladas como impedâncias constantes, do tipo paralela.

Religadores automáticos: As temporizações dos religadores automáticos estão apresentadas na Tabela 9.15.

Tabela 9.15 - Parametrização dos religadores automáticos

Religador	Tempo para religamento (s) – 1ª operação	Tempo para religamento (s) – 2ª operação
Religador 1	0,1	0,4
Religador 2	0,1	0,4
Religador 2	0,1	0,4

Fontes harmônicas: A Tabela 9.16 apresenta a amplitudes das distorções harmônicas da cargas.

Tabela 9.16 - Componentes harmônicas geradas pelas cargas

Ordem harmônica	Amplitude da componente harmônica (A)	
	Barra 4	Barra 16
5	20	2
7	30	1
11	8	0,6
13	5	0,5

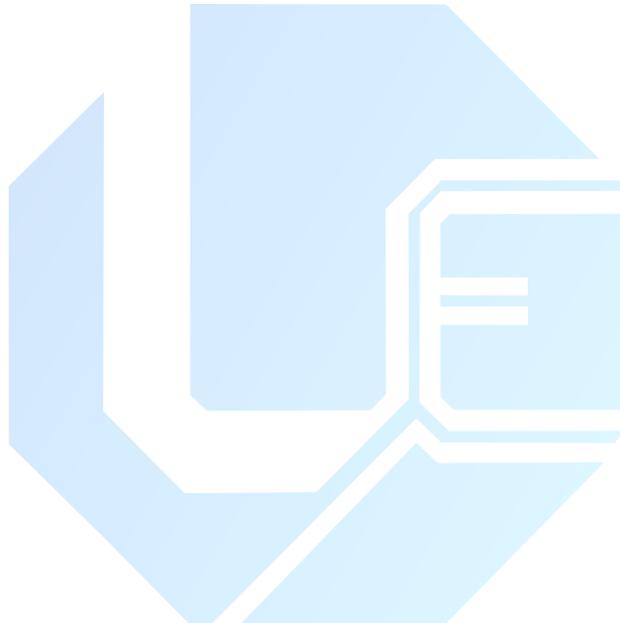
Simulação Computacional

A simulação computacional do sistema elétrico apresentado neste item visa a análise das seguintes condições operativas:

- Sistema em regime permanente, no qual são avaliadas as tensões nas barras e correntes nos alimentadores em relação aos parâmetros de qualidade da energia – Procedimentos de Distribuição (PRODIST) – Modulo 8: Qualidade da Energia Elétrica;
- Influência do banco de capacitores na regulação de tensão do sistema;
- Curto circuito trifásico, de duração 5 ms, visando verificar a atuação do religador automático existente no alimentadores da rede de distribuição;



- Curto circuito monofásico, de duração 5 ms, visando verificar a atuação do religador automático existente no alimentadores da rede de distribuição;
- Impactos sobre o sistema de falta de fase na alimentação de cargas – Cálculo do desequilíbrio e avaliação com relação aos parâmetros de qualidade da energia – Procedimentos de Distribuição (PRODIST) – Modulo 8: Qualidade da Energia Elétrica;
- Influência de cargas geradora de distorções harmônicas e avaliação com relação aos parâmetros de qualidade da energia – Procedimentos de Distribuição (PRODIST) – Modulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.





10 - Modelagens de Motores de Indução Trifásico no ATP

10.1 – Configuração do ATP Settings

Ante de realizar as simulações com motores, deve-se editar algumas configuração no ATP Settings (atalho - F3).

As Figuras 10.1 e 10.2 apresentam as janelas com as devidas configurações já realizadas. Na aba “Output” (Figura 10.1) deve-se desmarca a opção “Steady-state phasors”

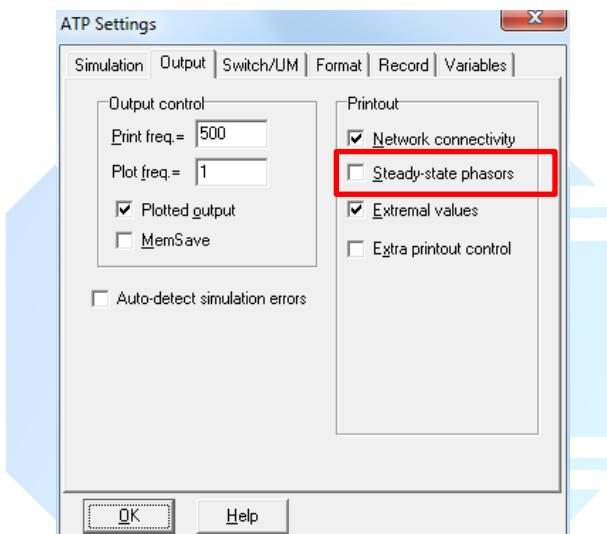


Figura 10.1 – ATP Settings – Aba: Output

Na Figura 10.2, aba “Switch/UM”, deve-se alterar o campo “Interface” de “Prediction” para “Compensation”.

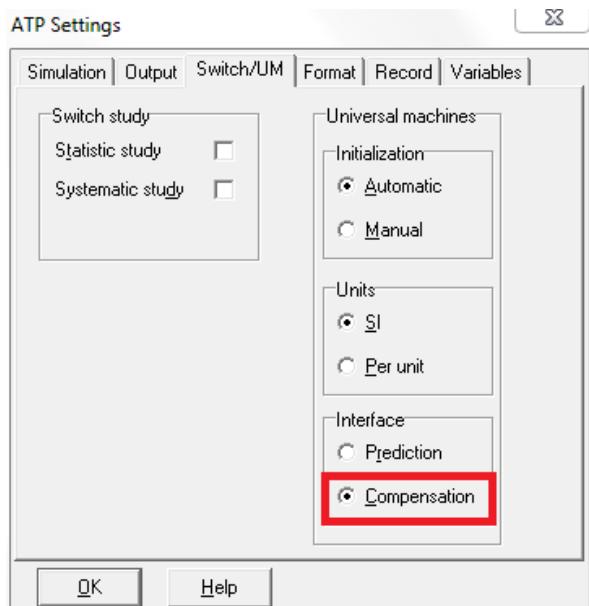


Figura 10.2 – ATP Settings – Aba: Switch/UM

10.2 – Exemplo de modelagem de motores de indução trifásicos no ATPDraw

10.2.1 – Dados de placa do motor de indução trifásico

Os dados do motor utilizado neste exemplo foram extraídos do site da WEG, Figuras 10.3 e 10.4, no link abaixo. O motor selecionado foi: Categoria industrial, linha de produto W22 Plus, frequência 60Hz, tensão 220/380 e potência de 100cv (75 kW).

http://catalogo.weg.com.br/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp



» W22 Plus

Brasil » Português (Brasil)

Seleção do Motor Dados Elétricos Desenhos Curvas

» Informe aqui as características do motor que deseja

Mercado	Brasil » Português (Brasil)
Categoria	Industriais
Linha de Produto	W22 Plus
Norma	<input checked="" type="radio"/> IEC <input type="radio"/> NEMA
Frequência	<input type="radio"/> 50 Hz <input checked="" type="radio"/> 60 Hz
Polaridade	<input type="radio"/> 2 Polos <input checked="" type="radio"/> 4 Polos <input type="radio"/> 6 Polos <input type="radio"/> 8 Polos <input type="radio"/> 10 Polos <input type="radio"/> 12 Polos
Tensão	220/380V
Unidade	<input type="radio"/> kg/Nm/kgm ² /m <input type="radio"/> lb/ft.lb/sq.ft.lb/ft
Potência	75
Carcaça	250S/M

ver dados do motor

Copyright © 2011 WEG - Todos os direitos reservados.

Figura 10.3 – Janela de seleção do motor – site WEG

Características

- Potência: **75 kW**
- Polos: **4**
- Frequência: **60 Hz**
- Conjulado: **404 Nm**
- Tensão: **220/380 V**
- Carcaça: **250S/M**
- RPM: **1775**
- In: **240/139 A**
- Rendimento (100%): **94,6**
- F.P. (100%): **0,87**
- Isolamento: **F**
- Ruido: **70 dB(A)**
- Corrente a vazio: **90,0/52,1 A**
- Ip / In: **7,2**



clique para ampliar

[gerar arquivo PDF](#)

[gerar proposta técnica](#)

Pot	Carc.	In (A) 220/380 V	Ip / In	Cp / Cn	Cm / Cn
75 kW	250S/M	240/139 A	7,2	240 %	280 %

Rendimento (%)			Fator de Pot.			FS	Inércia	Tr (s)	Ruído	Massa
50	75	100	50	75	100					
94,0	94,5	94,6	0,74	0,83	0,87	1,15	1,0148 kgm ²	12 s	70 dB(A)	470 kg

alterar os dados

outras potências

Figura 10.4 – Janela de características do motor – site WEG



Os dados apresentados abaixo foram extraídos das Figuras 10.3 e 10.4, e serão utilizados na obtenção dos valores de resistência e indutância do motor:

Tensão: **0,38 kV**

Potencia Ativa: **75 kW**

$$\text{Escorregamento: } \frac{1800_{RPM} - 1775_{RPM}}{1800_{RPM}} = \mathbf{0,0138}$$

Rendimento (100%): **0,946**

Fator de potência: **0,87**

Corrente rotor bloqueado / corrente nominal = (Ip/In): **7,2**

10.2.2 – Esquema de montagem e modelagem do moto UM3

A figura 10.5 mostra a janela de localização do componente UM3 – motor de indução trifásico no ATPDraw.

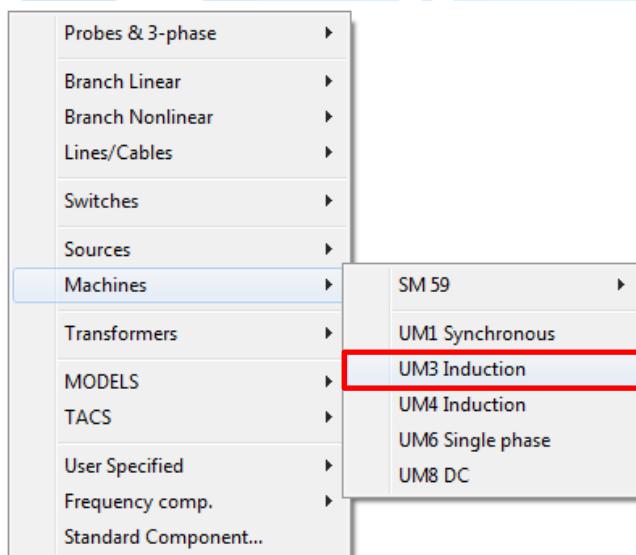
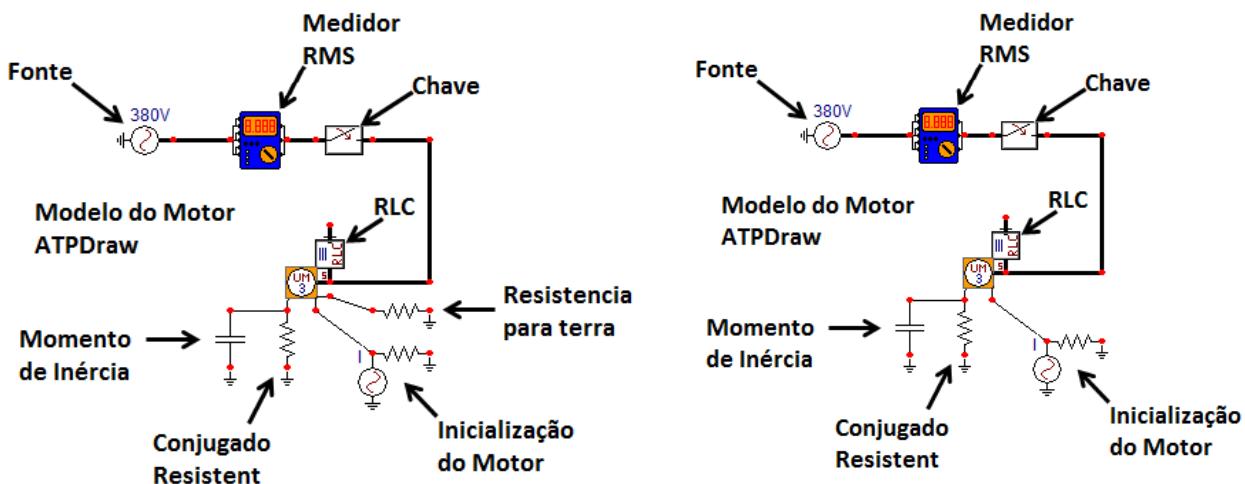


Figura 10.5 – Localização do componente motor de indução trifásico no ATPDraw

O motor de indução UM3 pode ser ligado em “estrela” ou em “delta”. A figura 10.6 mostra o esquema de conexão para os dois tipos de ligação, assim como seu momento de inércia, o conjugado resistente e a inicialização do motor.



Ligaçāo - Estrela

Figura 10.6 – Modelagem de motores UM3 no ATPDraw

Ligaçāo - Delta

O próximo passo consiste na execução do programa “**motdatpr.exe**” e preenchimento dos dados do motor conforme a Figura 10.7. Este programa calcula os parâmetros para o motor em “Estrela”. Para passar os dados para “Delta” basta multiplicar por “3” os valores de: L_d , L_q , L_1 , L_2 , R_d , R_q , R_1 e R_2 .

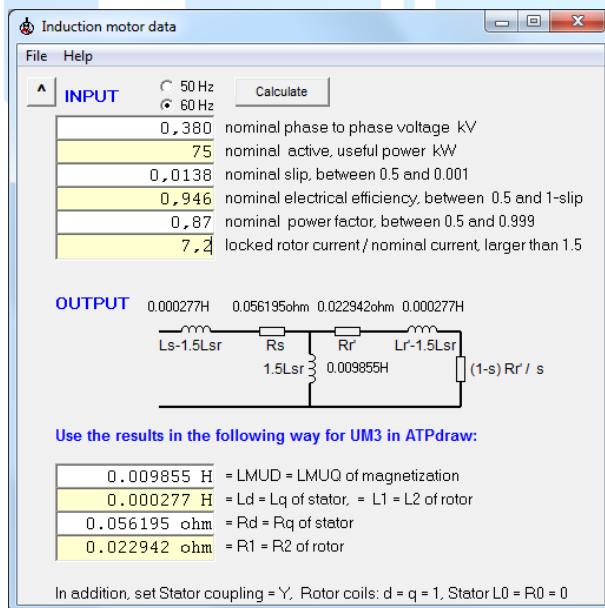


Figura 10.7 – Janela do programa “Induction motor data” com os parâmetros do motor já preenchido.

A Figura 10.8 apresenta as janelas do motor UM3 do ATPDraw já preenchida com os dados calculados no programa “Induction motor data”.



Component: UM_3.sup

Attributes

General	Magnet.	Stator	Rotor	Init
Stator coupling	Y	Pole pairs:	2	
Rotor coils	d: 1 q: 1	Frequency:	60	
Global	<input checked="" type="checkbox"/> Automatic	Tolerance:	0.1885	
	<input type="checkbox"/> Prediction			

Order: 0 Label: []

Comment: Motor 220/380V - 100cv

Output

TQOUT: 0 1 2 3 OMOUT: 0 1 2 3 THOUT: Curr:

Hide Lock

OK Cancel Help

Component: UM_3.sup

Attributes

General	Magnet.	Stator	Rotor	Init
LMUD:	0.009855	Stator	ABC	
LMUQ:	0.009855	M_NODE	1	
Saturation	<input checked="" type="radio"/> none	BUSM	1	
	<input type="radio"/> d			
	<input type="radio"/> q			
	<input type="radio"/> both			
	<input type="radio"/> symm			

Order: 0 Label: []

Comment: Motor 220/380V - 100cv

Output

TQOUT: 0 1 2 3 OMOUT: 0 1 2 3 THOUT: Curr:

Hide Lock

OK Cancel Help

Component: UM_3.sup

Attributes

General	Magnet.	Stator	Rotor	Init
R [ohm]	L [H/pu]	Stator	ABC	
0	0	M_NODE	1	
d: 0.056195	0.000277	BUSM	1	
q: 0.056195	0.000277			

Order: 0 Label: []

Comment: Motor 220/380V - 100cv

Output

TQOUT: 0 1 2 3 OMOUT: 0 1 2 3 THOUT: Curr:

Hide Lock

OK Cancel Help

Component: UM_3.sup

Attributes

General	Magnet.	Stator	Rotor	Init
R [ohm]	L [H/pu]	Stator	ABC	
1	0.022942	M_NODE	1	
2	0.022942	BUSM	1	

Order: 0 Label: []

Comment: Motor 220/380V - 100cv

Output

TQOUT: 0 1 2 3 OMOUT: 0 1 2 3 THOUT: Curr:

Hide Lock

OK Cancel Help

Component: UM_3.sup

Attributes

General	Magnet.	Stator	Rotor	Init
Automatic	SLIP [%]:	Stator	ABC	
	100	M_NODE	1	
		BUSM	1	

Order: 0 Label: []

Comment: Motor 220/380V - 100cv

Output

TQOUT: 0 1 2 3 OMOUT: 0 1 2 3 THOUT: Curr:

Hide Lock

OK Cancel Help

Figura 10.8 – Janelas do motor UM3 no ATPDraw



No **Help**, podemos encontrar as informações de cada parâmetro e suas respectivas unidades, que o ATPDraw utiliza.

Name : UM_3 - Induction Machine. UM type 3.

Card : SOURCE

Data: Paginas:

Geral:

Rotor coils: Especificar o número de bobinas dos eixos d e q;

Tolerance: margem de convergência e iteração da velocidade do rotor;

Output: TQout 1= torque;

 2= fluxo mutuo no eixo d;

 3= corrente de magnetização do eixo d;

OMout 1= velocidade do eixo do rotor em [rad/s]

 2= fluxo mutuo no eixo q;

 3= corrente de magnetização do eixo q;

THout: verificar a posição angular do rotor em [mech rad]

Magnet.:

LMUD: Indutância de magnetização do eixo d;

LMUQ: Indutância de magnetização do eixo q;

Saturation:

LMSD: Indutância saturada do eixo d;

FLXSD: Fluxo de dispersão no ponto de saturação da curva do eixo d;

FLXRD: Fluxo de dispersão residual no eixo d, com zero de corrente;

LMSQ: Indutância saturada do eixo q;

FLXSQ: Fluxo de dispersão no ponto de saturação da curva do eixo q;

FLXRQ: Fluxo de dispersão residual no eixo q, com zero de corrente;

Symm: A saturação é igual nos dois eixos, especificado apenas em d;

Stator:

Especificar as resistências e indutâncias na transformada de Park;

Rotor:

Especificar o valor das resistência e indutância de cada bobina;

Init:

SLIP(%): escorregamento inicial em %.

Induction motor data

1. Tensão do motor em kV;
2. Potência do motor em kW;
3. Escorregamento;
4. Eficiencia elétrica do motor;
5. Fator de potência;
6. Relação I_p/I_n ;



O próximo passo consiste na modelagem da carga do tipo constante.

10.2.3 - Momento de Inércia:

O momento de inércia da carga é representado no ATPDraw por um capacitor, cujo seu valor é calculado da seguinte forma:

$$J_T = J_M + J_C$$

$$J_C = 0,04 * [P_M (kW)]^{0,9} * [n^{\circ} \text{ pares de polos}]^{2,5}$$

$$J_C = 0,04 * [75]^{0,9} * [2]^{2,5}$$

$$J_C = 11,02 \text{ kgm}^2$$

Logo:

$$J_T = J_M + J_C = 1,0148 + 11,02 = 12,035 \text{ kgm}^2$$

$$\therefore C = J_T * 10^6 = 12,035 * 10^6 = 12035000 \mu\text{F}$$

O seu correto preenchimento pode ser observado na Figura 10.9.

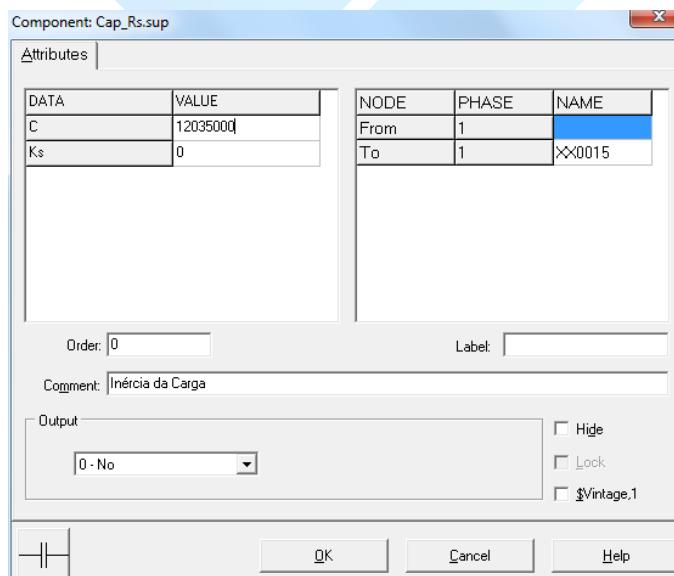


Figura 10.9 – Momento de inércia



10.2.4 - Conjugado resistente:

De acordo com a Figura 10.6, o conjugado resistente é representado no ATPDraw por uma resistência e o mesmo é calculado da seguinte forma:

$$R = \frac{Wn * 2 * \pi}{Cn * 60} = \frac{1775 * 2 * \pi}{404 * 60} = 0.46 \Omega$$

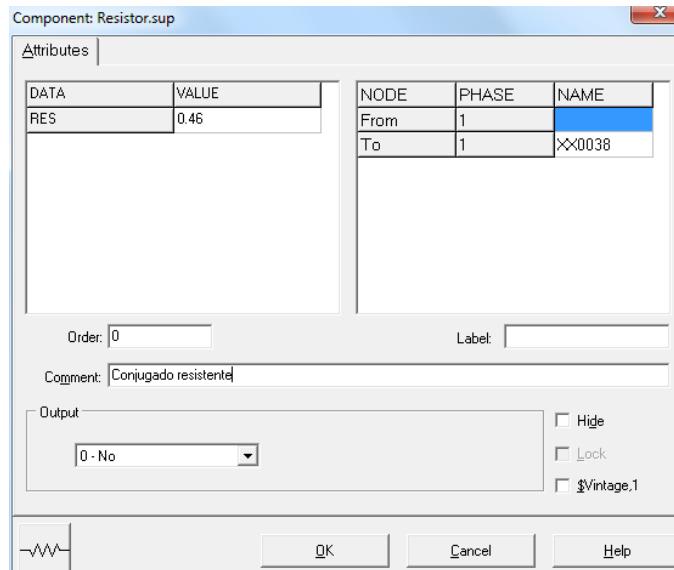


Figura 10.10 – Conjugado resistente

10.2.5 - Inicialização do motor, ponto de neutro e expansão do numero de motores:

O nó de inicialização do rotor esta conectado a uma fonte de corrente que indica a corrente inicial e sua frequência no momento em que a simulação tem início. As Figuras 10.11 e 10.12 apresentam respectivamente a janela da fonte de corrente e a janela do resistor em paralelo com a fonte. Os valores devem ser preenchidos conforme as figuras.

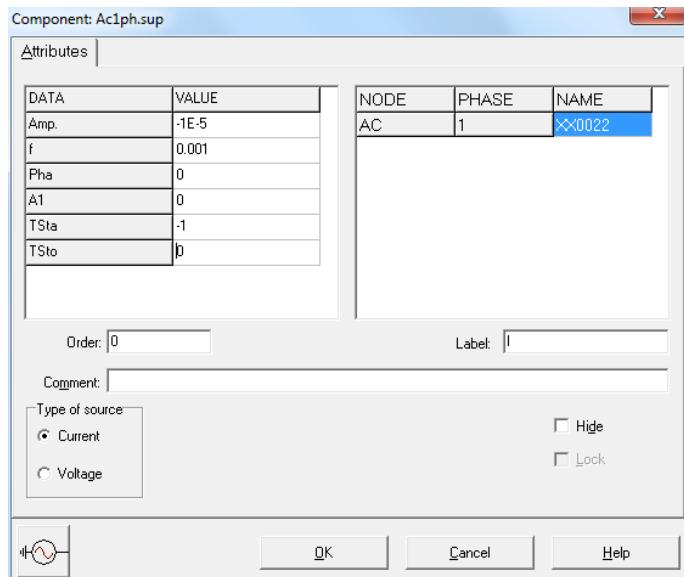


Figura 10.11 – Fonte de corrente - inicialização do motor

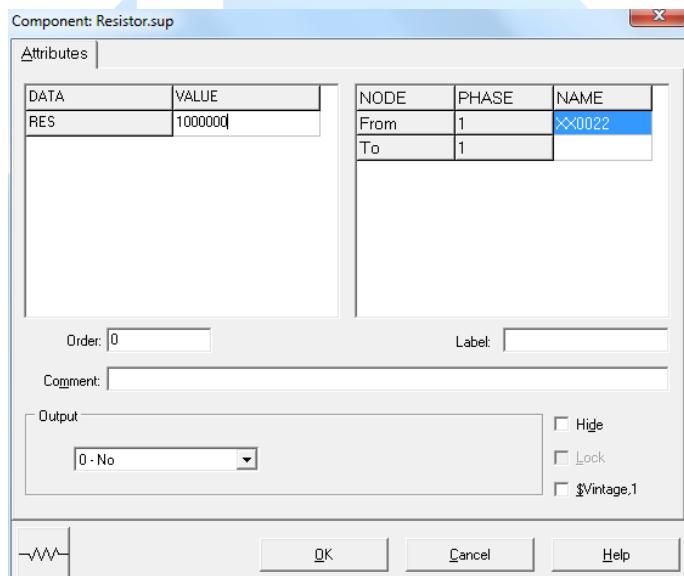


Figura 10.12 – Resistencia - inicialização do motor

RLC: A Figura 10.13 apresenta a janela do componente RLC (série-aterrado) colocado na entrada do motor. Este componente é utilizado com o objetivo de se evitar erros de simulação.

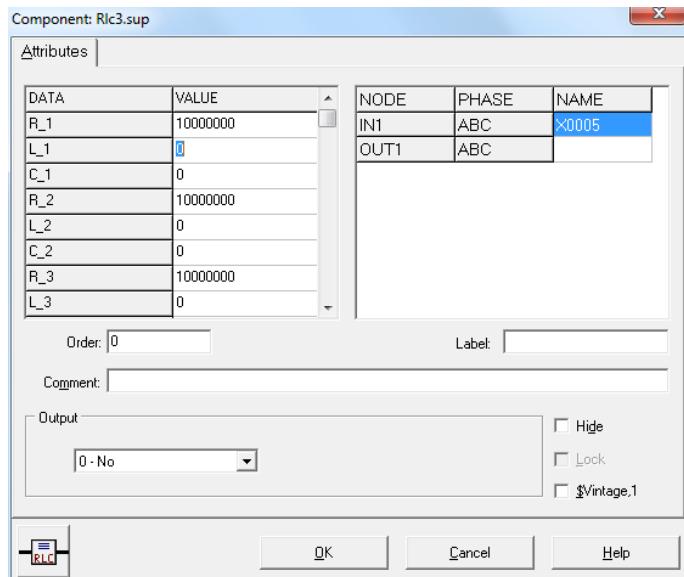


Figura 10.12 – Componente RLC – R=10000000

O **ponto de neutro** é disponibilizado pelo ATPDraw quando se representa um motor com ligação em estrela e portanto esse neutro deve ser ligado a algum elemento do circuito para evitar erro de processamento. Como o neutro não é aterrado na maioria dos motores deve-se inserir nesse ponto uma resistência de valor alto conectado a terra.

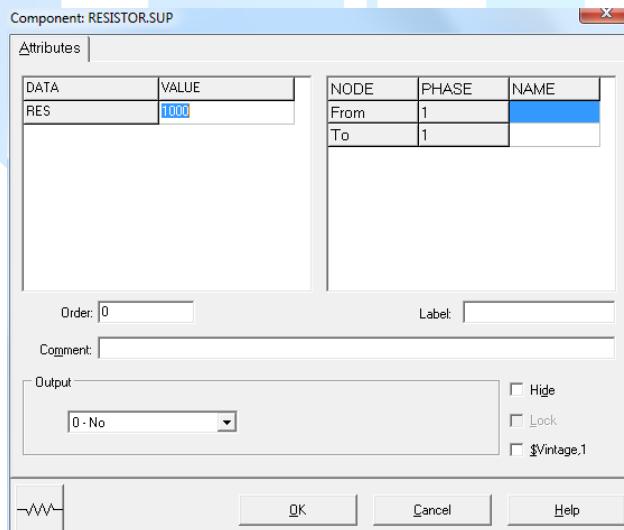


Figura 10.13 – Resistência de aterramento do motor em estrela – R=1000

Expansão do numero de motores: Em caso de uma simulação onde o número de motores é maior do que 3, deve se então, criar um cartão conforme a Figura 10.14 especificando o número de motores desejado. O caminho para se chegar a janela da Figura 10.14 é:



“ATP>Settings>Format>Additional”. O cartão deve ser escrito da forma que se encontra na Figura 10.14 e a coluna 43 corresponde a quantidade de motores, para este caso foi colocado o número de 5 motores.(Rule Book - Rb-090 => Pag 26)

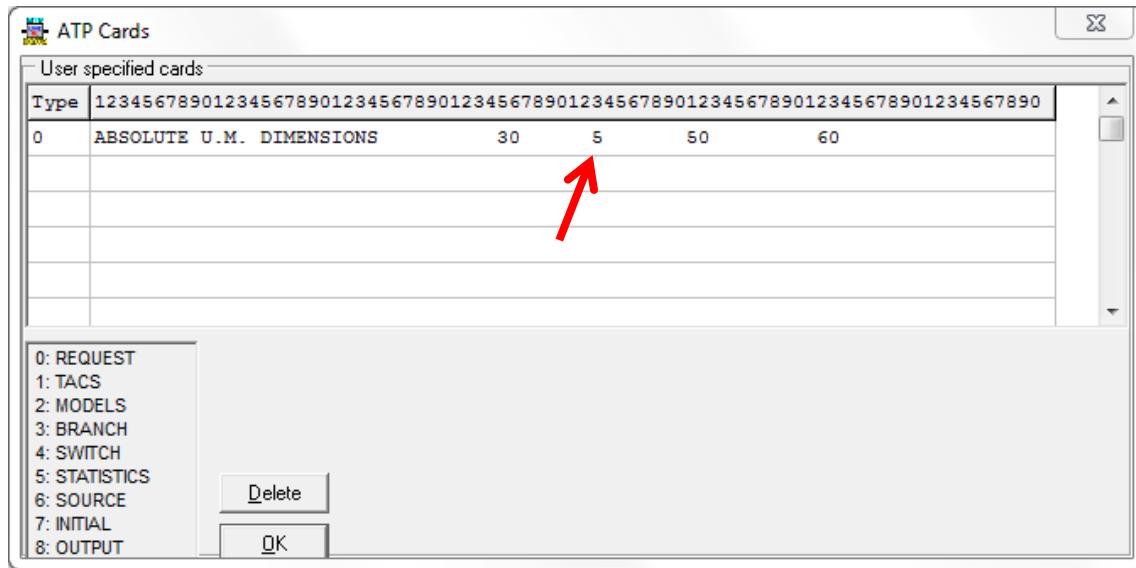


Figura 10.14 – ATP Settings – Aba: Switch/UM